

ТОМ 25, №3, 2025

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](http://www.vestnik-donstu.ru)  
DOI 10.23947/2687-1653



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

## 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>	<a href="https://vestnik-donstu.ru">https://vestnik-donstu.ru</a>
<i>Адрес редакции</i>	344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
<i>E-mail</i>	<a href="mailto:vestnik@donstu.ru">vestnik@donstu.ru</a>
<i>Телефон</i>	+7 (863) 2–738–372
<i>Дата выхода №3, 2025 в свет</i>	30.09.2025





# 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>	<a href="https://vestnik-donstu.ru">https://vestnik-donstu.ru</a>
<i>Address of the Editorial Office</i>	1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation
<i>E-mail</i>	<a href="mailto:vestnik@donstu.ru">vestnik@donstu.ru</a>
<i>Telephone</i>	+7 (863) 2–738–372
<i>Date of Publication No.3,2025</i>	30.09.2025



**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 Гивневна**, 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)

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

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

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

**Мурат Тезер**, профессор, Ближневосточный университет (Турция)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Janusz Witalis Kozubal, Dr.Sci. (Eng.), 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, Raphiel Dvali Institute of Machine Mechanics (Georgia)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## Содержание

### МЕХАНИКА

- Проектирование и анализ методом конечных элементов экологически безопасных моноармированных и гибридноармированных фиброгеополимеров ..... 171  
*С.В. Клюев, А.В. Клюев, Н.А. Аюбов, Р.С. Федюк, Е.В. Левкина*
- Метод оптимального управления экзоскелетом нижних конечностей с упругими элементами ..... 186  
*Д. Диб, И.В. Меркурьев*

### МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Экспериментальное исследование точности позиционирования автоматизированного длинноходового бесштокового пневмопривода ..... 197  
*Д.А. Коротыч*
- Исследование влияния взаиморасположения электродов на геометрические параметры слоя и морфологию зоны проплавления при наплавке расщепленной дугой ..... 208  
*Я.П. Скобликов, Е.И. Ефимов, В.В. Мурзин*

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- Подход к реконструкции модели тела на основе ограниченного набора данных о двигательной активности рук ..... 221  
*А.Д. Обухов, Д.В. Теселкин*
- Математическое моделирование оценки мощности заряда при исключении просадочности лёссов глубинными гидровзрывами ..... 233  
*Е.О. Тарасенко*
- Получение набора вибрационных сигналов подшипника качения с разной степенью развития локального дефекта наружного кольца ..... 242  
*З.А. Колосова, О.П. Колосова, Д.А. Шнайдер*
- Усовершенствование диаграмм Business Process Model and Notation с помощью подхода «узел – функция – объект» ..... 256  
*А.Г. Жихарев, Е.В. Малкуш, С.И. Маторин*

## Contents

### MECHANICS

- Finite Element Design and Analysis of Sustainable Mono-Reinforced and Hybrid-Reinforced Fibergeopolymers** ..... 171  
*Sergey V. Klyuev, Alexander V. Klyuev, Narman A. Ayubov, Roman S. Fediuk, Elena V. Levkina*
- Optimal Control Method for a Lower Limb Exoskeleton with Elastic Elements** ..... 186  
*Delshan Deeb, Igor V. Merkurjev*

### MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE

- Experimental Study on Positioning Accuracy of an Automated Long-Stroke Rodless Pneumatic Actuator** ..... 197  
*Daniil A. Korotych*
- Study of Effect of Electrode Arrangement on Layer Geometry and Fusion Zone Morphology under Twin-Arc Surfacing** ..... 208  
*Iakov P. Skoblikov, Evgeny I. Efimov, Victor V. Murzin*

### INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT

- Reconstructing a Full-Body Model from a Limited Set of Upper-Limb Motion Data** ..... 221  
*Artem D. Obukhov, Daniil V. Teselkin*
- Mathematical Modeling of Charge Power Assessment with Exclusion of Loess Subsidence by Deep Hydraulic Blasts** ..... 233  
*Elena O. Tarasenko*
- Obtaining a Set of Vibration Signals from Rolling Bearings with Varying Degrees of Local Defect Development in the Outer Ring** ..... 242  
*Zoya A. Kolosova, Olga P. Kolosova, Dmitry A. Shnayder*
- Improving Business Process Model and Notation Diagrams with the Node-Function-Object Approach** ..... 256  
*Alexander G. Zhikharev, Elena V. Malkush, Sergey I. Matorin*

МЕХАНИКА  
MECHANICS

УДК 614

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-171-185>**Проектирование и анализ методом конечных элементов экологически безопасных моноармированных и гибридноармированных фиброгеополимеров**

EDN: UKVSSN

С.В. Клюев<sup>1</sup> , А.В. Клюев<sup>1</sup> , Н.А. Аюбов<sup>2</sup> , Р.С. Федюк<sup>3</sup>  , Е.В. Левкина<sup>3</sup> <sup>1</sup> Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация<sup>2</sup> Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук, г. Грозный, Российская Федерация<sup>3</sup> Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Российская Федерация [roman44@ya.ru](mailto:roman44@ya.ru)**Аннотация**

**Введение.** Улучшение экологии предполагает переработку техногенных материалов для получения продукции с высокими эксплуатационными характеристиками. Однако в строительстве в целом безальтернативны энергоемкие и неэкономичные материалы. Литературные сведения по проблеме недостаточны и разрознены. Представленная статья призвана восполнить этот пробел. Цель работы — исследование моноармированных и гибридноармированных фиброгеополимеров. Для достижения цели решались две задачи: проектирование полимеров и анализ балок из них методом конечных элементов.

**Материалы и методы.** Вяжущей основой фиброгеополимеров служили спекшиеся частицы (корольки) из отходов техногенных волокнистых материалов (ТВМ), а именно из базальтовой ваты. Фибру изготавливали из металлокорда, отходов базальтовой ваты и полипропилена. Балки из гибридноармированных фиброгеополимеров изучали при изгибе и сдвиге в программной среде Ansys 16.1.

**Результаты исследования.** Получены два вида геополимеров:

– моноармированные (фибра из металлокорда, полипропиленовая фибра и ТВМ – фибра из отходов производства базальтовой ваты);

– гибриднофиброармированные (металлокорд + полипропилен, металлокорд + ТВМ, полипропилен + ТВМ).

Выявили высокие значения модуля упругости (более 25 ГПа), прочности при изгибе (до 10,19 МПа) и сжатии (до 46,67 МПа). Отношение прочности при изгибе и сжатии для исследуемых и традиционных материалов — 1:4 и 1:10 соответственно. Сравнили смоделированные и экспериментальные показатели прогибов балок при нагрузках от 5 до 72 кН. Выяснили, что конечноэлементное моделирование позволяет проектировать конструкции из разработанных материалов и прогнозировать их эксплуатационные характеристики.

**Обсуждение.** Установлены случаи наименьшего расхождения данных моделирования и опытов. Для ФГП-1 это 8 % (нагрузка — 35 кН), для ФГП-2 — 11 % (50 кН), для ФГП-3 — 7 % (38 кН), для ФГП-1 (1) — 3 % (30 кН). Среди гибридноармированных фиброгеополимеров наилучшее соответствие — у ГФГП-3. При нагрузке 55 кН расхождение — 0,80 % (теория — 4,98 мм, опыт — 5,02 мм). Для ГФГП-1 лучший показатель — 1,85 % (72 кН, 5,85 мм, 5,96 мм), для ГФГП-2 — 9,12 % (63 кН, 5,58 мм, 6,14 мм). Прикладную ценность результатов подтвердила их визуализация — схожесть и совпадение кривых на графиках.

**Заключение.** Доказаны преимущества предложенных инновационных компонентов для производства строительных материалов. Они экологичны, демонстрируют достаточную удобоукладываемость. Проектирование гибридноармированных фиброгеополимеров дает возможность получить высокие значения прочности при изгибе и сжатии (существенно выше, чем у неармированных бетонов). Модуль упругости более 25 ГПа доказывает хорошее сопротивление материала деформациям. Итоги моделирования адекватны результатам экспериментов.

**Ключевые слова:** моноармированные фиброгеополимеры, гибридноармированные фиброгеополимеры, переработка техногенного сырья, техногенные волокнистые материалы, технические свойства фибр, геополимерный бетон

**Благодарности.** Авторы благодарны анонимным рецензентам за уделенное время и ценные комментарии.

**Финансирование.** Работа опубликована при финансовой поддержке РФФ, проект № 25–19–00426 (<https://rscf.ru/project/25-19-00426/>).

**Для цитирования.** Клюев С.В., Клюев А.В., Аюбов Н.А., Федюк Р.С., Левкина Е.В. Проектирование и анализ методом конечных элементов экологически безопасных моноармированных и гибридноармированных фиброгеополимеров. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(3):171–185. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-171-185>

Original Empirical Research

## Finite Element Design and Analysis of Sustainable Mono-Reinforced and Hybrid-Reinforced Fibergeopolymers

Sergey V. Klyuev<sup>1</sup> , Alexander V. Klyuev<sup>1</sup> , Narman A. Ayubov<sup>2</sup> ,

Roman S. Fediuk<sup>3</sup>  , Elena V. Levkina<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> V.G. Shukhov Belgorod State Technological University, Belgorod, Russian Federation

<sup>2</sup> Kh.I. Ibragimov Complex Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russian Federation

<sup>3</sup> Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

 [roman44@ya.ru](mailto:roman44@ya.ru)

### Abstract

**Introduction.** Environmental improvement involves the recycling of man-made materials for product recovery with high performance characteristics. However, in general, energy-intensive and uneconomical materials have no alternative in construction. Literary information on the problem is insufficient and uncompiled. The presented article is intended to fill this gap. The research objective is to study mono-reinforced and hybrid-reinforced fibergeopolymers. For this purpose, two problems are solved: design of polymers and analysis of beams made from them using the finite element method.

**Materials and Methods.** The binding base for the production of fibergeopolymers was sintered particles (beads) extracted from basalt wool waste — technogenic fibrous materials (TFM). The fiber was made from metal cord, basalt wool waste and polypropylene. Beams made from hybrid-reinforced fibergeopolymers were studied under bending and shear in the ANSYS 16.1 software environment.

**Results.** Two types of geopolymers were obtained:

- mono-reinforced (fiber from metal cord, polypropylene fiber, and TFM – fiber from waste from basalt wool production);
- hybrid-fiber-reinforced (metal cord + polypropylene, metal cord + TFM, polypropylene + TFM).

High values of elastic modulus (more than 25 GPa), bending strength (up to 10.19 MPa) and compression strength (up to 46.67 MPa) were defined. The ratio of bending and compression strength for the studied and traditional materials was 1:4 and 1:10, respectively. The simulated and experimental indicators of beam deflections under loads from 5 to 72 kN were compared. It was found that finite element modeling allowed designing structures from the developed materials and predicting their performance characteristics.

**Discussion.** The cases of the smallest discrepancy between the modeling and experimental data were established. For FGP-1, it was 8% (load — 35 kN), for FGP-2 — 11% (50 kN), for FGP-3 — 7% (38 kN), for HFGP-1 (1%) — 3% (30 kN). Among the hybrid-reinforced fibergeopolymers, the best compliance was that of HFGP-3. At a load of 55 kN, the discrepancy was 0.80% (theory — 4.98 mm, experiment — 5.02 mm). For HFGP-1, the best indicator was 1.85% (72 kN, 5.85 mm, 5.96 mm), for HFGP-2 — 9.12% (63 kN, 5.58 mm, 6.14 mm). The applied value of the results was confirmed by their visualization – the similarity and coincidence of the curves on the graphs.

**Conclusion.** The advantages of the proposed innovative components for the production of building materials are proved. They are environmentally friendly and show sufficient workability. Design of hybrid-reinforced fibergeopolymers makes it possible to obtain high values of bending and compression strength (significantly higher than that of unreinforced concrete). The modulus of elasticity of more than 25 GPa proves good resistance of the material to deformations. The results of the modeling are adequate to the results of the experiments.

**Keywords:** mono-reinforced fibergeopolymers, hybrid-reinforced fibergeopolymers, processing of technogenic raw materials, technogenic fibrous materials, technical properties of fibers, geopolymer concrete

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

**Funding Information.** The research was done with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 25–19–00426 (<https://rscf.ru/project/25-19-00426/>).

**For Citation.** Klyuev SV, Klyuev AV, Ayubov NA, Fediuk RS, Levkina EV. Finite Element Design and Analysis of Sustainable Mono-Reinforced and Hybrid-Reinforced Fibregeopolymers. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(3):171–185. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-171-185>

**Введение.** Один из приоритетов стратегии научно-технического развития Российской Федерации — противодействие техногенным, биогенным, социокультурным и иным источникам опасности для общества и экономики [1]. Важнейшая задача экологической безопасности — разработка технологических способов и технических средств [2], ресурсосбережения [3] и комплексной переработки техногенных материалов [4], получение на их основе продукции с высокими эксплуатационными характеристиками [5].

Трансдисциплинарные подходы обеспечивают новый уровень развития строительных композиционных смесей. Для прогресса в этой сфере важно уйти от действующих шаблонов проектирования строительных материалов [6]. Для снижения сложности рецептур и стоимости компонентов следует использовать данные различных наук: материаловедения, физики, химии, геологии, нанотехнологий и т. д. К тому же новому композиту можно задать определенные эксплуатационные характеристики [7].

Улучшение физико-механических, эксплуатационных, защитных и экологических свойств современных модифицированных композитов базируется на:

- оптимизации рецептур и технологий;
- использовании нетрадиционных видов природного и техногенного сырья [8].

Известно, что экономическая эффективность проектов во многом определяется применением высокотехнологичных стройматериалов [9]. У современных композитов — хорошие перспективы в промышленном и гражданском строительстве [9]. Нередко их используют для уникальных проектов и объектов, которые будут эксплуатироваться в различных условиях [10].

При производстве описанных выше материалов, как правило, задействуют одну из двух инновационных стратегий:

- рециклинг для производства так называемых «зеленых» материалов [11];
- создание «умных» бетонов для мониторинга состояния строительных конструкций [12].

Отметим, что в нормативной базе, регулирующей строительное проектирование, нет рекомендаций по использованию техногенных отходов в качестве наполнителей для бетона. Перспективные подходы обсуждаются в литературе. Как правило, речь идет о комплексной переработке отслуживших шин, а также о волокнистых материалах — техногенных отходах производства минеральной ваты [13]. Однако оба эти решения недостаточно изучены и протестированы на практике.

Следует упомянуть также возможность применения технического углерода и отходов ТВМ. Однако и в этом случае нет адекватных научных выводов, которые доказали бы практическую целесообразность внедрения таких композитов в строительную практику [14].

Цель представленной работы — исследование и проектирование методом конечных элементов неармированных и гибридноармированных фиброгеополимеров. В рамках данного исследования решали две задачи: проектирование гибридноармированных фиброгеополимеров и анализ балок из них методом конечных элементов. Это необходимо для реализации заявленной цели, а также в целом для создания экологически безопасных строительных материалов.

**Материалы и методы.** Вяжущей основой для изготовления фиброгеополимеров служили спекшиеся частицы (корошки), извлеченные из отходов базальтовой ваты — техногенных волокнистых материалов (ТВМ). В качестве щелочной активирующей жидкости использовалась комбинация раствора силиката натрия и гидроксида натрия. Мелким наполнителем выступал полифракционный кварцевый песок с удельным весом 2,67. Максимальный размер крупного наполнителя, используемого в этом исследовании, не превышает 12 мм, что увеличивает удобоукладываемость бетона. Фибру из металлокорда отработавших шин термически обрабатывали и нарезали. Фибру из ТВМ получали путем измельчения базальтовой ваты. Авторы установили, что иногда реальные технические свойства фибр отличаются от заявленных производителями, и именно эти, настоящие, параметры приводятся в таблице 1.

Таблица 1

## Свойства различных видов фибры

Свойства	Металлокордовая	Полипропиленовая	ТВМ
Диаметр, мм	0,75	0,002	0,013
Длина, мм	60–75	12,0	40–70
Соотношение длины к диаметру	80–100	6 000	3 077–5 385
Прочность на растяжение, МПа	2 500	3,50	2 000
Модуль упругости, МПа	210	3,45	75 000
Удельный вес	8	0,90	2,60

Изучали поведение балок размером 1 000×200×100 мм из гибридноармированных фиброгеополимеров. Их анализировали методом конечных элементов при изгибе и сдвиге. Прогиб геополимербетонных балок считают, чтобы предотвратить недопустимые деформации и обеспечить нормальную эксплуатацию конструкций. Метод конечных элементов подходит для компьютерной обработки, может применяться в решении задач по механике твердого тела, механике жидкости, теплопередаче и вибрациям.

**Результаты исследования.** Разработаны составы экологически безопасных фиброгеополимерных смесей, которые показали удовлетворительные характеристики удобоукладываемости (таблица 2). Удобоукладываемость обеспечивает качественную, безопасную транспортировку геополимерной смеси к месту укладки.

Таблица 2

## Разработанные составы и результаты измерения осадки конуса

Состав	Содержание фибры, % по объему	Осадка, мм	Удобоукладываемость
Цементобетон	–	112,1	Высокая
Неармированный геополимер (ГП)	–	103,5	Высокая
Фиброгеополимер (ФГП-1), металлокорд	0,5	80,3	Средняя
ФГП-2, полипропилен	0,5	78,4	Средняя
ФГП-3, ТВМ	0,5	76,5	Средняя
Гибридный фиброгеополимер (ГФГП-1), металлокорд + полипропилен	0,25 + 0,25	65,4	Средняя
ГФГП-2, металлокорд + ТВМ	0,25 + 0,25	70,2	Средняя
ГФГП-3, ТВМ + полипропилен	0,25 + 0,25	68,7	Средняя

Композиты затвердевали в течение 28 дней при обычных, специально не заданных условиях. Их итоговые механические свойства обобщены в таблице 3. Доказаны высокие значения прочности при сжатии (до 46,67 МПа) и изгибе (до 10,19 МПа). Установлена крайне важная разница в показателях отношения прочности при изгибе и сжатии для исследуемых и традиционных материалов — 1:4 и 1:10 соответственно. Высокий модуль упругости (более 25 ГПа) особенно значим для проектировщиков и инженеров, т.к. определяет способность материала сопротивляться деформациям, то есть прочность и устойчивость строительных конструкций. Составы с наилучшими характеристиками в таблице 3 выделены цветом.

Таблица 3

## Механические свойства композитных материалов после затвердевания в течение 28 дней

Состав	Прочность, МПа		Модуль упругости, ГПа
	на сжатие	на изгиб	
Цементобетон	40,89	4,60	19,24
Неармированный геополимер (ГП)	41,33	4,40	19,32
Фиброгеополимер (ФГП-1)	46,67	8,79	25,01
ФГП-2	45,78	8,60	24,57
ФГП-3	34,67	8,00	20,02
Гибридный фиброгеополимер (ГФГП-1)	46,67	8,39	25,03
ГФГП-2	44,44	10,19	23,49
ГФГП-3	40,44	9,50	20,11

Задачи статики решались методом конечных элементов. Ниже описана последовательность анализа в программной среде Ansys.

1. Задание алгоритма.
2. Указание геометрии.
3. Указание и определение свойств материала (модуль упругости и коэффициент Пуассона).

Для моделирования использовали геополимерную балку с тремя степенями свободы в каждом узле. Она перемещается и упруго деформируется в направлениях  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Модуль упругости бетона:

$$E_c = 5\,000\sqrt{R_{сж.}}, \quad (1)$$

где  $E_c$  — кратковременный статический модуль упругости, МПа;  $R_{сж.}$  — прочность при сжатии, МПа.

Коэффициент Пуассона обычно меньше 0,5. В [15] приводятся значения от 0,18 до 0,24, в [16] называли цифры от 0,23 до 0,32.

Сетчатая разбивка производится на основе геометрии структуры. Визуализация анализа на изгиб в Ansys представлена на рис. 1–11.

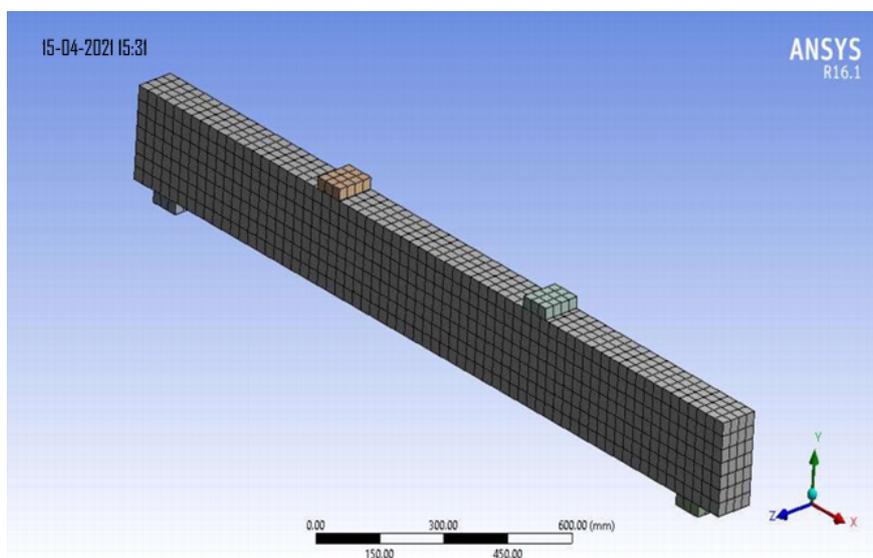


Рис. 1. Дискретизация балки

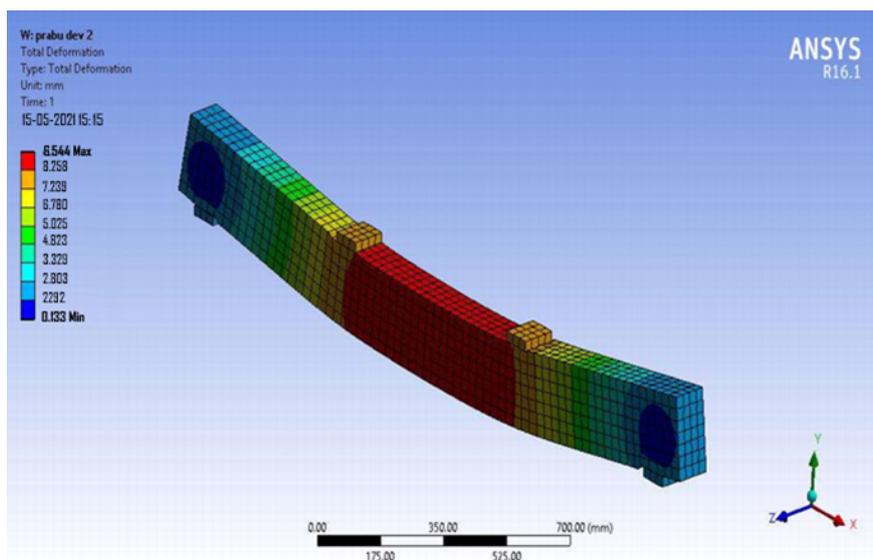


Рис. 2. Деформация балки ФГП-1

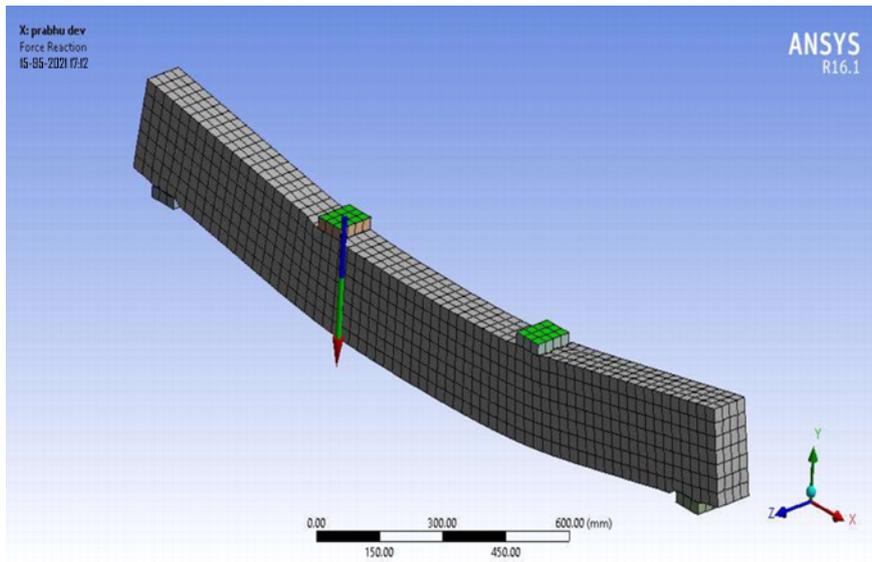


Рис. 3. Прогиб балки ФП-1

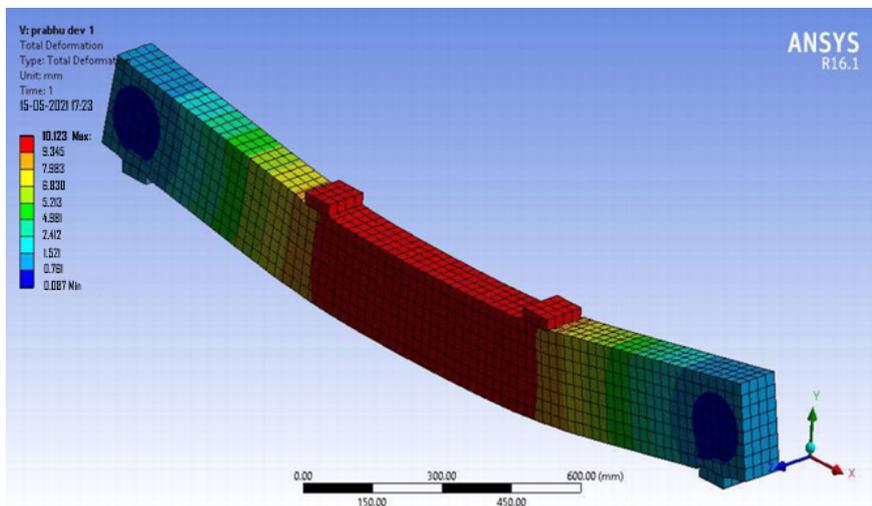


Рис. 4. Деформация балки ГП

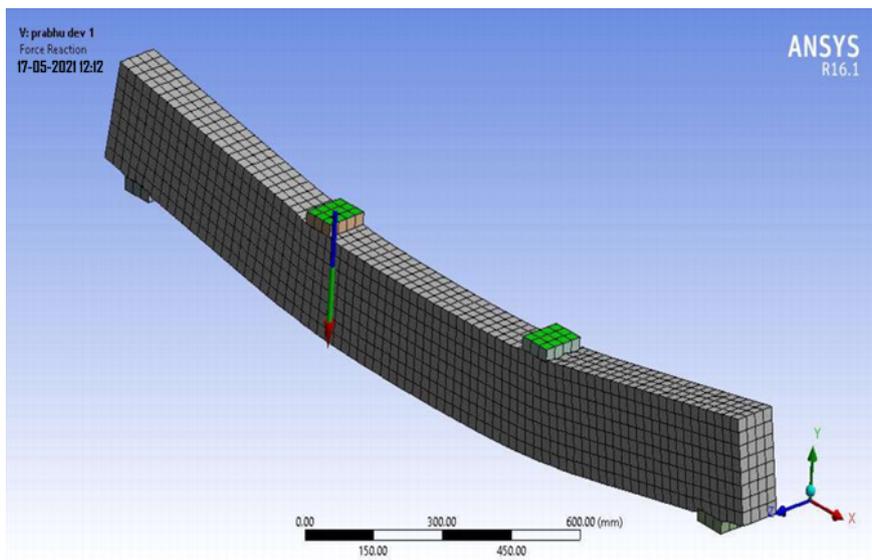


Рис. 5. Прогиб балки ГП

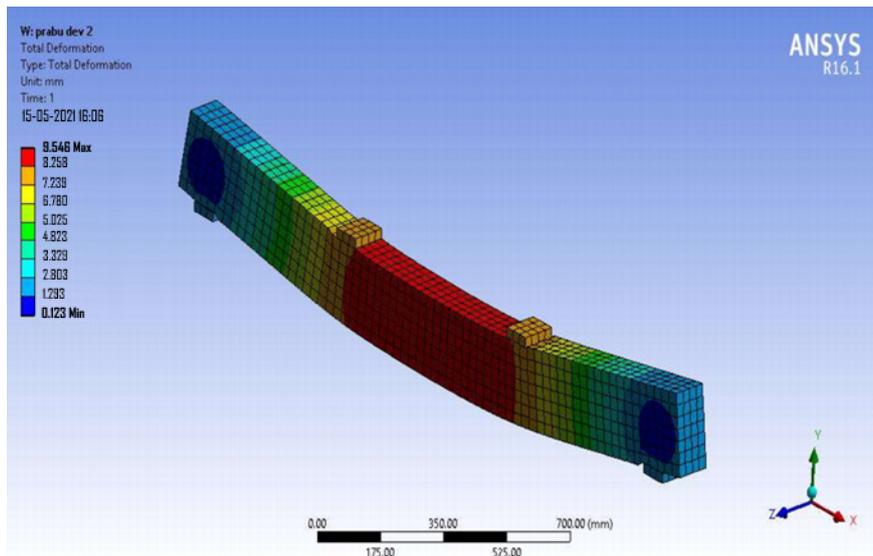


Рис. 6. Деформация балки ГФП-1

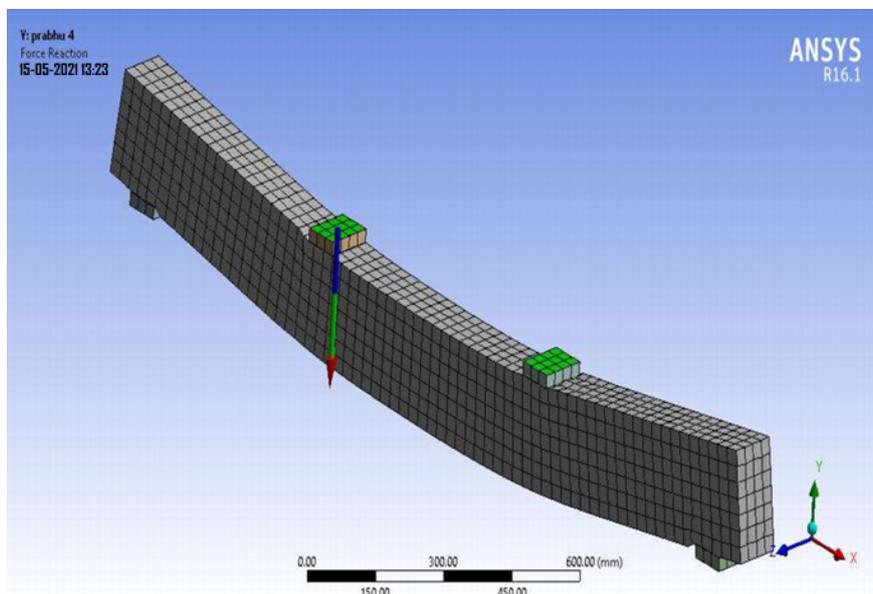


Рис. 7. Прогиб балки ГФП-1

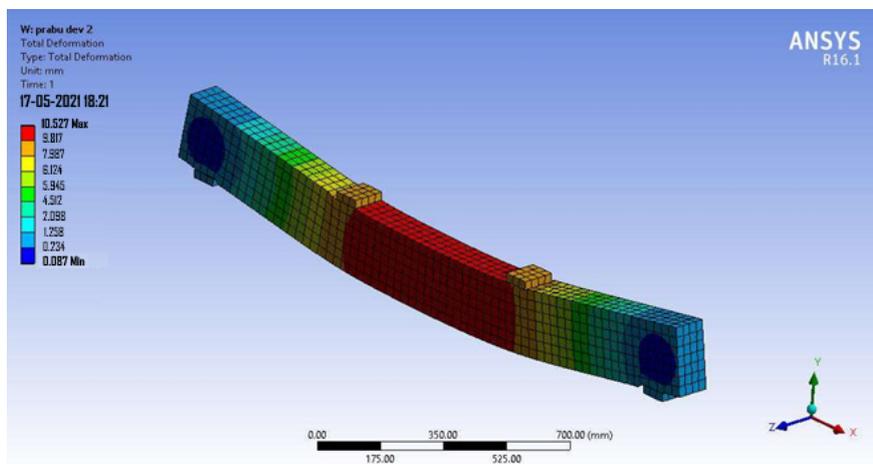


Рис. 8. Деформация балки ГФП-2

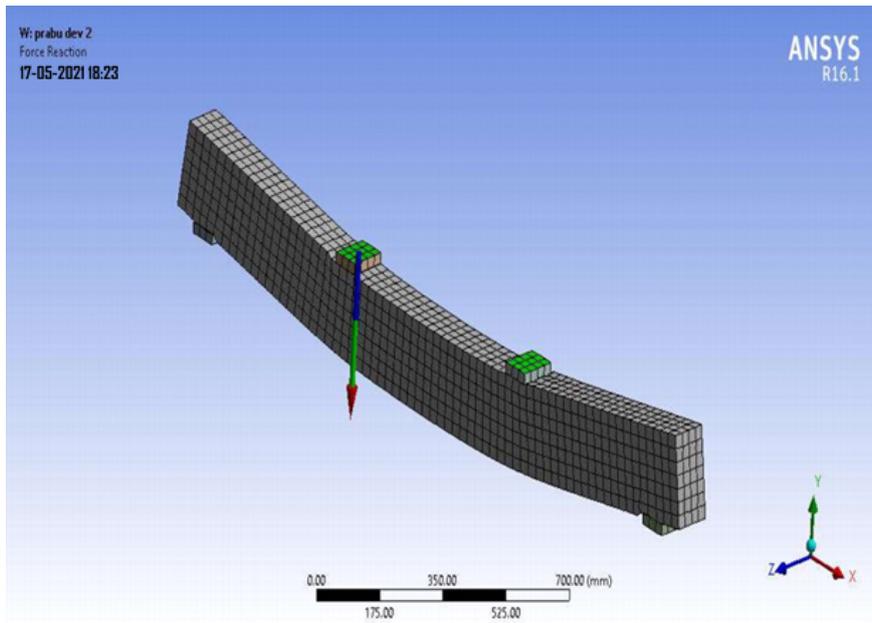


Рис. 9. Прогиб балки ГФП-2

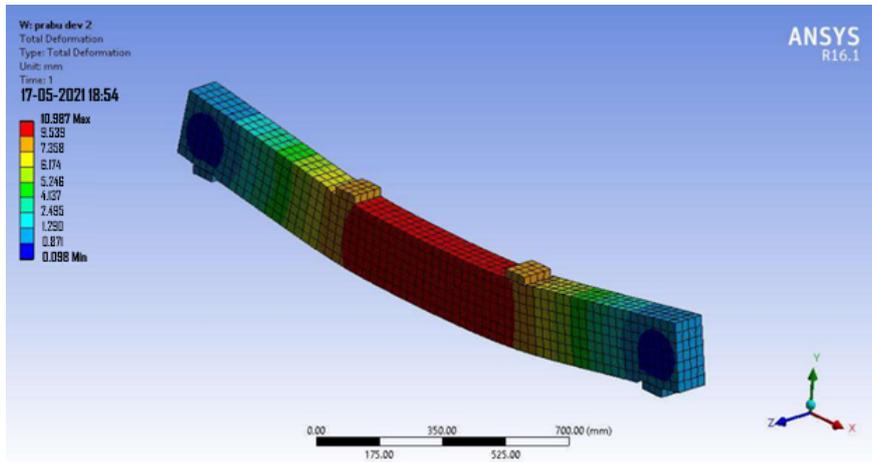


Рис. 10. Деформация балки ГФП-3

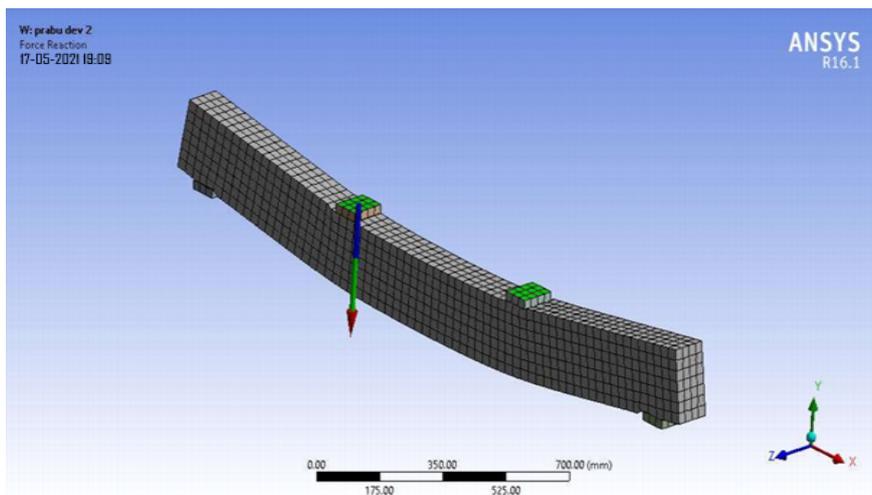


Рис. 11. Прогиб балки ГФП-3

Сравнение экспериментальных и теоретических результатов прогиба приводится в таблицах 4, 5 и на рис. 12–17. Геополимерный бетон — упругопластичный материал, поэтому график «напряжения — деформации» нелинейный.

Таблица 4

Сравнение экспериментальных и теоретических результатов прогиба

Нагрузка, кН	Цементобетон			ГП			ФГП-1			ФГП-2			ФГП-3			ФГП-1(1%)		
	Прогиб, мм		Разница, %	Прогиб, мм		Разница, %	Прогиб, мм		Разница, %	Прогиб, мм		Разница, %	Прогиб, мм		Разница, %	Прогиб, мм		Разница, %
	эксп.	расч.		эксп.	расч.		эксп.	расч.		эксп.	расч.		эксп.	расч.		эксп.	расч.	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0,85	0,65	24	0,74	0,58	22	0,48	0,35	27	0,55	0,43	22	0,70	0,42	40	0,64	0,47	27
10	1,72	1,45	16	1,52	1,58	4	1,28	1,14	11	1,28	0,98	23	1,56	0,95	39	1,44	1,05	27
15	2,45	2,35	4	2,35	2,14	9	1,96	1,56	20	1,84	1,14	38	2,18	1,47	33	2,02	1,87	7
20	2,54	3,05	20	2,96	3,05	3	2,38	2,02	15	2,64	1,45	45	2,89	2,04	29	2,74	2,43	12
25	4,35	3,96	9	3,70	3,65	1	2,96	2,48	16	3,04	2,02	34	3,34	2,90	13	3,64	3,05	16
30	5,04	4,57	9	4,20	4,14	1	3,43	3,05	11	3,78	2,75	27	4,10	3,47	15	3,98	3,85	3
35	6,25	5,43	13	4,75	4,56	4	4,14	3,81	8	4,21	3,24	23	4,98	4,25	15	4,64	4,00	14
38	7,12	6,85	4	5,20	5,10	2	4,97	4,26	14	5,02	3,75	25	5,47	5,07	7	5,08	4,56	10
44	–	–	–	5,35	5,15	4	5,14	4,58	11	5,28	4,33	18	6,76	5,48	19	5,38	4,95	8
50	–	–	–	6,75	5,45	19	5,48	4,97	9	5,58	4,98	11	–	–	–	6,57	5,50	16
52	–	–	–	–	–	–	6,03	5,05	16	6,42	5,52	14	–	–	–	–	–	–
63	–	–	–	–	–	–	6,12	5,55	9	–	–	–	–	–	–	–	–	–

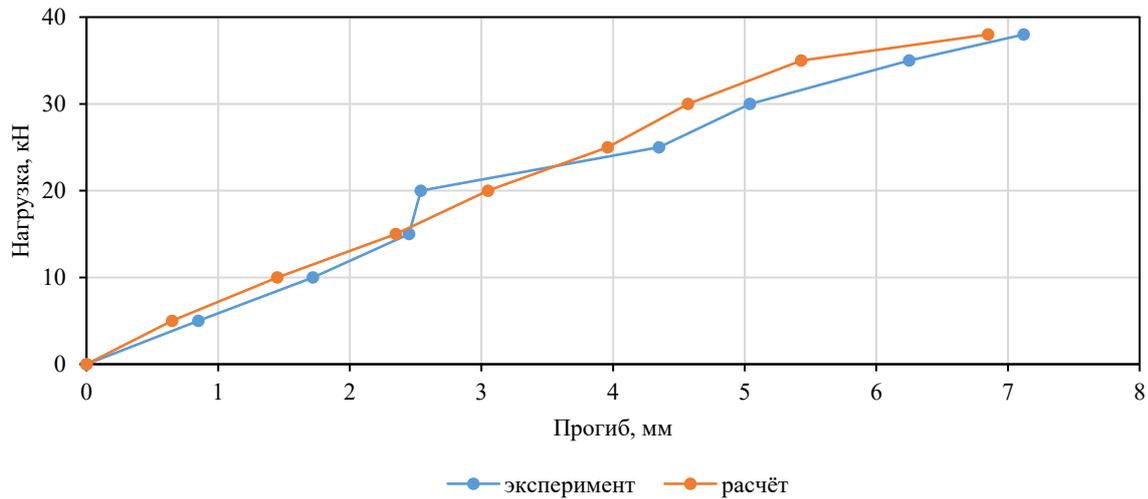


Рис. 12. Прогиб балки из цементобетона

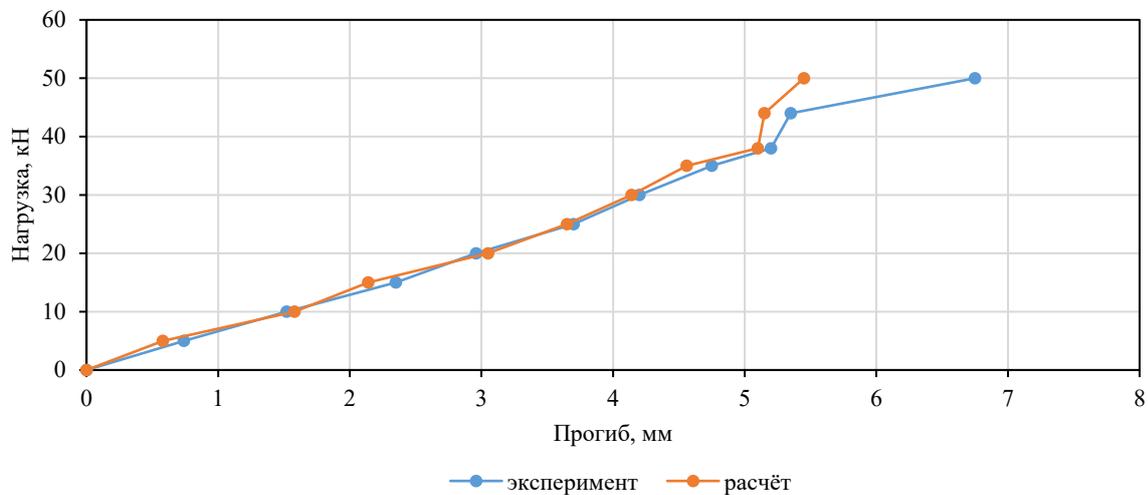


Рис. 13. Прогиб балки ГП

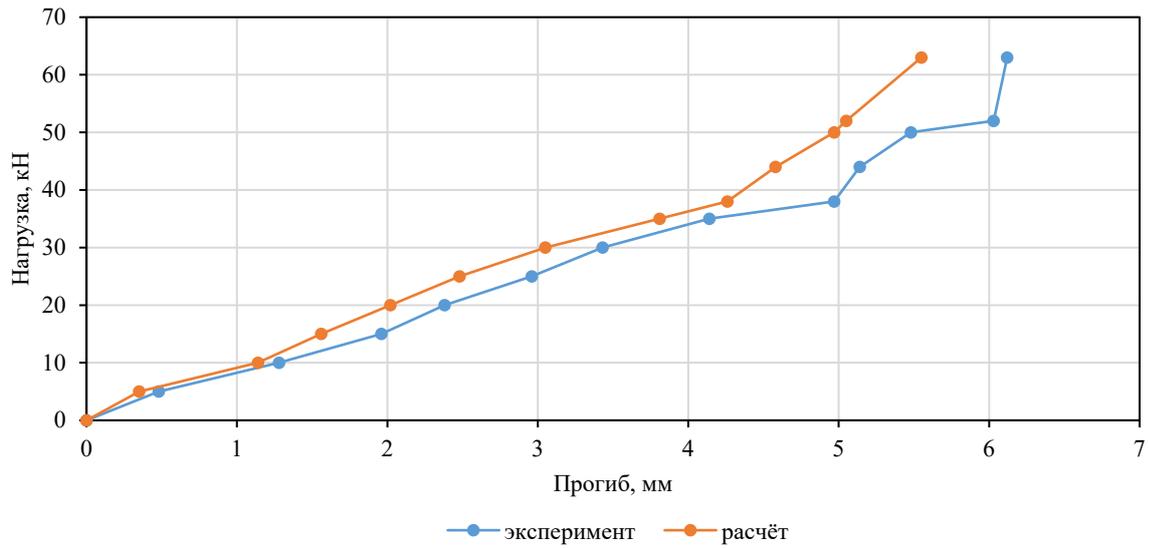


Рис. 14. Прогиб балки ФГП-1

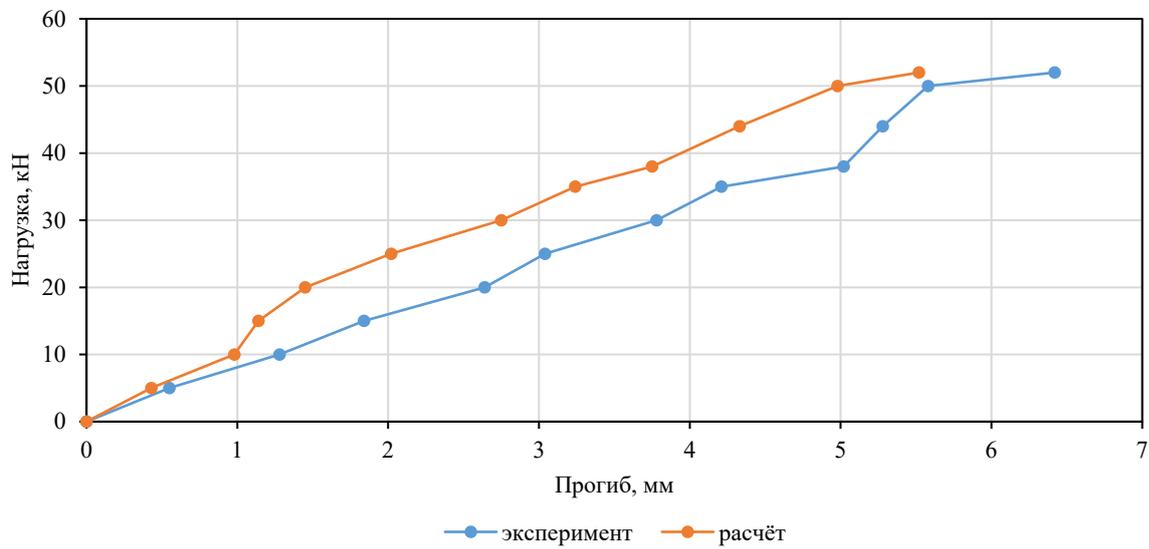


Рис. 15. Прогиб балки ФГП-2

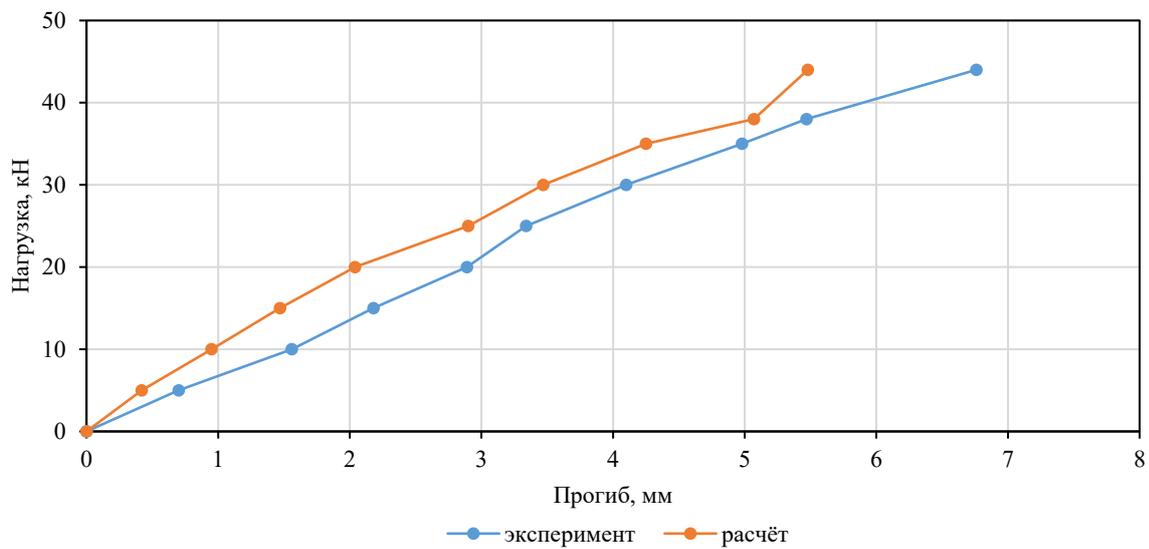


Рис. 16. Прогиб балки ФГП-3

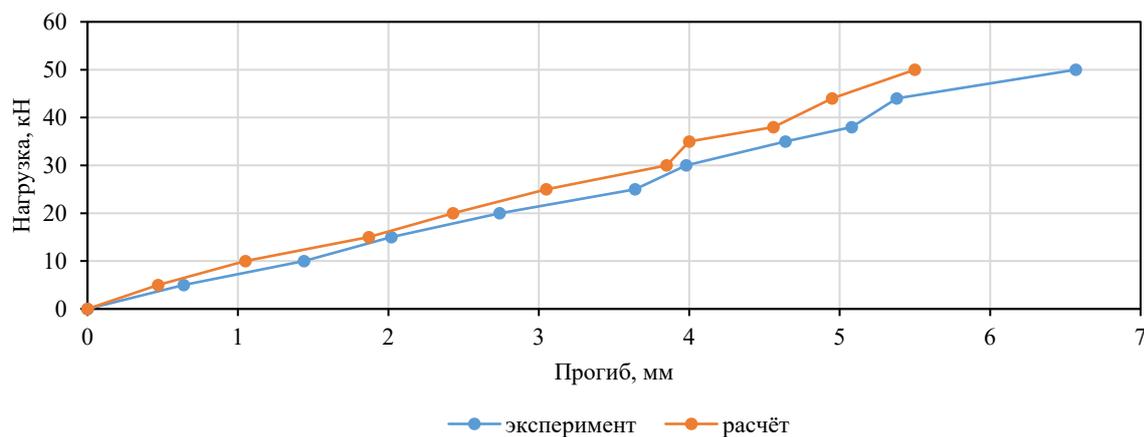


Рис. 17. Прогиб балки ФГП-1 с 1 % фибры из металлокорда

Таблица 5

Сравнение экспериментальных и теоретических результатов прогиба для гибридноармированных фиброгеополимеров

Нагрузка, кН	Прогиб, мм					
	ГФГП-1		ГФГП-2		ГФГП-3	
	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.
0	0	0	0	0	0	0
5	0,26	0,14	0,32	0,18	0,30	0,17
10	0,55	0,37	0,67	0,42	0,58	0,37
15	0,97	0,64	1,18	0,71	1,05	0,82
20	1,28	0,99	1,64	1,07	1,54	1,02
25	1,86	1,14	2,03	1,84	2,07	1,71
30	2,04	1,86	2,85	2,04	2,48	2,10
35	2,74	2,41	3,12	2,26	3,99	2,89
40	3,04	2,74	3,98	3,24	4,29	3,12
45	3,65	3,24	4,26	3,75	4,54	3,92
50	3,98	3,74	5,24	4,36	4,96	4,26
55	4,18	4,08	6,05	5,05	5,02	4,98
63	4,86	4,66	6,14	5,58	5,64	5,21
64	5,26	4,89	–	–	6,03	5,74
70	5,77	5,14	–	–	–	–
72	5,96	5,85	–	–	–	–

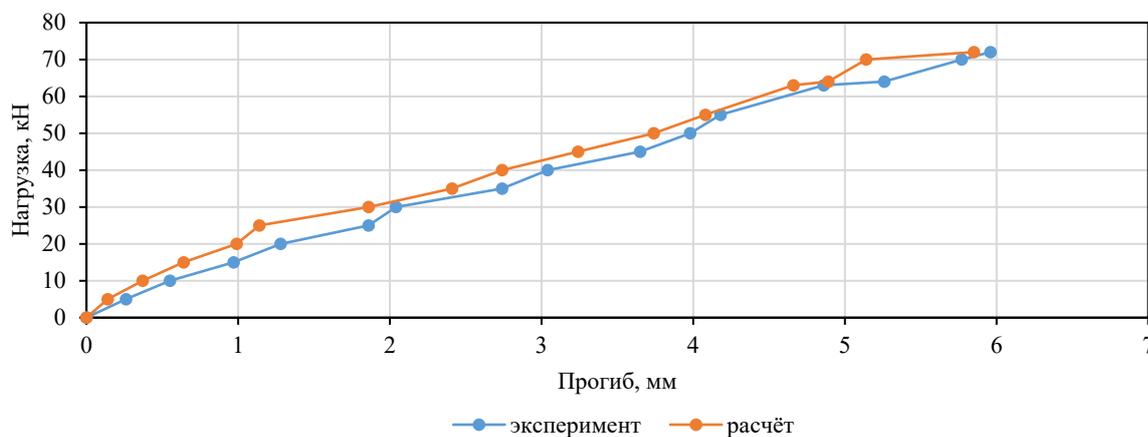


Рис. 18. Прогиб балки ГФГП-1

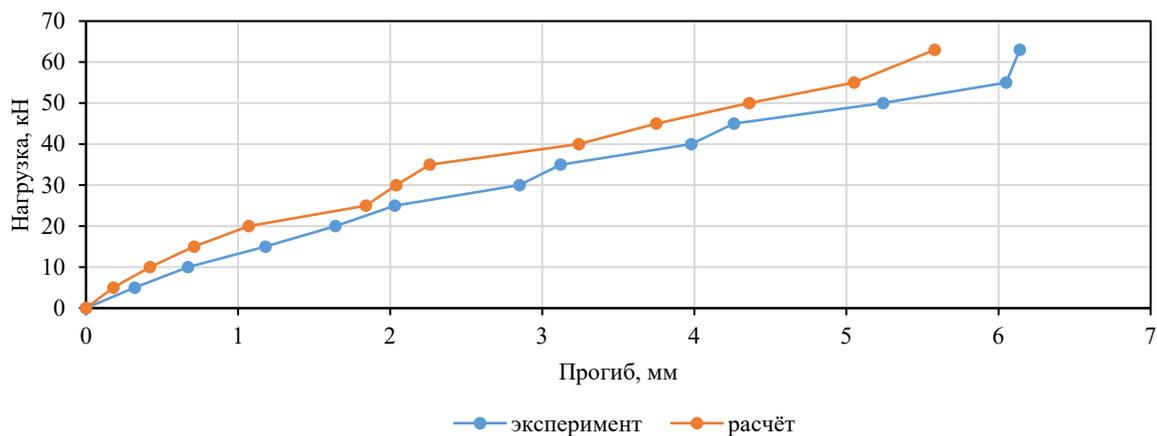


Рис. 19. Прогиб балки ГФГП-2

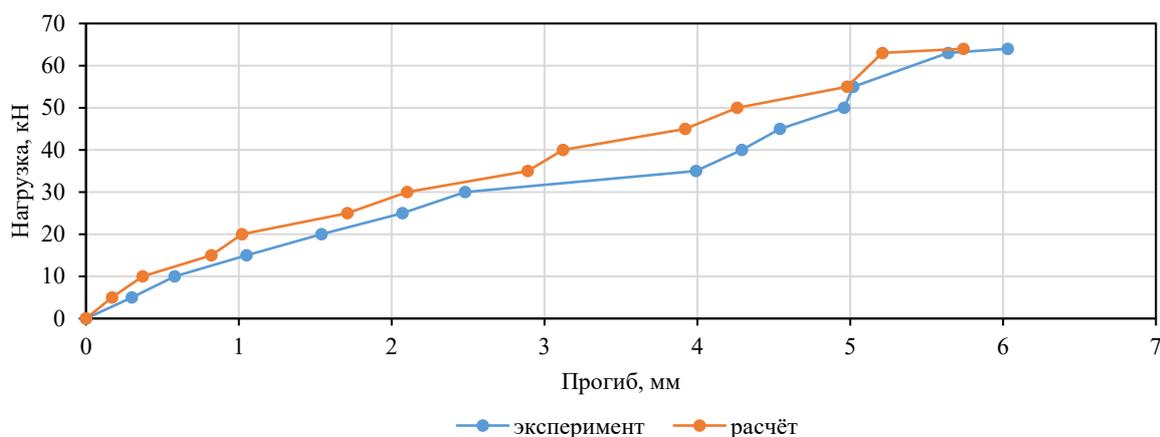


Рис. 20. Прогиб балки ГФГП-3

Таким образом, моделирование методом конечных элементов балок из моноармированных и гибридноармированных фиброгеополимеров показало хорошую сходимость экспериментальных и теоретических результатов, что позволяет эффективно проектировать конструкции из разработанных материалов и прогнозировать их эксплуатационные характеристики.

**Обсуждение.** Самое заметное расхождение между итогами опытов и расчетов (45 %) выявлено для ФГП-2 при нагрузке 20 кН. При 15 кН обнаруженная разница — 38 %. Однако в этом и следующих случаях важно подчеркнуть невысокие абсолютные показатели. При 20 кН теоретически предполагался прогиб 1,45 мм, эксперимент показал 2,64 мм. Соответствующие данные при 15 кН — 1,14 и 1,84. При других нагрузках разница существенно меньше. Для ФГП-3 максимальное расхождение фиксируется на минимальных нагрузках: 40 % при 5 кН и 39 % при 10 кН. Если речь об абсолютных цифрах, то в первом случае расчет — 0,42 мм, эксперимент — 0,70 мм. Во втором случае — 0,95 мм и 1,56 мм соответственно. Для ФГП-1 и ФГП-1 (1 %) максимальное расхождение не превысило 27 %, причем при малых нагрузках. При нагрузках 5 кН теоретически полученный показатель прогиба по ФГП-1 — 0,35 мм, установленный опытным путем — 0,48 мм. Разница — 27 %. При нагрузке 5 кН для ФГП-1 (1 %) расчет показал прогиб 0,47 мм, эксперимент — 0,64 мм. Соответствующие данные для 10 кН — 1,05 и 1,44. Разница в обоих случаях — 27 %. Для других нагрузок — существенно меньше.

Отметим также случаи наилучшей сходимости данных расчетов и опытов. Для ФГП-1 это 8 % (нагрузка — 35 кН), для ФГП-2 — 11 % (50 кН), для ФГП-3 — 7 % (38 кН), для ФГП-1 (1 %) — 3 % (30 кН).

Результаты исследования гибридноармированных фиброгеополимеров позволяют утверждать, что самое значимое расхождение теории и экспериментов фиксируется при минимальных нагрузках (в данном случае — 5 кН). Так, для ФГП-1 это 46,2 % (расчет показал прогиб 0,14 мм, опыт — 0,26 мм). Соответствующая разница для ФГП-2 — 43,8 % (0,18 мм и 0,32 мм), для ФГП-3 — 43,3 % (0,17 и 0,30). При других нагрузках расхождения меньше.

Лучшее соответствие расчетов и итогов опытов для ФГП-1 — 1,85 %. Такой показатель зафиксировали при нагрузке 72 кН (теория — 5,85 мм, эксперимент — 5,96 мм). Наименьшее расхождение, полученное при моделировании прогиба для ФГП-2, — 9,12 % (63 кН, соответственно 5,58 мм и 6,14 мм). Для ФГП-3 — 0,80 % (55 кН, 4,98 мм и 5,02 мм). Как отмечалось выше, следует принимать во внимание крайне незначительные расхождения в абсолютных цифрах. И частные, и обобщенные данные представляют интерес для проектной и инженерной практики. Это подтверждает визуализация результатов работы — кривые на рис. 12–20 во многих случаях схожи или совпадают.

**Заключение.** Получены инновационные компоненты для производства экологически безопасных строительных материалов [17]. Экологичность обусловлена тем, что используется альтернатива цементу [18], и это обеспечивает значительное снижение выбросов парниковых газов. Проектирование гибридноармированных фиброгеополимеров дает возможность получить высокие значения прочности — как при сжатии (от 46 МПа), так и при изгибе (от 10 МПа). При использовании гибридной фибры возможно достичь прочности при изгибе и сжатии на уровне 1:4, и это в несколько раз выше, чем для неармированных портландцементных бетонов [19]. Модуль упругости более 25 ГПа показывает хорошее сопротивление материала деформациям, что положительно влияет на прочность и устойчивость строительных конструкций [20]. Анализ гибридноармированных фиброгеополимерных балок методом конечных элементов подтвердил полученные экспериментальные результаты [21].

Ниже описаны три основных результата научной работы.

1. Получены два вида геополимеров:

– моноармированные (фибра из металлокорда, полипропиленовая фибра и фибра из отходов производства базальтовой ваты — ТВМ);

– гибриднофиброармированные (металлокорд + полипропилен, металлокорд + ТВМ, полипропилен + ТВМ).

2. Фиброармированные геополимербетонные смеси обладают нормативными характеристиками удобоукладываемости, позволяющими эффективно транспортировать их к месту применения и укладывать в опалубку.

3. Моделирование методом конечных элементов балок из моноармированных и гибридноармированных фиброгеополимеров показало хорошую сходимость экспериментальных и теоретических результатов, что позволяет эффективно проектировать конструкции из разработанных материалов и прогнозировать их эксплуатационные характеристики [22].

#### Список литературы / References

1. Laihao Yu, Yingyi Zhang, Zhenghao Zhang, Jialong Yang. Conversion of Recycled Sludge Waste into High Value-Added Ceramics as Engineering Construction Materials: Fabrication, Characterization and Performance Evaluation. *Chemical Engineering Journal*. 2023;475:146509. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146509>
2. Klyuev AV, Kashapov NF, Klyuev SV, Zolotareva SV, Shchekina NA, Shorstova ES, et al. Experimental Studies of the Processes of Structure Formation of Composite Mixtures with Technogenic Mechanoactivated Silica Component. *Construction Materials and Products*. 2023;6(2):5–18. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-2-5-18>
3. Fediuk R, Amran M, Klyuev S, Klyuev A. Increasing the Performance of a Fiber-Reinforced Concrete for Protective Facilities. *Fibers*. 2021;9(11):64. <https://doi.org/10.3390/fib9110064>
4. Bespolitov DV, Konovalova NA, Pankov PP, Shavanov ND. Overburden Recycling in Manufacture of Composite Materials for Road Construction at Mines. *Journal of Mining Science*. 2023;59(1):167–175. <https://doi.org/10.1134/S1062739123010180>
5. Klyuev S, Klyuev A, Fediuk R, Ageeva M, Fomina E, Amran M, et al. Fresh and Mechanical Properties of Low-Cement Mortars for 3D Printing. *Construction and Building Materials*. 2022;338:127644. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127644>
6. Volokitina I, Kolesnikov A, Fediuk R, Klyuev S, Sabitov L, Volokitin A, et al. Study of the Properties of Antifriction Rings under Severe Plastic Deformation. *Materials*. 2022;15(7):2584. <https://doi.org/10.3390/ma15072584>
7. Gilbert Sebastiano Gondokusumo, Akshay Venkateshwaran, Kiang Hwee Tan, GY Richard Liew. Shear Strength and Ductility of Novel Steel Fibre-Reinforced Concrete Dowel Connections for Composite Beams. *Construction and Building Materials*. 2024;447:138159. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138159>
8. Wenjie Ge, Feng Zhang, Yi Wang, Ashraf Ashour, Laiyong Luo, Linfeng Qiu, et al. Machine Learning Predictions for Bending Capacity of ECC-Concrete Composite Beams Hybrid Reinforced with Steel and FRP Bars. *Case Studies in Construction Materials*. 2024;21:e03670. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03670>
9. Klyuev AV, Kashapov NF, Klyuev SV, Lesovik RV, Ageeva MS, Fomina EV, et al. Development of Alkali-Activated Binders Based on Technogenic Fibrous Materials. *Construction Materials and Products*. 2023;6(1):60–73. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-1-60-73>
10. Qi Chen, Xiaoyong Luo, Wangcheng Luo, Zheng Yang, Dan Yang, Xutong Zheng, et al. Seismic Performance of Innovative Precast Concrete Composite Walls with Embedded XPS Insulation Layer. *Engineering Structures*. 2024;316:118605. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118605>
11. Novoselov OG, Sabitov LS, Sibgatullin KE, Sibgatullin ES, Klyuev AS, Klyuev SV, et al. Method for Calculating the Strength of Massive Structural Elements in the General Case of Their Stress-Strain State (Kinematic Method). *Construction Materials and Products*. 2023;6(3):5–17. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-3-5-17>
12. Novoselov OG, Sabitov LS, Sibgatullin KE, Sibgatullin ES, Klyuev AS, Klyuev SV, et al. Method for Calculating the Strength of Massive Structural Elements in the General Case of Their Stress-Strain State (Parametric Equations of the Strength Surface). *Construction Materials and Products*. 2023;6(2):104–120. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-2-104-120>

13. Edlaine Feital Barbosa Motta, Aldo Ribeiro de Carvalho, Júlia Gargiulo Duarte Barra, Indhira Oliveira Maciel, Thaís Mayra de Oliveira. Thermomechanical Behavior of Concretes with Addition of Non-Functionalized and Functionalized Carbon Nanotubes. *Journal of Building Engineering*. 2024;96:110642. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110642>
14. Yuqiang Lin, Wenyong Zheng, Shuhua Liu, Min Yuan, Xi Qin. Multi-Ion Erosion Test and Molecular Dynamics Simulation of Carbon Nanotube Concrete under Stray Current and Salt Brine Environment. *Developments in the Built Environment*. 2024;17:100335. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100335>
15. Ige Samuel Ayeni, Nor Hasanah Abdul Shukur Lim, Mostafa Samad. Engineering Properties of Natural Fibre-Reinforced One-Part Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials*. 2024;456:139161. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139161>
16. Sarici T, Ozcan M. Using Geopolymer Coated and Uncoated Geotextile as a Hybrid Method to Improve Uplift Capacity of Screw Piles in Cohesionless Soil. *Alexandria Engineering Journal*. 2024;105:666–681. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.08.042>
17. Kachurin NM, Stas GV, Prokhorov DO, Gavrina OA. Selection of Technologies and Directions for Reducing the Technogenic Impact of Mineral Formations on the Environment. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024;16(1):283–291. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-1-283-291>
18. Zaalishvili VB, Kambolov DA, Melkov DA, Fidarova MI. Statistical Characteristics Calculation of Seismic Intensity Increments for the Purpose of Seismic Microzoning in Mountain Territories. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024;16(1):345–357. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-1-345-357>
19. Kachurin NM, Prokhorov DO, Stas GV, Gavrina OA. Justification of Technology for Anthropogenic Deposits Development. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024;16(3):833–841. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-833-841>
20. Tyulyaeva Yu, Khayrutdinov A, Galachieva I, Totrukova I. Creation of a High-Strength Backfill Composite Based on Sulfide-Bearing Technogenic Waste from Mining Production. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024;16(3):1384–1396. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-1384-1396>
21. Yazyev SB, Chepurmenko AS. Buckling of Rectangular Plates under Nonlinear Creep. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):257–268. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-257-268>
22. Kondratieva TN, Chepurmenko AS. Prediction of Rheological Parameters of Polymers by Machine Learning Methods. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(1):36–47. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-1-36-47>

#### Об авторах:

**Сергей Васильевич Клюев**, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории ресурсо-энергосберегающих технологий, оборудования и комплексов Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearchGate](#), [klyuyev@yandex.ru](mailto:klyuyev@yandex.ru)

**Александр Васильевич Клюев**, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории ресурсо-энергосберегающих технологий, оборудования и комплексов Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [klyuyevav@yandex.ru](mailto:klyuyevav@yandex.ru)

**Нарман Любович Любов**, кандидат экономических наук, старший научный сотрудник Комплексного научно-исследовательского института им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук (364906, Российская Федерация, г. Грозный, Старопромысловское шоссе, 21 а), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [yrekly@mail.ru](mailto:yrekly@mail.ru)

**Роман Сергеевич Федюк**, доктор технических наук, профессор военного учебного центра при Дальневосточном федеральном университете (690922, Российская Федерация, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearchGate](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [roman44@yandex.ru](mailto:roman44@yandex.ru)

**Елена Владимировна Левкина**, кандидат экономических наук, доцент, начальник отдела по работе с диссертационными советами Дальневосточного федерального университета (690922, Российская Федерация, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [levkina.ev@dvfu.ru](mailto:levkina.ev@dvfu.ru)

#### Заявленный вклад авторов:

**С.В. Клюев:** разработка концепции, написание черновика рукописи.

**А.В. Клюев:** курирование данных, написание черновика рукописи.

**Н.А. Любов:** формальный анализ, написание черновика рукописи.

**Р.С. Федюк:** проведение исследования, написание черновика рукописи.

**Е.В. Левкина:** разработка методологии, написание черновика рукописи.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

***About the Authors:***

**Sergey V. Klyuev**, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Leading Researcher of the Scientific Research Laboratory of Resource and Energy-Saving Technologies, Equipment and Complexes, V.G. Shukhov Belgorod State Technological University (46, Kostyukov Str., Belgorod, 308012, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearchGate](#), [klyuyev@yandex.ru](mailto:klyuyev@yandex.ru)

**Alexander V. Klyuev**, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher of the Scientific Research Laboratory of Resource and Energy-Saving Technologies, Equipment and Complexes, V.G. Shukhov Belgorod State Technological University (46, Kostyukov Str., Belgorod, 308012, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [klyuyevav@yandex.ru](mailto:klyuyevav@yandex.ru)

**Narman A. Ayubov**, Cand.Sci. (Economics), Senior Researcher of the Kh.I. Ibragimov Complex Research Institute, Russian Academy of Sciences (21a, Staropromyslovskoe shosse, Grozny, 364906, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [yrekly@mail.ru](mailto:yrekly@mail.ru)

**Roman S. Fediuk**, Dr.Sci. (Engineering), Professor of the Military Training Center, Far Eastern Federal University (10, Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearchGate](#), [ResearcherID](#), [roman44@yandex.ru](mailto:roman44@yandex.ru)

**Elena V. Levkina**, Cand.Sci. (Economics), Associated Professor, Head of the Department for Work with Dissertation Councils, Far Eastern Federal University (10, Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [levkina.ev@dvfu.ru](mailto:levkina.ev@dvfu.ru)

***Claimed Contributorship:***

**SV Klyuev:** conceptualization, writing – original draft preparation.

**AV Klyuev:** data curation, writing – original draft preparation.

**NA Ayubov:** formal analysis, writing – original draft preparation.

**RS Fediuk:** investigation, writing – original draft preparation.

**EV Levkina:** methodology, writing – original draft preparation.

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

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

**Поступила в редакцию / Received** 20.06.2025

**Поступила после рецензирования / Reviewed** 15.07.2025

**Принята к публикации / Accepted** 28.07.2025

# МЕХАНИКА MECHANICS



УДК 531.132.1

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-186-196>

## Метод оптимального управления экзоскелетом нижних конечностей с упругими элементами

 Д. Диб  , И.В. Меркурьев 

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация

 [delshan2deeb@gmail.com](mailto:delshan2deeb@gmail.com)


EDN: HCPJJV

### Аннотация

**Введение.** Современное развитие экзоскелетов открывает новые горизонты для реабилитации и повышения качества жизни людей с ограниченной подвижностью. Актуальность исследования методов оптимального управления экзоскелетами обусловлена растущим спросом в медицине и промышленности. Однако существует множество проблем, связанных с эффективностью управления экзоскелетами, особенно в контексте интеграции упругих элементов. Темы, связанные с оптимальным управлением и настройкой параметров систем для достижения максимальной эффективности и комфорта пользователя, остаются недостаточно изученными. Целью данного исследования является разработка метода оптимального управления экзоскелетом нижних конечностей (ЭНК) с упругими элементами при оптимизации энергозатрат и учете внешних возмущений.

**Материалы и методы.** ЭНК представлен упрощенной моделью перевернутого маятника с упругими элементами в стопах. Динамическая модель ЭНК разработана с использованием уравнений Лагранжа. Метод оптимального управления основан на синтезе линейно-квадратичного регулятора, ориентированного на минимизацию энергозатрат. Для учета влияния внешних возмущений в контур управления интегрирован фильтр Калмана. Параметры математической модели ЭНК были получены из литературных данных. Моделирование проведено в среде Wolfram Mathematica.

**Результаты исследования.** Разработан метод оптимального управления ЭНК с упругими элементами, который обеспечивает оптимизацию энергозатрат при достижении вертикального метода равновесия. Проведено моделирование системы с использованием оптимального терминального управления, а затем оптимального управления с обратной связью. При управлении с обратной связью были определены ключевые параметры, оказывающие влияние на устойчивость системы: коэффициенты жесткости пружины и демпфирования. Интеграция фильтра Калмана в систему позволила учитывать влияние внешних возмущений.

**Обсуждение.** Применение терминального управления в рамках разработанного метода оптимального управления позволило снизить энергозатраты на 98 % за определенное время стабилизации. Найдены оптимальные значения жесткости пружин и коэффициентов демпфирования для достижения наилучшего отклика системы. Использование метода оптимального управления ЭНК в сочетании с фильтром Калмана подтвердило эффективную компенсацию внешних возмущений и шумов, что обеспечило сходимость переходных процессов при минимальных энергозатратах.

**Заключение.** Предложенный метод достижения оптимального управления при минимизации энергозатрат является перспективным решением в области расчёта управляющих сигналов, необходимых для обеспечения устойчивости и определения оптимальной функции энергозатрат. Это особенно актуально для задач медицинской реабилитации. Данные результаты могут быть полезны для дальнейших исследований и разработок в области робототехники и носимых устройств.

**Ключевые слова:** экзоскелет, математическая модель, упругие элементы, искусственная стопа, оптимальное управление, фильтр Калмана

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры «Робототехника, мехатроника, динамика и прочность машин» НИУ «МЭИ» за поддержку в подготовке данной статьи. Авторы также признательны рецензентам за их конструктивные замечания и рекомендации, которые позволили существенно улучшить представленную работу.

**Для цитирования.** Диб Д., Меркурьев И.В. Метод оптимального управления экзоскелетом нижних конечностей с упругими элементами. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(3):186–196. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-186-196>

*Original Empirical Research*

## **Optimal Control Method for a Lower Limb Exoskeleton with Elastic Elements**

**Delshan Deeb**  , **Igor V. Merkuriev** 

National Research University “MPEI”, Moscow, Russian Federation

 [delshan2deeb@gmail.com](mailto:delshan2deeb@gmail.com)

### **Abstract**

**Introduction.** Modern development of exoskeletons opens new horizons for rehabilitation and improving the quality of life of people with limited mobility. The relevance of the study on methods of optimal control of exoskeletons is due to the growing demand in medicine and industry. However, there are numerous challenges related to the efficient control of exoskeletons, especially in the context of the integration of elastic elements. Topics related to optimal control and tuning of system parameters to reach maximum efficiency and user comfort remain insufficiently studied. The objective of this study is to develop a method of optimal control of a lower limb exoskeleton (LLE) with elastic elements while optimizing energy costs and accounting for external disturbances.

**Materials and Methods.** The LLE is represented by a simplified model of an inverted pendulum with elastic elements in the feet. The dynamic model of the LLE was developed using Lagrange equations. The optimal control method was based on the synthesis of a linear quadratic regulator designed to minimize energy costs. To account for the influence of external disturbances, a Kalman filter was integrated into the control loop. The parameters of the mathematical model of the LLE were obtained from published data. System simulation was performed in the Wolfram Mathematica environment.

**Results.** A method of optimal control of the LLE with elastic elements has been developed. This method optimizes energy costs while maintaining vertical equilibrium. The system was modeled using optimal terminal control, followed by optimal feedback control. During feedback control, key parameters affecting system stability were identified: spring stiffness and damping coefficients. Integration of the Kalman filter enabled compensation for external disturbances.

**Discussion.** The use of terminal control within the developed method reduced energy costs by 98% within a specified stabilization timeframe. Optimal values of spring stiffness and damping coefficients for obtaining the best system response were identified. The use of the optimal control method of the LLE in combination with the Kalman filter confirmed the effective compensation of external disturbances and noise, which provided the convergence of transient processes with minimal energy consumption.

**Conclusion.** The proposed method for achieving optimal control while minimizing energy costs is a promising solution in the field of control signal calculation required to ensure stability and determine the optimal energy cost function. This is especially true for medical rehabilitation tasks. These results may be useful for further research and development in the field of robotics and wearable devices.

**Keywords:** exoskeleton, mathematical model, elastic elements, artificial foot, optimal control, Kalman filter

**Acknowledgements.** The authors would like to thank the staff of the Department of Robotics, Mechatronics, Dynamics, and Strength of Machines, National Research University “MPEI”, for their support in preparing this article. We also thank the reviewers for their constructive comments and recommendations, which significantly improved the quality of the work.

**For Citation.** Delshan D, Merkuriev 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>

**Введение.** Экзоскелеты нижних конечностей (ЭНК) вызывают всё больший интерес, обусловленный необходимостью решения глобальных проблем здравоохранения — старения населения и роста числа нервно-мышечных травм [1]. Эти устройства призваны обеспечить эффективные решения для поддержки и улучшения двигательных функций человека, например, для помощи при ходьбе [2], реабилитации и компенсации потери равновесия [3], тем самым повышая независимость и качество жизни.

ЭНК часто проектируются без упругих элементов из-за возросшей сложности процесса стабилизации во время движения и влияния дополнительных факторов, возникающих при использовании упругих элементов [4]. С другой стороны, для этих экзоскелетов могут требоваться упругие элементы, которые улучшают способность конструкции адаптироваться к неровным поверхностям. Упругие элементы могут быть установлены в области голеностопного сустава [5] или использоваться для его полной замены [6].

Управление ЭНК является сложной задачей. Ранее были предложены различные подходы к её решению. Разработка эффективного метода управления зависит от множества факторов, поддерживая постоянную актуальность исследований в этой области. Для управления ЭНК существуют разные методы: адаптивный метод управления [1, 7], робастные (устойчивые) методы [8, 9] и метод оптимального управления [10, 11]. Несмотря на эффективность первых двух методов, третий является наиболее удачным. Метод оптимального управления учитывает не только повышение устойчивости и эффективности управления ЭНК в динамических и непредсказуемых условиях, но и позволяет снизить энергозатраты и расход ресурсов системы управления [10, 11]. Однако интеграция упругих элементов в стопы ЭНК приводит к усложнению управления ими. Кроме того, учет внешних возмущений при управлении ЭНК сопровождается новыми проблемами в обеспечении динамической устойчивости системы управления ЭНК.

На основании вышеизложенного можно утверждать, что существует необходимость в разработке метода оптимального управления ЭНК с упругими элементами. Поэтому целью данного исследования явилась разработка метода оптимального управления экзоскелетом нижних конечностей и упругими элементами при оптимизации энергозатрат и учете внешних возмущений. Данный метод позволяет минимизировать квадратичную функцию энергозатрат при наличии упругих элементов и внешних возмущений.

Одним из факторов, еще больше усложняющих решение вопроса динамической устойчивости ЭНК, является наличие белого шума, который представляет собой помеху управляющему сигналу [12], который был исследован в данной работе.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- разработка математической модели перевернутого маятника с упругими элементами в стопах;
- разработка метода оптимального управления ЭНК с упругими элементами;
- учет влияния внешних возмущений (гауссовского белого шума);
- проведение численного моделирования в среде Wolfram Mathematica для двух типов управлений: терминальное управление и управление с обратной связью;
- анализ полученных результатов исследования переходных процессов основных параметров динамики ЭНК с упругими элементами.

**Материалы.** С целью разработки математической модели ЭНК с упругими элементами в стопах рассматривается его кинематическая схема. Стопа представлена упругими элементами и соединена с моделью по типу перевернутого маятника (рис. 1). Модель включает инерционные свойства, кинематические ограничения суставов и внешние силы, действующие на систему.

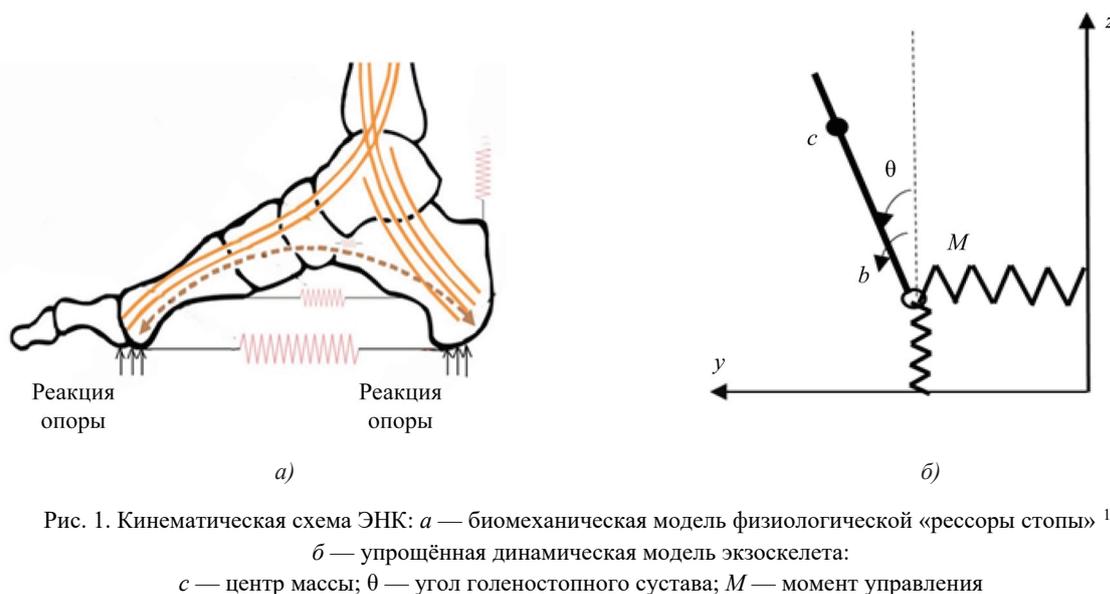


Рис. 1. Кинематическая схема ЭНК: *а* — биомеханическая модель физиологической «рессоры стопы»<sup>1</sup>; *б* — упрощённая динамическая модель экзоскелета:  
*с* — центр массы;  $\theta$  — угол голеностопного сустава; *M* — момент управления

<sup>1</sup> Субботин Ф. Биомеханика стопы. Часть 1. Школа Фиделя Субботина; 2024. URL: <https://fs-school.ru/blog/988624> (дата обращения: 10.05.2025).

Характеристики упругих элементов и параметры модели следующие:  $k_y, k_z$  — коэффициенты жёсткости горизонтальной и вертикальной пружин, соответственно. Их значения —  $k_y \in [500, 1\,500]$  Н/м [13],  $k_z \in [7\,000, 20\,000]$  Н/м [14].  $c_y, c_z$  — коэффициенты горизонтального и вертикального демпфирования, соответственно,  $c_y \in [30, 200]$  Н·с/м,  $c_z \in [500-2\,000]$  Н·с/м [15].  $J_c = \frac{1}{3} m h^2$  — момент инерции экзоскелета относительно центра масс, кг·м<sup>2</sup>;  $m = 70$  — масса экзоскелета с пациентом, кг;  $h = 1$  — длина экзоскелета до центра масс, м;  $\mu_y = 0,7$  и  $\mu_z = 0$  — коэффициенты трения;  $N_y = 0$  и  $N_z = m g$  — нормальные силы, Н;  $g = 9,8$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

**Методы.** Динамика ЭНК описывается уравнениями Лагранжа второго рода в общем виде<sup>2</sup>:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i, \quad (i = 1, \dots, 3), \quad (1)$$

где  $L = T - V$  — функция Лагранжа;  $T$  — кинетическая энергия системы;  $V$  — потенциальная энергия системы;  $Q$  — обобщенные силы;  $q = (\theta, y_b, z_b)^T$  — вектор обобщенных координат;  $\theta$  — угол поворота звена экзоскелета, отсчитываемый от горизонтальной поверхности (параллельной опорной плоскости) в направлении против часовой стрелки;  $y_b, z_b$  — горизонтальное и вертикальное перемещение основания.

Координаты центра масс маятника определяются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} y_c &= y_b + h \sin \theta; \\ z_c &= z_b + h \cos \theta. \end{aligned} \quad (2)$$

Кинетическая энергия маятника задается по формуле:

$$T = \frac{1}{2} m v_c^2 + \frac{1}{2} J_c \dot{\theta}^2, \quad (3)$$

где  $v$  — скорость центр масс, равен  $\dot{y}_c^2 + \dot{z}_c^2 = (\dot{y}_b + h \cos \theta \dot{\theta})^2 + (\dot{z}_b + h \sin \theta \dot{\theta})^2$ .

Потенциальная энергия систем описывается следующим уравнением:

$$V = mgz_c + \frac{1}{2} k_z z_b^2 + \frac{1}{2} k_y y_b^2. \quad (4)$$

Обобщенные силы демпфирования, применяемые с помощью функции диссипации Рэля для моделирования линейного демпфирования, записываются в виде [15]:

$$Q_i^{\text{diss}} = -\frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i}; \quad D = \frac{1}{2} c_y \dot{y}_b^2 + \frac{1}{2} c_z \dot{z}_b^2. \quad (5)$$

Модель трения Кулона задаётся следующими уравнениями [15]:

$$\begin{aligned} Q_y^{\text{mp}} &= -\mu_y N_y \tanh(\alpha \dot{y}_b); \\ Q_z^{\text{mp}} &= -\mu_z N_z \tanh(\alpha \dot{z}_b), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\alpha \gg 1$  — параметр регуляризации (для аппроксимации разрывной функции  $\text{sign}(v)$ ), в данной работе выбран  $\alpha = 100$ .

После промежуточных вычислений, уравнения (2–6) принимают вид:

$$\begin{aligned} (mh^2 + J_c) \ddot{\theta} + mh \cos(\theta) \dot{y}_b - mh \sin(\theta) \dot{z}_b - mgh \sin(\theta) &= M; \\ m \dot{y}_b + mh \cos(\theta) \ddot{\theta} - mh \sin(\theta) \dot{\theta}^2 + k_y y_b &= -c_y \dot{y}_b - \mu_y N_y \tanh(\alpha \dot{y}_b) + F_y^{\text{ext}}; \\ m \dot{z}_b - mh \sin(\theta) \ddot{\theta} - mh \cos(\theta) \dot{\theta}^2 + k_z z_b &= -c_z \dot{z}_b - \mu_z N_z \tanh(\alpha \dot{z}_b) - mg + F_z^{\text{ext}}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $M, F_y^{\text{ext}}, F_z^{\text{ext}}$  — внешние обобщенные силы.

В окрестности вертикального равновесия ( $\theta \approx 0$ ) справедливы допущения:  $\sin \theta \approx \theta$ ,  $\cos \theta = 1$ ,  $z_b \approx -mg/k_z$ . Уравнения (7) линеаризуются с учетом малости ( $\theta^2, \dot{\theta}^2 \approx 0$  и  $\tanh(\alpha \dot{y}_b) \approx \alpha \dot{y}_b$  при малых скоростях:

$$\begin{aligned} (mh^2 + J_c) \ddot{\theta} + mh \dot{y}_b - mgh \theta &= M; \\ m \dot{y}_b + mh \ddot{\theta} + k_y y_b &= -c_y \dot{y}_b - \mu_y N_y \alpha \dot{y}_b + F_y^{\text{ext}}; \\ m \dot{z}_b + k_z z_b &= -c_z \dot{z}_b - \mu_z N_z \alpha \dot{z}_b + F_z^{\text{ext}}. \end{aligned} \quad (8)$$

При предположении о малых углах вертикальное перемещение  $z$  становится динамически независимым от горизонтального  $y$  и углового  $\theta$  состояний. Его поведение сводится к гармоническому осциллятору, который может анализироваться отдельно [12].

<sup>2</sup> Lynch KM, Park FC. Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control: Video Supplements and Software. Cambridge University Press; 2017. URL: [http://hades.mech.northwestern.edu/index.php/Modern\\_Robotics](http://hades.mech.northwestern.edu/index.php/Modern_Robotics) (accessed: 10.05.2025).

Для синтеза управления представим систему в канонической форме пространства состояний с учетом внешних возмущений и шумов измерений. Задав вектор состояния  $[x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [\theta, \dot{\theta}, y, \dot{y}]^T$ , запишем систему в форме Коши:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Dw(t); \\ y(t) &= Cx(t) + v(t), \end{aligned} \quad (9)$$

где  $A$  — матрица состояния;  $B$  — матрица управления;  $u(t)$  — вектор управляющих сигналов;  $D$  — матрица возмущений;  $w(t)$  — вектор внешних возмущений;  $C$  — матрица измерений;  $v(t)$  — вектор внешних возмущений.

Основная задача регулятора заключается в переводе динамической системы из начального состояния  $x(t_0)$  в заданное конечное состояние  $x(t_1)$  за определенное время  $t_1$ .

Грамиан управляемости  $W$  характеризует способность системы достигать произвольных состояний за конечное время  $T$  и определяется по формуле [12]:

$$W(t_1, t_0) = \int_{t_0}^{t_1} \Phi(t_0, t) B(t) B^T(t) \Phi^T(t_0, t) dt, \quad (10)$$

где  $\Phi(t_0, t) = e^{A(t_0-t)}$  — матричная экспонента.

Система является полностью управляемой на  $[t_0, t_1]$  тогда и только тогда, когда  $W(t_1, t_0)$  обратима. Если Грамиан обратим, любое состояние  $x_T \in \mathbb{R}^n$  может быть достигнуто с помощью соответствующего управления  $u(t)$  [12].

Управление, которое минимизирует квадратичную функцию энергозатрат и переводит систему из состояния  $x(t_0)$  в состояние  $x(t_1)$ , имеет вид [12]:

$$u(t) = -B^T(t) \Phi^T(t_1, t) W^{-1}(t_1, t_0) [x(t_0) - \Phi(t_0, t_1)x(t_1)]. \quad (11)$$

После промежуточных вычислений квадратичную функцию энергозатрат можно рассчитать с помощью выражения (12):

$$J_{min} = [x(t_0) - \Phi(t_0, t_1)x(t_1)]^T W^{-1}(t_1, t_0) [x(t_0) - \Phi(t_0, t_1)x(t_1)]. \quad (12)$$

Управление, заданное уравнением (11), является программным (разомкнутым) и зависит от времени. Для обеспечения асимптотической стабилизации системы в начало координат при произвольных начальных условиях необходим синтез закона управления замкнутого контура, основанного на обратной связи по состоянию в реальном времени. Задача управления формулируется в виде минимизации квадратичной функции энергозатрат [12]:

$$J = \int_0^{\infty} [x^T(t) Q x(t) + x^T(t) R x(t)] dt. \quad (13)$$

где  $R$  — положительно определенная матрица;  $Q$  — положительно полуопределенная матрица.

Оптимальное управление, обеспечивающее минимизацию энергозатрат, может быть реализовано в виде отрицательной обратной связи с переменными параметрами:

$$u(t) = -k(t)x(t), \quad (14)$$

где  $k(t) = R^{-1}B^T P(t)$ ;  $k(t)$  — матрица коэффициента обратной связи;  $P(t)$  — решение уравнения Риккати.

Для нахождения  $P(t)$  при  $t \rightarrow \infty$  необходимо решить алгебраическое уравнение Риккати, которое задается следующим образом:

$$-A^T P - PA + PBR^{-1}B^T P - Q = 0, \quad (15)$$

Система с управляющим сигналом  $u(t)$  описывается уравнением:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) - BKx(t) = [A - BK]x(t). \quad (16)$$

На практике измерение всех состояний невозможно из-за ограниченного числа датчиков, шумов и погрешностей измерений [12]. Для оценки вектора состояния по входам и выходам используется оптимальный фильтр Калмана.

Система с управляющим сигналом  $u(t)$  и фильтр Калмана для определения вектора состояния имеет следующий вид [12]:

$$\frac{d}{dt} \hat{x}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L[y(t) - C\hat{x}(t)], \quad (17)$$

где  $\hat{x}$  — оценочное состояние;  $C\hat{x}$  — выход наблюдателя;  $L$  — матрица усиления Калмана.

При наличии внешних возмущений  $w(t)$  и шума измерений  $v(t)$  с нулевыми математическими ожиданиями  $M[v(t)] = 0$ ,  $M[w(t)] = 0$  и ковариационными матрицами  $S_w$  и  $S_v$ , соответственно, матрица коэффициента усиления  $L$  определяется из решения алгебраического уравнения Риккати (18) и соответственно найдется стационарный фильтр Калмана:

$$\begin{aligned} AP_x + P_x A^T - P_x C^T S_v^{-1} C P_x + D S_w D^t &= 0; \\ L &= P_x C^T S_v^{-1}. \end{aligned} \quad (18)$$

Управление линейной нестационарной системой при внешних возмущениях на входе и выходе реализуется с помощью линейной обратной связи по оценке состояния:

$$u(t) = -k(t)\hat{x}(t). \tag{19}$$

Вид замкнутой системы с обратной связью по оценке вектора состояния определяется формулой:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x \\ \hat{x} \end{pmatrix}_{2n \times 1} = \begin{pmatrix} A - BK & BK \\ 0 & A - LC \end{pmatrix}_{2n \times 2n} \begin{pmatrix} x \\ \hat{x} \end{pmatrix}_{2n \times 1} + \begin{pmatrix} D & w \\ L & y \end{pmatrix}. \tag{20}$$

После разработки метода оптимального управления ЭНК с упругими элементами и учетом влияния внешних возмущений остается произведение численного моделирования и анализ полученных результатов исследования переходных процессов по углу отклонения и смещению. Для достижения этого на первом этапе метод оптимального управления сфокусировали на восстановлении равновесия за определенное время стабилизации без учёта промежуточной траектории движения. На втором этапе метод оптимального управления с обратной связью был применен для поиска оптимальной промежуточной траектории движения как с применением фильтра Калмана, так и без него.

**Результаты исследования.** В работе были исследованы переходные процессы управляющего момента, силы, смещения и угла при переходе ЭНК с упругими элементами из неустойчивого положения в положение вертикального равновесия. Результаты численного моделирования приведены на рис. 2–6 при трех начальных условиях:  $Y_1 = [1/10, 0, 0, 0]$ ,  $Y_2 = [1/10, 0, 1/10, 0]$ ,  $Y_3 = [1/10, 0, 1/10, 0, 0, 1/10, 0, 1/20, 0]$ .

Результаты терминального управления рассчитаны для времени стабилизации 0,6 с. На рис. 2 представлены кривые управляющих моментов разомкнутой системы при начальных условиях  $Y_1$  и целевом положении в состоянии вертикального равновесия. Синяя кривая соответствует управляющему моменту  $M$ , оранжевая — управляющей силе  $F_y$ .

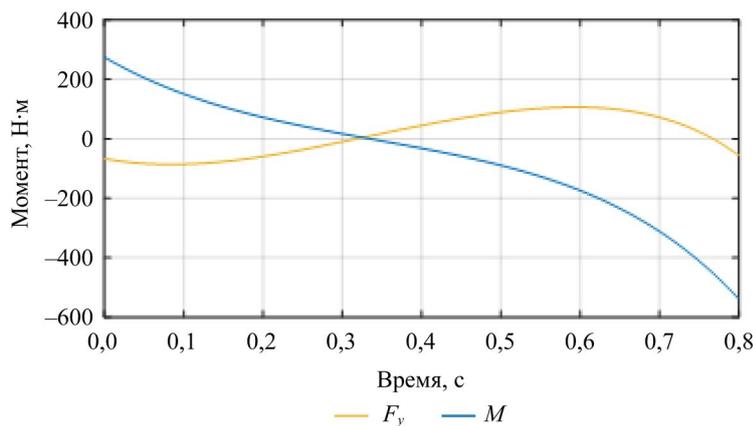


Рис. 2. Кривые управляющих сигналов разомкнутой системы

Значения квадратичной функции энергозатрат при терминальном управлении для различных значений времени стабилизации рассчитаны по уравнению (12) и представлены в таблице 1. Можно заметить снижение значения функции энергозатрат при увеличении времени стабилизации.

Таблица 1

Значения квадратичной функции энергозатрат

Время стабилизации, с	0,1	0,2	0,3	0,4
Значение квадратичной функции энергозатрат (J)	1 648,8	212,1	66,1	29,9

На рис. 3 представлены кривые переходных процессов основных параметров динамической системы ЭНК ( $\theta, y_b$ ) при начальных условиях  $Y_1$ . Синяя кривая представляет собой переходный процесс угла отклонения  $\theta$ , а оранжевая — изменение координаты по оси ординат  $y_b$  в течение заданного времени стабилизации 0,6 с при терминальном управлении.

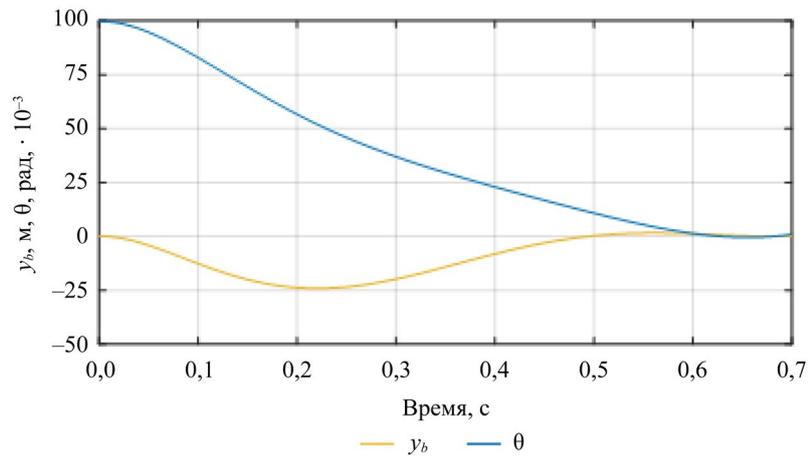


Рис. 3. Кривые переходного процесса

Результаты моделирования на рис. 4–6 получены с применением типа управления с обратной связью, которое позволяет провести поиск оптимальной промежуточной траектории движения. Для исследования влияния жесткости упругих элементов (изменения коэффициента жесткости пружины  $k_y$ ) на устойчивость динамической системы ЭНК при минимизации энергозатрат были рассмотрены переходные процессы основных параметров динамической системы ЭНК (рис. 4) при начальных условиях  $Y_2$  и следующих параметрах системы с обратной связью:  $c_y = 100$ ,  $k_z = 20\,000$ ,  $Q = \text{eye}(4) \cdot 10^3$ ,  $R = \text{eye}(2)$ .

Оранжевая линия представляет собой зависимость  $y_b$ , а зеленая линия —  $\theta$ . Значения коэффициента жесткости были выбраны следующие:  $k_y = [700, 1\,000, 1\,500]$  Н/м. Переходные процессы представлены соответственно на рис. 4 а, б, в.

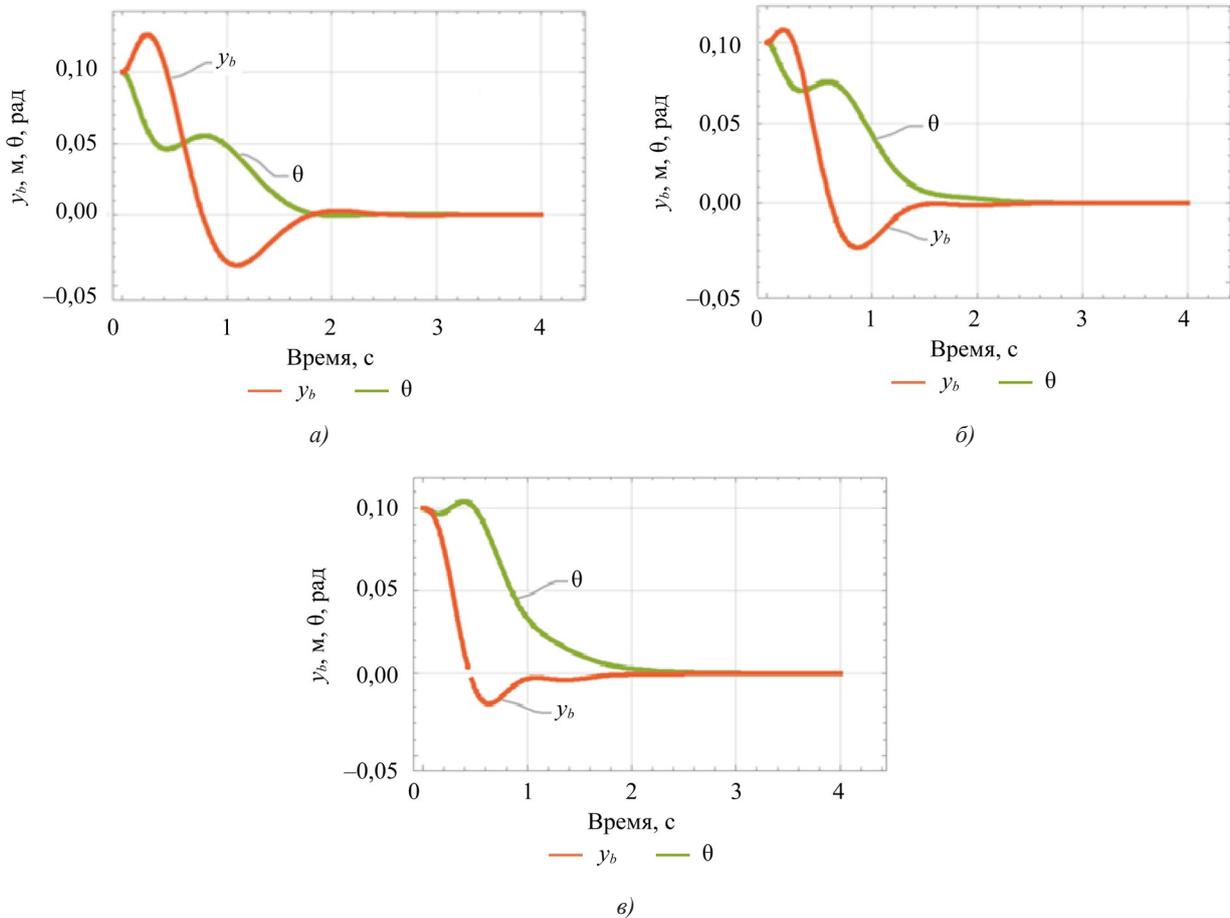


Рис. 4. Переходные процессы при изменении коэффициента жесткости пружины:  
 а — при  $k_y = 700$  и  $c_y = 100$ ; б — при  $k_y = 1\,000$  и  $c_y = 100$ ; в — при  $k_y = 1\,500$  и  $c_y = 100$

Для исследования влияния демпфирования упругих элементов (изменения коэффициента демпфирования  $c_y$ ) на устойчивость динамической системы ЭНК при минимизации энергозатрат были рассмотрены переходные процессы основных параметров динамической системы ЭНК ( $\theta, y_b$ ) (рис. 5) при начальных условиях  $Y_2$  и  $k_y = 1\ 000$  с обратной связью. Оранжевая линия представляет собой зависимость  $y_b$ , а зеленая линия —  $\theta$ . Значения коэффициента демпфирования составляют  $c_y = [0, 50, 100]$  Н·с/м, а переходные процессы изображены соответственно на рис. 5 а, б и в.

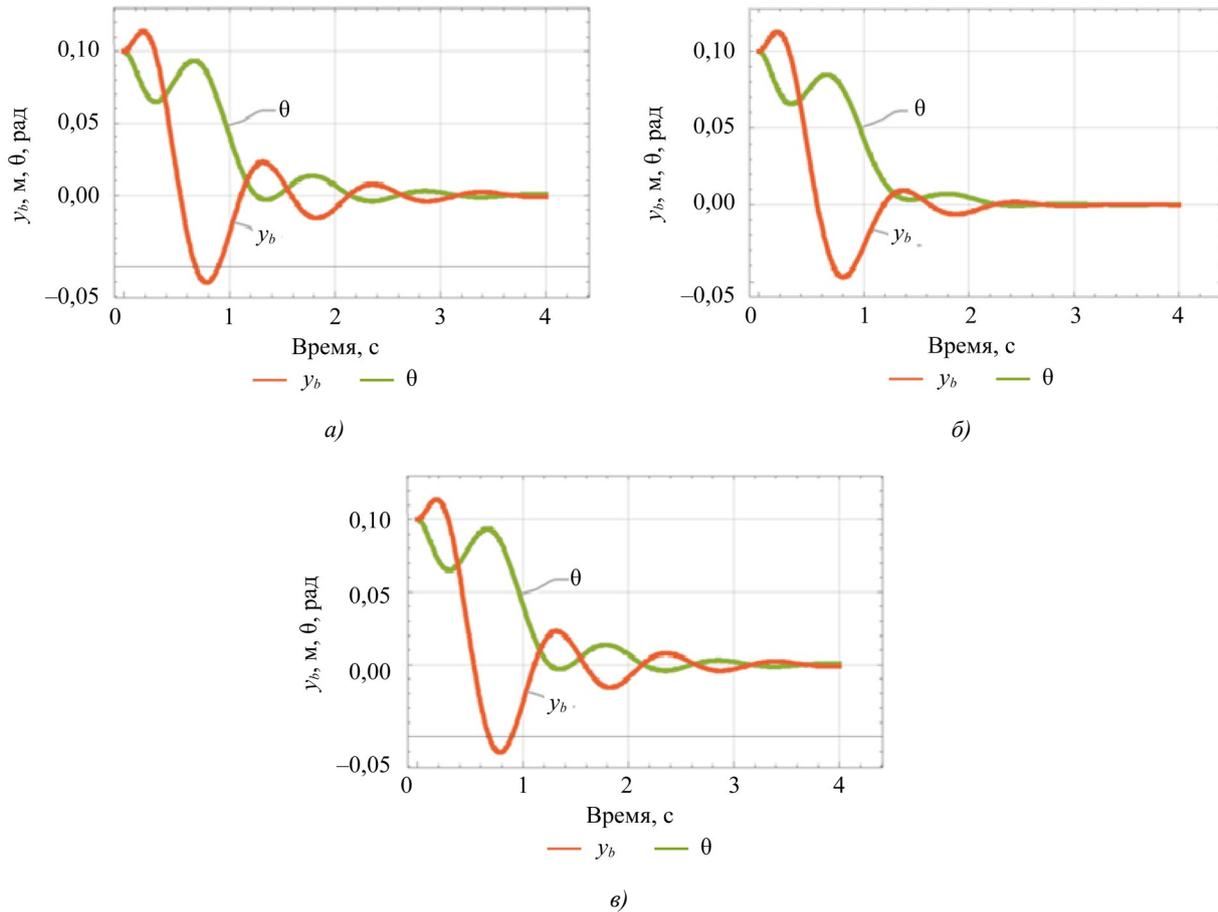


Рис. 5. Переходные процессы изменении коэффициента демпфирования: а — при  $c_y = 0$  и  $k_y = 1\ 000$ ; б — при  $c_y = 50$  и  $k_y = 1\ 000$ ; в — при  $c_y = 100$  и  $k_y = 1\ 000$

Это исследование также учитывает влияние шума путем добавления фильтра Калмана. На рис. 6 показаны кривые переходного процесса при начальных условиях  $Y_3 = [1/10\ 0\ 1/10\ 0\ 0\ 1/10\ 0\ 1/20\ 0]$  и ковариационные матрицы  $s_w = eye(1)$  и  $s_v = 0,1\ eye(2)$ . Оранжевая линия иллюстрирует переходный процесс  $y_b$ , а зеленая линия — переходный процесс  $\theta$ .

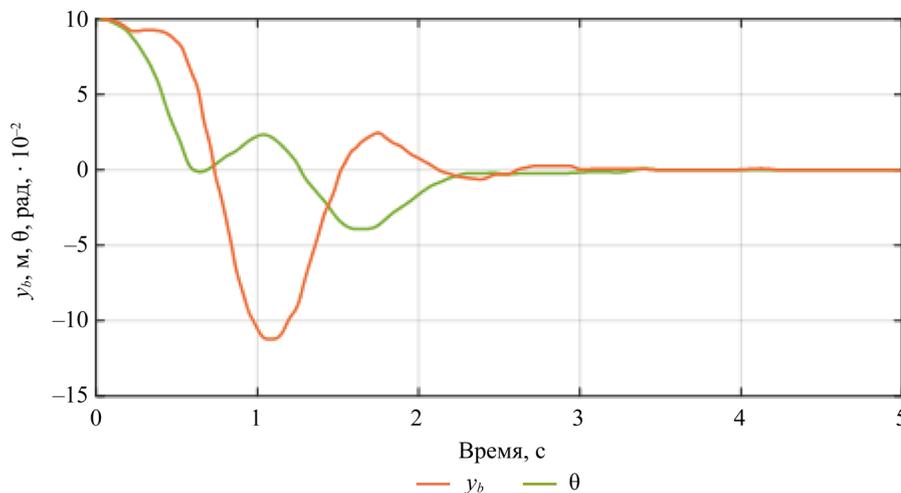


Рис. 6. Кривые переходного процесса с использованием фильтра Калмана

**Обсуждение.** Для достижения цели исследования в предыдущем разделе были представлены результаты моделирования, полученные с использованием предложенного метода оптимального управления для минимизации энергозатрат при переходе исследуемого ЭНК из неустойчивого положения в вертикальное положение равновесия.

Из таблицы 1 видно, что по мере увеличения времени, необходимого для достижения целевого устойчивого состояния, энергозатраты пропорционально уменьшаются. Данная зависимость согласуется с динамикой управляющих сигналов: с увеличением допустимого времени стабилизации амплитуды управляющих моментов  $M$  и  $F_y$  уменьшаются, что, согласно формулам (12)–(14), снижает значения энергозатрат. При этом можно сделать вывод о том, что увеличение времени стабилизации (в пределах 0,1–0,4 секунды) снижает энергозатраты на 98 %.

Кривые на рис. 3 демонстрируют переходный процесс длительностью 0,6 с до достижения положения вертикального равновесия, что согласуется с принципами терминального управления (достижение целевого устойчивого состояния за определенное время стабилизации).

Кривые на рис. 4 иллюстрируют влияние изменения коэффициента жесткости на переходные процессы основных параметров динамической системы ЭНК ( $\theta, y_b$ ). Изменение координаты по оси ординат  $y_b$  при низком значении коэффициента жесткости характеризуется значительным перерегулированием и медленной стабилизацией, а рост коэффициента жесткости исключает перерегулирование и ускоряет стабилизацию системы. Напротив, изменения угла  $\theta$  демонстрирует обратную зависимость: при низком значении коэффициента жесткости наблюдается плавный переходный процесс без перерегулирования и короткое время стабилизации системы, в то время как увеличение значения коэффициента жесткости до 1 500 вызывает перерегулирование по углу, несмотря на ускоренную стабилизацию. Это противоречие подчеркивает конкурирующую динамику между  $y_b$  и  $\theta$ . При коэффициенте жесткости  $k_y = 1\,000$  (рис. 4 б) достигается оптимальный компромисс: минимизация перерегулирования по координате  $y_b$ , сохранение стабильности угла  $\theta$  и быстрая сходимость. Данный режим обеспечивает сбалансированную работу системы.

Достоверность полученных результатов обеспечивается устойчивостью замкнутой системы, что подтверждается отрицательными действительными частями её полюсов для всех исследуемых значений коэффициента жесткости, приведённых в таблице 2.

Таблица 2

Полюса замкнутой системы

Вариант процесса	$K_y$	Полюса замкнутой системы
1	700	$-2,2445 + 3,8530i$ $-2,2445 - 3,8530i$ $-4,5071 - 3,2807i$
2	1 000	$-2,6133 + 5,4608i$ $-2,6133 - 5,4608i$ $-3,6385 - 3,1496i$
3	1 500	$-2,7679 + 7,5731i$ $-2,7679 - 7,5731i$ $-3,2042 - 3,0242i$

Кривые на рис. 5 показывают влияние коэффициента демпфирования. При низком значении коэффициента демпфирования наблюдается значительная вибрация системы перед выходом на установившийся режим, сопровождаемая перерегулированием. Увеличение  $c_y$  снижает амплитуду колебаний и устраняет перерегулирование, однако приводит к росту энергозатрат. С целью обеспечения баланса между устойчивостью и значением квадратичной функции энергозатрат было выбрано значение коэффициента  $c_y = 100$ , что гарантирует устойчивость системы управления ЭНК с упругими элементами.

Из изображения на рис. 6 следует, что фильтр Калмана обеспечивает сходимость переходных процессов к нулевым значениям за три секунды при воздействии белого шума, подтверждая его робастные стабилизирующие свойства.

Полученные результаты показывают следующую картину. Во-первых, применение открытого управления как базового этапа позволяет минимизировать энергозатраты на стадии вывода системы из неустойчивого состояния в целевое вертикальное равновесие в заданное время стабилизации. Во-вторых, переход к замкнутому контурному управлению на основе обратной связи по состоянию обеспечивает асимптотическую устойчивость и устойчивость переходных режимов за счет решения уравнения Риккати и реализации эффективного фильтра Калмана. В-третьих, численное моделирование выявило важное влияние параметров упругих элементов на динамику системы: увеличение жесткости пружин уменьшает перерегулирование по углу  $\theta$  и ускоряет стабилизацию, но может приводить к сложностям на пути к устойчивой траектории; увеличение демпфирования снижает колебания и уменьшает перерегулирование, однако повышает энергозатраты. Найден баланс между стабильностью и энергозатратами, который достигается при конкретных значениях  $k_y$  и  $c_y$  (в примерах  $k_y = 1\,000$  Н/м,  $c_y = 100$  Н·с/м).

Исходя из предыдущего обсуждения и анализа полученных в статье результатов можно сказать, что разработанному методу оптимального управления ЭНК с упругими элементами удалось обеспечить устойчивость системы управления данного экзоскелета за определенное время стабилизации и при минимальных энергозатратах.

**Заключение.** Сформулирована и реализована методика оптимального управления экзоскелетом нижних конечностей (ЭНК) с упругими элементами в стопах с учетом внешних возмущений и шума измерений. Основной подход основан на представлении динамики ЭНК в виде системы уравнений Лагранжа, переводе её в каноническую форму пространства состояний и синтезе управляющего закона через оптимизацию квадратичных функций энергозатрат и устойчивость системы. Для оценки состояния применялся фильтр Калмана, что позволило корректно работать в условиях ограниченного числа датчиков и присутствия внешних возмущений.

Практическая значимость результатов состоит в разработке методики, позволяющей адаптивно выбирать параметры упругих элементов и режим управления в зависимости от условий задачи и целей (минимизация энергозатрат, ускорение стабилизации, минимизация перерегулирования). В рамках потенциальных приложений это может способствовать повышению эффективности реабилитационных технологий, снижению энергопотребления в протезно-ортезных системах и улучшению устойчивости движений на неровных поверхностях. Перспективы исследования включают экспериментальную верификацию метода и его адаптацию к переменным нагрузкам и сложным поверхностям, что особенно актуально для медицинской реабилитации и робототехники.

### Список литературы / References

1. Яцун С.Ф., Локтионова О.Г., Аль Манджи Х., Яцун А.С., Карлов А.Е. Моделирование управляемого движения человека при ходьбе в экзоскелете. *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2019;23(6):133–147. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-133-147>
2. Yatsun SF, Loktionova OG, Khalil Hamed Mohammed Hamood Al Manji, Yatsun AS, Karlov AE. Simulation of Controlled Motion of a Person When Walking in an Exoskeleton. *Proceedings of Southwest State University*. 2019;23(6):133–147. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-133-147>
3. Habib Mohamad, Sadjaad Ozgoli. Online Gait Generator for Lower Limb Exoskeleton Robots: Suitable for Level Ground, Slopes, Stairs, and Obstacle Avoidance. *Robotics and Autonomous Systems*. 2023;160:104319. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104319>
4. Bottin-Noonan J, Sreenivasa M. Model-Based Evaluation of Human and Lower-Limb Exoskeleton Interaction during Sit to Stand Motion. In: *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. New York City: IEEE; 2021. P. 2063–2069. <https://doi.org/10.1109/ICRA48506.2021.9561727>
5. Щурова Е.Н., Прудникова О.Г., Качесова А.А., Сайфутдинов М.С., Тertyshnaya М.С. Улучшение функционального состояния пациентов с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы при эпидуральной электростимуляции: проспективное исследование. *Вестник восстановительной медицины*. 2023;22(6):28–41. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2023-22-6-28-41>
6. Shchurova EN, Prudnikova OG, Kachesova AA, Saifutdinov MS, Tertyshnaya MS. Improvement of Functional State of Patients after Spinal Cord Injury During Epidural Electrical Stimulation: Prospective Study. *Bulletin of Rehabilitation Medicine*. 2023;22(6):28–41. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2023-22-6-28-41>
7. Nuckols RW, Sawicki GS. Impact of Elastic Ankle Exoskeleton Stiffness on Neuromechanics and Energetics of Human Walking across Multiple Speeds. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2020;17(1):75. <https://doi.org/10.1186/s12984-020-00703-4>
8. Orekhov G, Lerner ZF. Design and Electromechanical Performance Evaluation of a Powered Parallel-Elastic Ankle Exoskeleton. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2022;7(3):8092–8099. <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3185372>
9. Hamed Jabbari Asl, Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi. Neural Network-Based Bounded Control of Robotic Exoskeletons without Velocity Measurements. *Control Engineering Practice*. 2018;80:94–104. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.08.005>
10. Jinghui Cao, Sheng Quan Xie, Raj Das. MIMO Sliding Mode Controller for Gait Exoskeleton Driven by Pneumatic Muscles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2017;26(1):274–281. <https://doi.org/10.1109/TCST.2017.2654424>
11. Madani T, Daachi B, Djouani K. Non-Singular Terminal Sliding Mode Controller: Application to an Actuated Exoskeleton. *Mechatronics*. 2016;33:136–145. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2015.10.012>
12. Rigatos G, Abbaszadeh M, Pomares J, Wira P. A Nonlinear Optimal Control Approach for a Lower-Limb Robotic Exoskeleton. *International Journal of Humanoid Robotics*. 2020;17(5):2050018. <https://doi.org/10.1142/S0219843620500188>
13. Jun Chen, Yuan Fan, Mingwei Sheng, Mingjian Zhu. Optimized Control for Exoskeleton for Lower Limb Rehabilitation with Uncertainty. In: *Proc. Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. New York City: IEEE; 2019. P. 5121–5125. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2019.8833418>
14. Rigatos G, Busawon K. *Robotic Manipulators and Vehicles: Control, Estimation and Filtering*. Cham: Springer; 2018. 734 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-77851-8>
15. Madhusudhan Venkadesan, Ali Yawar, Carolyn M Eng, Marcelo A Dias, Dhiraj K Singh, Steven M Tommasini, et al. Stiffness of the Human Foot and Evolution of the Transverse Arch. *Nature*. 2020;579:97–100. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2053-y>

14. Juanjuan Zhang, Collins SH. The Passive Series Stiffness that Optimizes Torque Tracking for a Lower-Limb Exoskeleton in Human Walking. *Frontiers in Neurorobotics*. 2017;11:68. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2017.00068>

15. Tsapenko V, Tereshchenko M, Tymchik G, Matvienko S, Shevchenko V. Analysis of Dynamic Load on Human Foot. In: *Proc. IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. New York City: IEEE; 2020. P. 400–404. <https://doi.org/10.1109/ELNANO50318.2020.9088788>

**Об авторах:**

**Диб Делшан**, аспирант, ассистент кафедры «Робототехника, мехатроника, динамика и прочность машин» Национального исследовательского университета «МЭИ» (111250, Российская Федерация, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [delshan2deeb@gmail.com](mailto:delshan2deeb@gmail.com)

**Игорь Владимирович Меркурьев**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Робототехника, мехатроника, динамика и прочность машин» Национального исследовательского университета «МЭИ» (111250, Российская Федерация, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [MerkuryevIV@mpei.ru](mailto:MerkuryevIV@mpei.ru)

**Заявленный вклад авторов:**

**Д. Диб:** формальный анализ, написание черновика рукописи.

**И.В. Меркурьев:** научное руководство, разработка концепции, административное руководство исследовательским проектом.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

**About the Authors:**

**Delshan Deeb**, Postgraduate student, Teaching Assistant of the Department of Robotics, Mechatronics, Dynamics and Strength of Machines, National Research University “MPEI” (14, Krasnokazarmennaya Str., Moscow, 111250, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [delshan2deeb@gmail.com](mailto:delshan2deeb@gmail.com)

**Igor V. Merkuriev**, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Robotics, Mechatronics, Dynamics and Strength of Machines, National Research University “MPEI” (14, Krasnokazarmennaya Str., Moscow, 111250, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [MerkuryevIV@mpei.ru](mailto:MerkuryevIV@mpei.ru)

**Claimed Contributorship:**

**D Deeb:** formal analysis, writing – original draft preparation.

**IV Merkuriev:** supervision, conceptualization, project administration.

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

**All authors have read and approved the final manuscript.**

Поступила в редакцию / Received 22.06.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 10.08.2025

Принята к публикации / Accepted 25.08.2025

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

## MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 62-522.7

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-197-207>

### Экспериментальное исследование точности позиционирования автоматизированного длинноходового бесштокового пневмопривода

Д.А. Коротыч 

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

✉ [daniilberuk@gmail.com](mailto:daniilberuk@gmail.com)

EDN: DFVDDQ

#### Аннотация

**Введение.** В современных промышленных процессах пневматические приводы с длинноходовыми перемещениями играют важную роль. Однако их использование ограничено низкой точностью, вызванной сложностями управления воздушными потоками. Эти ограничения обусловлены сжимаемостью воздуха и термодинамическими процессами, что делает актуальной задачу повышения точности таких систем. Проведённый анализ научной литературы показывает, что современные исследования в основном сосредоточены на применении систем со стандартными цилиндрами, рабочий ход которых ограничен тремя метрами. В то же время вопросы разработки и исследования длинноходовых систем бесштоковых пневмоприводов, способных иметь длину хода до шести метров, остаются недостаточно изученными. Внедрение усовершенствованных систем управления в такие приводы связано со значительными инвестициями в высокотехнологичную электронную базу и дополнительные конструктивные элементы. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка принципиально новых технических решений, позволяющих эффективно эксплуатировать механизмы с рабочим ходом более трёх метров при сохранении необходимых технических параметров и экономической эффективности. В рамках предыдущих исследований автором была предложена конструкция пневмопривода длинноходовых перемещений, оснащённая уникальной системой управления на базе струйного датчика и внешнего тормозного механизма; также было выполнено его математическое моделирование и теоретический анализ, что позволило выделить ключевые факторы, влияющие на точность позиционирования. Для подтверждения адекватности математической модели и выдвинутых гипотез целью настоящей работы является экспериментальная верификация результатов математического моделирования позиционного длинноходового бесштокового пневмопривода, а также подтверждение степени влияния ключевых факторов на точность позиционирования.

**Материалы и методы.** В работе был использован стенд, представляющий собой техническую модель пневмопривода с оригинальной системой управления, включающей струйный датчик и внешнее тормозное устройство. Для верификации работоспособности и точности показаний струйного датчика был применён метод проливки с использованием датчика расхода Camozzi MF4008-10-R-BV-A, установленного после исследуемого элемента, а также датчиков давления Camozzi SWCN-P10-P3-2, размещённых перед и после исследуемого элемента. Проведённые испытания разработанного струйного датчика продемонстрировали высокую надёжность и стабильность работы в различных эксплуатационных режимах. Экспериментальное исследование длинноходового бесштокового пневмопривода включало в себя: оценку технических возможностей привода, анализ позиционных циклов, изучение влияния внешних факторов и сравнение результатов вычислительных и натурных экспериментов. С помощью пакета прикладных программ Mathcad и Matlab обрабатывались результаты вычислительного и натурального экспериментов, а также были построены зависимости точности позиционирования от массы и длины хода.

**Результаты исследования.** Достоверность модели была установлена на уровне максимального расхождения между экспериментальными данными и итогами математического моделирования, составившего 18 %, что подтверждает адекватность разработанной модели для инженерных расчетов. Экспериментально установлено влияние массы груза на точность позиционирования. При увеличении массы с 10 до 30 кг точность снижается в 1,47 раза, а при массе в 60 кг точность ухудшается еще на 1,37 раза относительно базовой массы в 10 кг. Кроме того, исследовано воздействие координат остановки: установлена зависимость точности позиционирования от положения исполнительного элемента. При перемещении от 0,1 м до 0,22 м точность ухудшается в 3,2 раза, однако при дальнейшем перемещении до 0,35 м она улучшается в 2,2 раза.

**Обсуждение.** Проведенные экспериментальные исследования позволили добиться хороших результатов в области разработки длинноходовых пневмоприводов. Успешная верификация математической модели подтверждает корректность как самой модели, так и теоретических исследований, проведенных в предыдущих работах автора. Достигнута точность позиционирования привода 77 мкм на дистанции свыше трех метров. Этот показатель существенно превосходит результаты, представленные в исследованиях других авторов, что свидетельствует о высоком потенциале разработанной конструкции. Экономическая эффективность предложенного решения обусловлена отсутствием электронной компонентной базы в системе управления. Это не только снижает первоначальные затраты на производство, но и существенно упрощает техническое обслуживание привода в процессе эксплуатации. Сравнительный анализ с существующими разработками подтверждает превосходство предложенной системы по критерию затрат.

**Заключение.** Проведенные исследования подтвердили эффективность разработанных решений для длинноходового бесштокового пневмопривода. Практическая значимость исследования определяется возможностью применения полученных результатов при создании высокоточных длинноходовых механизмов в различных отраслях промышленности. Разработанная конструкция может быть использована в автоматизированных производственных линиях, робототехнических комплексах и других областях, где требуется точное позиционирование на значительных расстояниях. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются оптимизация параметров управляющей системы для достижения еще более высокой точности позиционирования и разработка методик расчета позиционных длинноходовых пневмоприводов.

**Ключевые слова:** струйная система управления бесштоковым пневмоприводом, бесштоковый длинноходовой пневмопривод, позиционирование пневмопривода, пневматический датчик бесштокового пневмопривода

**Благодарности.** Автор выражает благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

**Для цитирования.** Коротыч Д.А. Экспериментальное исследование точности позиционирования автоматизированного длинноходового бесштокового пневмопривода. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(3):197–207. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-197-207>

*Original Empirical Research*

## Experimental Study on Positioning Accuracy of an Automated Long-Stroke Rodless Pneumatic Actuator

Daniil A. Korotych 

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

✉ [daniilberuk@gmail.com](mailto:daniilberuk@gmail.com)

### Abstract

**Introduction.** In modern industrial processes, pneumatic actuators with long-stroke movements play an important role. However, their use is limited by low accuracy resulting from the difficulties of controlling air flows. These limitations are caused by the compressibility of air and thermodynamic processes, which makes it urgent to improve the accuracy of such systems. The conducted analysis of scientific literature shows that modern research is mainly focused on the use of systems with standard cylinders with a working stroke limited to three meters. At the same time, the issues of development and research of long-stroke systems of rodless pneumatic drives, capable of having a stroke length of up to six meters, remain insufficiently studied. The introduction of advanced control systems in this type of drives involves significant investments in a high-tech electronic base and additional structural elements. In this regard, the development of fundamentally new technical solutions that allow for the efficient operation of mechanisms with a working stroke of more than three meters while maintaining the required technical parameters and economic efficiency, is of particular relevance. In the framework of previous studies, the author proposed a design of a pneumatic drive for long-stroke movements, equipped with a unique control system based on a jet sensor and an external brake mechanism. Its mathematical modeling and theoretical analysis were also performed, which made it possible to identify key factors affecting the accuracy of positioning. To validate the mathematical model and the hypotheses put forward, the objective of this research is to experimentally verify the results of mathematical modeling of a positioning long-stroke rodless pneumatic actuator, as well as to confirm the degree of influence of key factors on positioning accuracy.

**Materials and Methods.** The work involved a stand that was a technical model of a pneumatic drive with an original control system, including a jet sensor and an external brake device. To verify the operability and accuracy of the jet sensor readings, the spillage method was applied using the Camozzi MF4008-10-R-BV-A flow sensor after the element under study, and Camozzi SWCN-P10-P3-2 pressure sensors placed before and after the considered element. The tests

conducted on the developed jet sensor showed high reliability and stability of operation in various operating modes. The experimental study of a long-stroke rodless pneumatic actuator included evaluation of the actuator's technical capabilities, analysis of positional cycles, study on the effect of external factors, and comparison of the results of computational and full-scale experiments. The results of computational and full-scale experiments were processed using the Mathcad and MATLAB software packages. The dependences of positioning accuracy on mass and stroke length were constructed.

**Results.** The reliability of the model was established at the level of the maximum discrepancy between the experimental data and the results of mathematical modeling, which amounted to 18%. That confirmed the adequacy of the developed model for engineering calculations. The effect of the load mass on the accuracy of positioning was experimentally established. With an increase in mass from 10 to 30 kg, the accuracy decreased by 1.47 times, and with a mass of 60 kg, the accuracy deteriorated by another 1.37 times relative to the base mass of 10 kg. In addition, the effect of stop coordinates was studied: the dependence of positioning accuracy on the position of the actuator was established. When moving from 0.1 m to 0.22 m, the accuracy deteriorated by 3.2 times, but with further movement to 0.35 m, it improved by 2.2 times.

**Discussion.** The conducted experimental studies allowed achieving good results in the development of long-stroke pneumatic drives. Successful verification of the mathematical model confirmed the correctness of both the model itself and the theoretical studies conducted in the author's previous works. The positioning accuracy of the drive of 77 microns at a distance of over three meters was reached. This indicator significantly exceeds the results presented in the studies of other authors, which shows the high potential of the developed design. The economic efficiency of the proposed solution is due to the absence of an electronic component base in the control system. This not only reduces initial production costs, but also significantly simplifies maintenance of the drive under operation. The comparative analysis with existing developments confirms the superiority of the proposed system in terms of cost criteria.

**Conclusion.** The conducted studies confirmed the efficiency of the developed solutions for a long-stroke rodless pneumatic actuator. Practical significance of the study is determined by the possibility of using the obtained results in creating high-precision long-stroke mechanisms in various industries. The developed design can be used in automated production lines, robotic complexes, and other areas where precise positioning over significant distances is required. Promising areas for further research are the optimization of the control system parameters to reach even higher positioning accuracy, and the development of calculation methods for positioning long-stroke pneumatic drives.

**Keywords:** jet control system for a rodless pneumatic actuator, rodless long-stroke pneumatic actuator, positioning of a pneumatic actuator, pneumatic sensor for a rodless pneumatic actuator

**Acknowledgments.** The author would like to thank the editors and reviewers for their attentive attitude to the article and the comments indicated, which made it possible to improve its quality.

**For Citation.** Korotych DA. Experimental Study on Positioning Accuracy of an Automated Long-Stroke Rodless Pneumatic Actuator. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(3):197–207. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-197-207>

**Введение.** Эффективность работы приводов, используемых в современном технологическом оборудовании, определяется скоростью перемещения рабочего органа по координатным осям и точностью позиционирования исполнительных элементов привода в режиме реального времени при реализации требуемых циклов работы [1]. Эти циклы, как правило, состоят из быстрого подвода исполнительного механизма, его замедления до скорости позиционирования, точной остановки и быстрого отвода [2].

Пневматические приводы характеризуются высокой скоростью перемещения и защитой от возгораний, а также обладают взрывобезопасностью, экологичностью, надежностью и гибкостью в условиях ограниченного пространства [3]. Они эффективно применяются в машиностроении, а также в пищевой, химической и деревообрабатывающей промышленности, где важно сочетание быстродействия и точности позиционирования силовых элементов привода [4].

Современные транспортные и технологические машины оснащаются разнообразными исполнительными механизмами, основанными на пневматических приводах [5]. К таким системам постоянно предъявляются всё более высокие требования к скорости, точности и надежности их работы [6]. В данном контексте пневмоавтоматика предлагает универсальные подходы к управлению схожими системами.

Большая часть современного промышленного приводного оборудования функционирует на основе автоматических пневматических приводов с длинноходовыми перемещениями силовых исполнительных элементов [7]. Эти общепромышленные позиционные приводы гарантируют точность позиционирования порядка 1 % (в некоторых специальных исполнениях может достигать до 0,4 %) от максимальной длины хода. Это негативно сказывается на точности пневмоприводов с длинными ходами [8]. Сжимаемость воздуха и сложные термодинамические процессы, возникающие в воздушных потоках, оказывают значительное влияние на управление потоками воздуха в магистралях привода и полостях пневмоцилиндра, что ограничивает позиционную точность работы привода [9].

Исследования Д.В. Шилина [10] продемонстрировали, что внедрение гибридной системы управления значительно повышает точность позиционирования каретки бесштокового пневмоцилиндра. Эксперименты позволили снизить погрешность до 0,2 % от длины хода, что является хорошим результатом. В работе [11] авторы предлагают новую схему контроллера на основе нечёткой логики, применяемую для управления отслеживанием траектории движения исполнительных механизмов робота-манипулятора с двумя степенями свободы.

Перспективным направлением является разработка гибких бесштоковых пневмоцилиндров для длинноходовых приводов типа Маккиббена [12]. Тестировались пневмоцилиндры с функцией самоудержания, обеспечивающие точное позиционирование даже без подачи давления. Дао Тхе Ань [13] разработал и исследовал автоматизированный позиционный пневмопривод с повышенной точностью и скоростью работы, выявив зависимости характеристик привода от массы перемещаемых объектов, коэффициента замедления, относительного перемещения и силы торможения.

В исследовании [14] представлена адаптивная схема следящего управления в скользящем режиме второго порядка для роботов-манипуляторов. Предложен новый закон управления, позволяющий обеспечивать переход траекторий робота-манипулятора от всех начальных условий к поверхности переключения пропорционально-интегральной производной за конечное время с последующим удержанием на этой поверхности.

Существует струйная позиционная система числового управления [15], основанная на цилиндре с поршнем и штоком, связанным с измерительной шкалой. Система использует датчик «сопло-приёмный канал» для формирования управляющего сигнала. Устройство работает на пневматическом датчике, измеряющем зазор между датчиком и наклонной измерительной планкой, угол наклона которой регулируется винтом. Выход датчика связан с управляющим входом порогового устройства, формирующего сигнал для остановки поршня, положение которого регулируется дросселем [15].

Ключевой недостаток рассматриваемых современных технических решений заключается в том, что они рассчитаны исключительно на использование стандартных цилиндров [16] с рабочим ходом, не превышающим трёх метров. При попытке реализовать механизмы с увеличенным ходом свыше трёх метров разработчики сталкиваются с комплексом серьезных технических препятствий [17]. Основная проблема заключается в том, что для обеспечения функционирования таких систем требуется модернизация управляющей системы, что приводит к значительному увеличению затрат на производство конечного продукта. Повышение стоимости происходит по двум основным направлениям: первое связано с внедрением более сложной управляющей электроники, второе — с потребностью в дополнительных элементах для надежной работы на увеличенных дистанциях [18]. В таких условиях критически важно создать инновационный подход, способный эффективно решать задачи, связанные с длинными ходами (более трёх метров). При этом новое решение должно не только обеспечивать необходимые технические характеристики, но и оставаться экономически оправданным для потенциальных пользователей, сохраняя высокий уровень эксплуатационных качеств [19].

Целью настоящей работы являлась экспериментальная верификация результатов математического моделирования позиционного длинноходового бесштокового пневмопривода, а также подтверждение степени влияния ключевых факторов на точность позиционирования.

**Материалы и методы.** Экспериментальные исследования были направлены на подтверждение результатов, достигнутых в ходе математического моделирования пневмоприводных систем, которое проводилось ранее в работе [8].

В ходе предварительных расчетов была подобрана элементная база стенда и сделан его сборочный чертёж, который представлен на рис. 1.

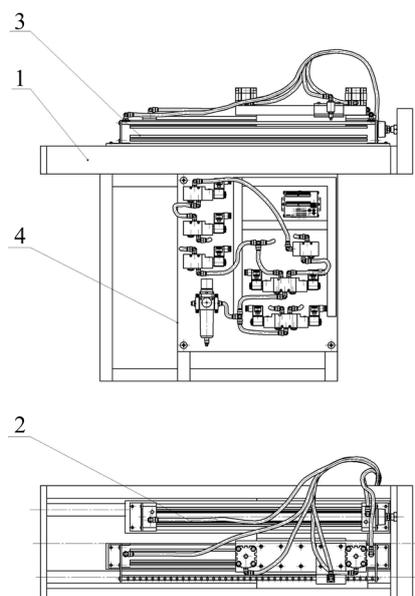


Рис. 1. Сборочный чертёж стенда-модели: 1 — рама стенда; 2 — пневмоцилиндр нагружения; 3 — автоматизированный длинноходовой бесштоковый пневмопривод в сборе; 4 — панель управления

Стенд, как техническая модель пневмопривода для экспериментальных исследований, собранный на основе конструкторской документации, представлен на рис. 2. Для исследования пневматических и кинематических характеристик привода была разработана и применена оригинальная система управления, включающая струйный датчик и внешнее тормозное устройство [20].

В ходе разработки экспериментальной установки на испытательный стенд был смонтирован бесштоковый пневмоцилиндр Camozzi 52G2P40A0400 с рабочим ходом 400 мм и диаметром поршня 40 мм. На подвижной каретке данного устройства была закреплена предложенная оригинальная система управления, разработанная в рамках предшествующих исследований [20].

Данная система включала струйный датчик оригинальной конструкции, состоящий из двух сопловых элементов и специальной рейки с отверстиями, а также внешнее тормозное устройство, представленное двумя пневмоцилиндрами Camozzi 31F4A040A005 с фрикционными накладками на штоках [8]. Фрикционные накладки материала Арголон-ТХ были выбраны из-за их коэффициента трения, равного 0,4, и линейного износа, который составляет до 5,5 мкм/торм [13].

Дополнительно на стенде был установлен стандартный пневмоцилиндр Camozzi 40M2L050A0400, имеющий длину хода 400 мм и диаметр поршня 50 мм, что позволяло моделировать внешние нагрузки на привод. Для верификации работоспособности и точности показаний струйного датчика был применён метод проливки с использованием датчика расхода Camozzi MF4008-10-R-BV-A, расположенного после исследуемого элемента, и двух датчиков давления Camozzi SWCN-P10-P3-2, размещённых перед и после этого элемента. Проведённые испытания струйного датчика продемонстрировали высокую надёжность и стабильность работы в различных эксплуатационных режимах.

Для проливки использовался датчик расхода модели Camozzi MF4008-10-R-BV-A, обладающий следующими техническими характеристиками: аналоговый выход 0,5–4,5 В; измеряемая величина — объёмный расход; начальное значение диапазона измерения расхода — 0 л/мин; конечное значение диапазона измерения расхода — 10 л/мин; точность  $(1,5+0,2 \cdot FS/MV) \%$ ; рабочее давление — 0–5 бар. Для испытаний также были задействованы датчики давления модели Camozzi SWCN-P10-P3-2, которые имеют следующие технические характеристики: максимальное давление измерения — 10 бар; минимальное давление измерения — 1 бар; перепад давления измерения — 0,01 бар; максимальная погрешность — не более 2,01 %; коэффициент масштабирования — 1,543. Дополнительно для обеспечения точности измерений и контроля давления в различных узлах привода были использованы манометры Camozzi M043R-12. Экспериментальный стенд был оснащён современным электронным блоком управления, в который входил микроконтроллер модели Giga Device GD32F103VET6. Он отвечал за сбор и обработку данных со всех датчиков пневматической системы, а также за управление пневматическими распределителями. Для повышения точности позиционирования исполнительного механизма использовался энкодер модели New Hong OVW6-10-2HC, обладающий следующими техническими параметрами [21]: питание — DC 5–12 В, 12–24 В; частота отклика — 0–100 кГц; ток потребления — 80 мА. Все данные от датчиков давления и энкодера регистрировались в системе с использованием протокола Modbus [22]. Сбор информации со всех измерительных устройств осуществлялся персональным компьютером, синхронизированным с микроконтроллером через интерфейс модели W5500.

Контроллер DD1 взаимодействовал с системой, формируя управляющие сигналы для электромагнитных реле через транзисторный блок модели Unisonic Technologies ULN2003. Это обеспечивало точное и надёжное управление электромагнитами пневмораспределителей, а также поддержание заданных параметров работы привода в различных режимах эксплуатации [23].

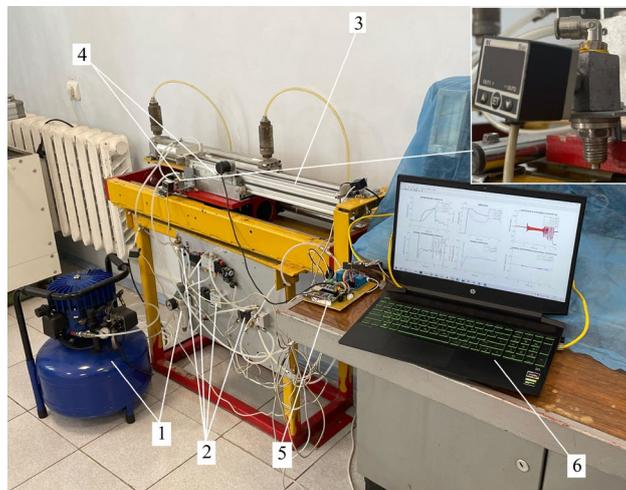


Рис. 2. Научно-исследовательский комплекс: 1 — энергетическая подсистема; 2 — устройства управления приводом; 3 — основной пневмоцилиндр длинноходовых перемещений с нагружателем; 4 — система управления в виде струйного датчика и внешнего тормозного устройства; 5 — электрическая подсистема; 6 — персональный компьютер

На рис. 3 представлен внешний вид научно-исследовательского комплекса. Принцип его функционирования описан в работах [8, 20] и др. Система управления данного комплекса состоит из бесконтактного струйного датчика и внешнего тормозного устройства.

Бесконтактный струйный датчик передает информацию о текущем положении исполнительного механизма пневмоцилиндра, осуществляет переключения управлений привода на его замедление и точную остановку.

Внешнее тормозное устройство осуществляет работу по фиксации исполнительного механизма пневмопривода при его стоянке и точной остановке в заданной координате, когда исполнительный механизм переходит на скорость позиционирования.

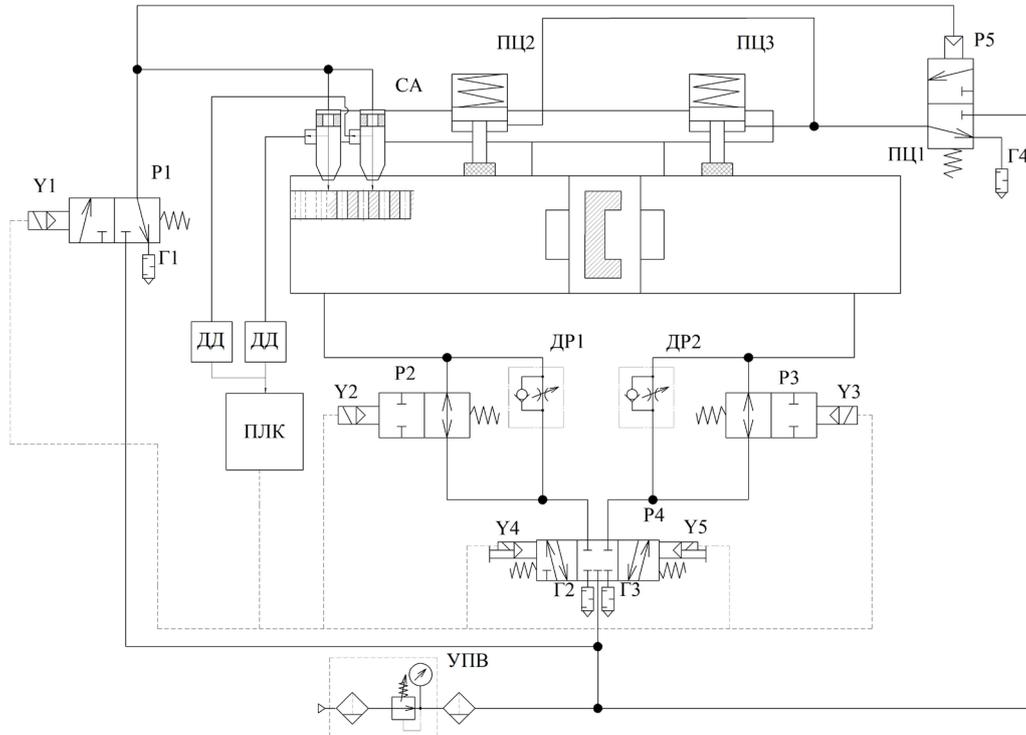


Рис. 3. Пневматическая схема научно-исследовательского комплекса: ПЦ1 — пневмоцилиндр с длинными ходами; ПЦ2 и ПЦ3 — пневмоцилиндры внешней тормозной системы; СА — сопловый аппарат; P1 — распределитель управления подачи на датчик; P2; P3 — распределители замедления; P4 — управляющий распределитель; P5 — распределитель управления внешним тормозным устройством; Г1–Г4 — пневматические глушители; ДД — датчик давления; ПЛК — программируемый логический контроллер; ДР1 и ДР2 — дроссели управления скоростью перемещения ПЦ1; УПВ — устройство подготовки воздуха [4, 6]

Экспериментальные исследования проводились при следующих условиях:

- максимальная скорость перемещения  $V_{\text{макс}} = 0,26$  м/с;
- давление в пневмосистеме привода  $p_m = 6$  бар;
- максимальная длина хода бесштокового пневмоцилиндра  $L = 400$  мм;
- масса перемещаемой нагрузки  $M_{\text{пр1}} = 10, 30, 60$  кг;
- координата остановки позиционирования (длина рабочего хода)  $L_{\text{пз}} = 150, 250, 350$  мм;
- скорость позиционирования  $V_{\text{пз}} = 0,025–0,04$  м/с.

В ходе проведения натурного эксперимента были исследованы:

- траектории перемещения исполнительного длинноходового пневмопривода: разгон и движение с установившейся максимальной скоростью; замедление скорости перемещения до скорости позиционирования; движение со скоростью позиционирования и останов в заданной координате;
- быстродействие длинноходового пневмопривода и его компонентов, что включает время разгона привода; продолжительность позиционного этапа и определение точности достижения заданного конечного положения;
- влияние внешней нагрузки и длины перемещения на скорость и точность позиционирования.

**Результаты исследования.** Графики перемещения силовых элементов привода, их скорости, а также зависимости давления воздуха в пневмосистеме привода, в сравнении с полученными в ходе моделирования графиками одноимённых параметров привода, представлены на рис. 4–6.

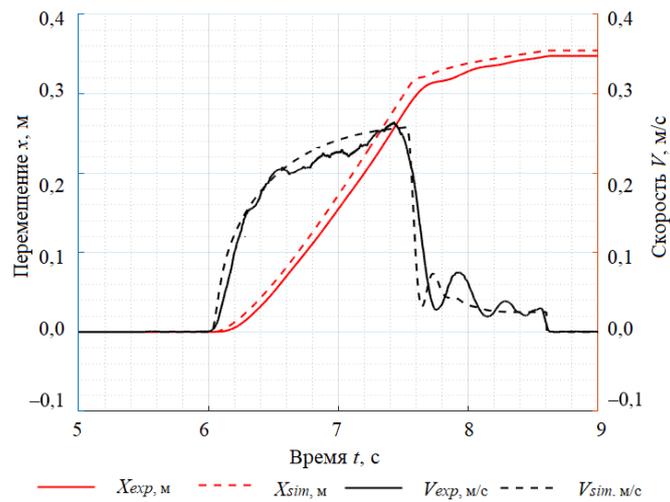


Рис. 4. Графики изменения во времени скорости и координаты перемещения исполнительного механизма исследуемого пневмопривода от времени:  $X_{exp}$ ,  $V_{exp}$  — перемещение и скорость, полученная экспериментально, соответственно;  $X_{sim}$ ,  $V_{sim}$  — перемещение и скорость, полученная в ходе проведенного математического моделирования, соответственно

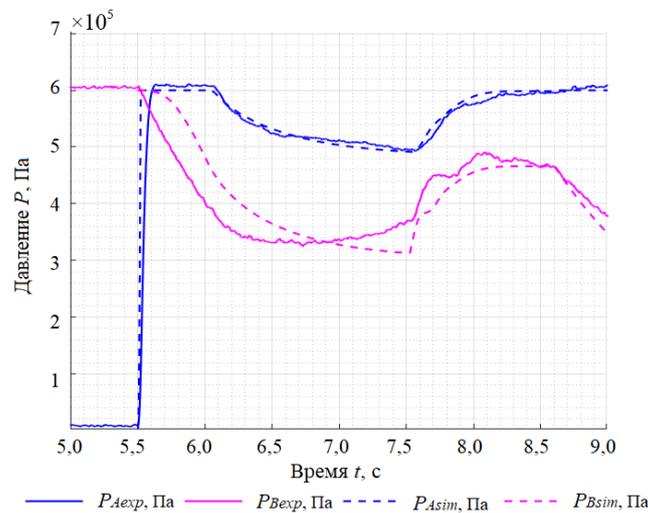


Рис. 5. График изменения во времени давления воздуха в напорной и сливной полостях исследуемого пневмопривода:  $P_{Aexp}$ ,  $P_{Bexp}$  — давление рабочего газа в напорной и сливной полостях, полученные экспериментально, соответственно;  $P_{Asim}$ ,  $P_{Bsim}$  — давление газа в напорной и сливной полостях, полученные в ходе математического моделирования, соответственно

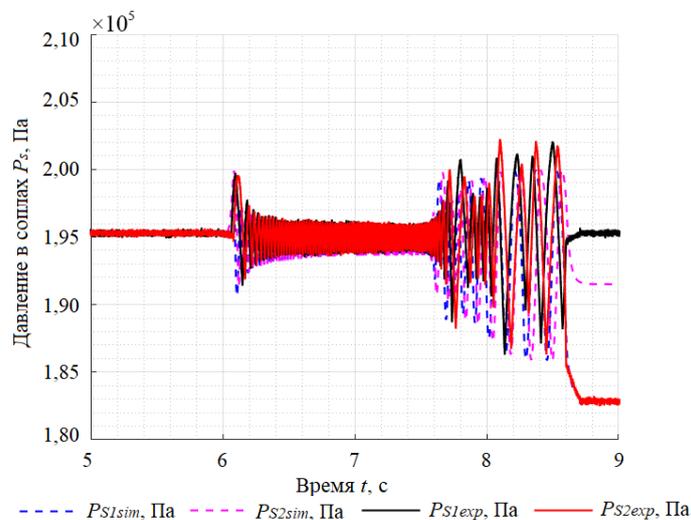


Рис. 6. График изменения во времени давления газа в сопловых аппаратах бесконтактного струйного датчика:  $P_{S1exp}$ ,  $P_{S2exp}$  — давление газа в сопловом аппарате 1 и 2, полученное экспериментально, соответственно;  $P_{S1sim}$ ,  $P_{S2sim}$  — давление в сопловом аппарате 1 и 2, полученное в ходе математического моделирования, соответственно

Максимальное расхождение результатов экспериментальных данных с данными математического моделирования (рис. 4–6) не превышает 18 %, что подтверждает достоверность результатов исследования [24].

Расхождение результатов исследования определялось для всех полученных данных (рис. 4–6) по следующей формуле [25]:

$$a = \frac{a_{\tau} - a_{\varepsilon}}{a_{\varepsilon}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $a_{\varepsilon}$  — данные, полученные в ходе экспериментального исследования (перемещение, скорость, давления),  $a_{\tau}$  — данные, полученные в результате теоретического исследования [26].

На рис. 7 и 8 подписи « $L_{exp}$ » и « $L_{mod}$ » обозначают осциллограммы, полученные в результате натурального и вычислительного экспериментов, соответственно.

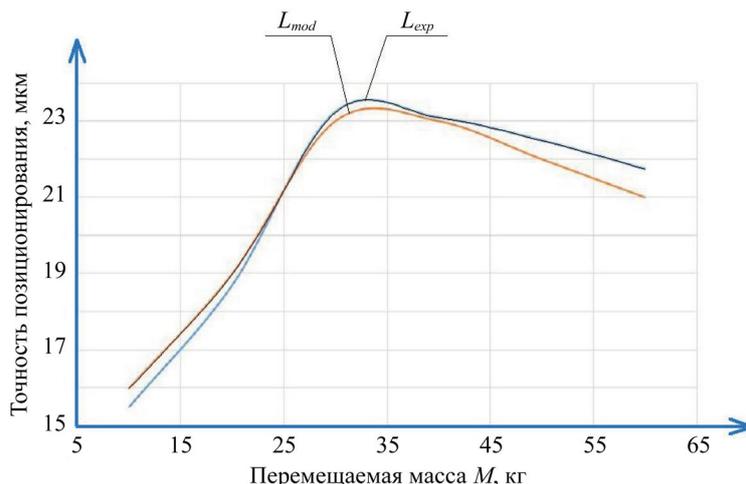


Рис. 7. Влияние массы  $M$  перемещаемой конструкции на величину точности позиционирования пневмопривода:  $L_{exp}$  — результат, полученный в ходе натурального эксперимента;  $L_{mod}$  — результат, полученный в ходе математического моделирования

На рис. 7 представлен результат исследования влияния массы  $M$  перемещаемой конструкции на величину точности позиционирования пневмоцилиндра.

Исследования продемонстрировали, что точность позиционирования привода зависит от массы перемещаемого объекта. При увеличении массы с 10 до 30 кг точность позиционирования снизилась в 1,47 раза, а при увеличении массы до 60 кг точность ухудшилась по сравнению с массой 10 кг в 1,37 раза.

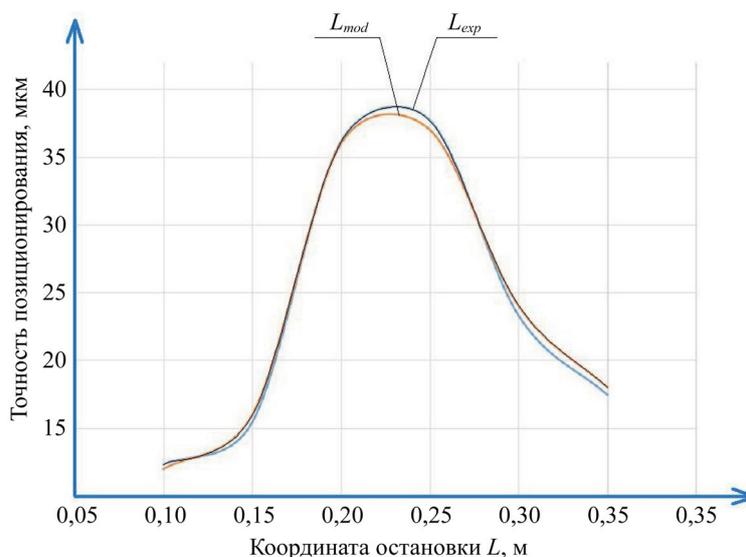


Рис. 8. Влияние длины рабочего хода привода на величину точности его позиционирования:  $L_{exp}$  — результат, полученный в ходе натурального эксперимента,  $L_{mod}$  — результат, полученный в ходе математического моделирования

На рис. 8 представлен результат исследования влияния координаты остановки исполнительного элемента привода на точность его позиционирования при одинаковой максимальной скорости перемещения. Установлено, что точность позиционирования привода зависит от длины его рабочего хода до полной остановки (координаты остановки): при изменении координаты остановки с 0,1 м до 0,22 м точность позиционирования ухудшилась в 3,2 раза, а при изменении координаты остановки с 0,22 м до 0,35 м точность позиционирования возросла в 2,2 раза. Это связано с тем, что во время работы привода создается противодействие в воздушной полости пневмоцилиндра при приближении поршня к крайним его стенкам (причем, чем ближе к стенке, тем давление больше) [27]. Противодействие дополнительно увеличивается также и при дросселировании за счёт сужения проходного сечения каналов отверстий, предназначенных для нагнетания и стравливания газа [28]. Сужение проходных сечений каналов приводит к торможению потоков газа [29]. Это наблюдается при перемещении исполнительного механизма привода со скоростью позиционирования [30].

**Обсуждение.** Проведенные экспериментальные исследования позволили достичь хороших результатов в области разработки длинноходовых пневмоприводов. Успешная верификация математической модели подтверждает корректность теоретических исследований, выполненных в предыдущих работах [8, 19].

Достигнутая точность позиционирования привода составляет 77 мкм на дистанции свыше трех метров. Этот показатель существенно превосходит аналогичные результаты, представленные в работах [13, 15], что демонстрирует высокий потенциал разработанной конструкции, так как экономическая эффективность предложенного решения обусловлена отсутствием электронной компонентной базы в системе управления [31]. Это не только снижает первоначальные затраты на производство, но и существенно упрощает техническое обслуживание привода в процессе эксплуатации [32]. Сравнительный анализ с существующими разработками [2, 13] подтверждает превосходство разработанной системы по критерию затрат.

**Заключение.** Основные результаты данного исследования следующие:

- проведена экспериментальная верификация результатов математического моделирования позиционного длинноходового бесштокового пневмопривода. Максимальная погрешность исследований составила 18 %, что подтверждает адекватность математической модели и её возможность применения для инженерных расчетов.

- выявлены ключевые факторы, определяющие точность позиционирования привода: при увеличении перемещаемой массы с 10 до 60 кг точность позиционирования снижается на 40 %. Также установлено значительное влияние положения поршня пневмоцилиндра в крайних позициях на точность позиционирования, что приводит к ухудшению точности до четырех раз в центральных положениях из-за возникновения противодействия в сливной полости при достижении скорости позиционирования.

Проведенные исследования подтвердили эффективность разработанных решений для длинноходового бесштокового пневмопривода.

Практическая значимость исследования определяется возможностью применения полученных результатов при создании высокоточных длинноходовых механизмов в различных отраслях промышленности [33]. Разработанная конструкция может быть использована в автоматизированных производственных линиях, робототехнических комплексах и других областях, где требуется точное позиционирование на значительных расстояниях.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются оптимизация параметров управляющей системы для достижения еще более высокой точности позиционирования, а также разработка методик расчета позиционных длинноходовых пневмоприводов.

### Список литературы / References

1. Hongwei Zhu, Zhiwen Wang, Hu Wang, Zecheng Zhao, Wei Xiong. Leakage Fault Diagnosis of Two Parallel Cylinders in Pneumatic System with a Minimal Number of Sensors. *Electronics*. 2023;12(15):3261. <https://doi.org/10.3390/electronics12153261>
2. Ракуленко С.В. *Гидропривод зависимой подачи инструмента (на примере мобильной буровой машины)*. Дис. канд. техн. наук. Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет; 2019. 165 с.  
Rakulenko SV. *Hydraulic Drive of Dependent Tool Advance (Using a Mobile Drilling Machine)*. Cand.Sci. (Engineering) diss. Rostov-on-Don: DSTU; 2019. 165 p. (In Russ.)
3. Mosadegh B, Polygerinos P, Keplinger C, Wennstedt S, Shepherd RF, Gupta U, et al. Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly. *Advanced Functional Materials*. 2014;24(15):2163–2170. <https://doi.org/10.1002/adfm.201303288>
4. Thanh Nguyen Truong, Anh Tuan Vo, Hee-Jun Kang. A Backstepping Global Fast Terminal Sliding Mode Control for Trajectory Tracking Control of Industrial Robotic Manipulators. *IEEE Access*. 2021;9:31921-31931. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3060115>
5. Yilmaz BM, Tatlicioglu E, Savran A, Alci M. Self-Adjusting Fuzzy Logic Based Control of Robot Manipulators in Task Space. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2021;69:1620–1629. <https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3063970>
6. Jihong Wang, Tim Gordon. Energy Optimal Control of Servo-Pneumatic Cylinders through Nonlinear Static Feedback Linearization. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2012;134(5):051005. <https://doi.org/10.1115/1.4006084>

7. Fracczak L, Nowak M, Koter K. Flexible Push Pneumatic Actuator with High Elongation. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2021;321:112578. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112578>
8. Коротыч Д.А., Сидоренко В.С., Приходько С.П. Исследование динамических характеристик автоматизированного позиционного длинноходового пневмопривода технологического оборудования. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):283–295. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-283-295>
- Korotych DA, Sidorenko VS, Prikhodko SP. Investigation of Dynamic Characteristics of an Automated Position Long-Stroke Pneumatic Actuator of Fabrication System. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):283–295. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-283-295>
9. Kurmyshev E, Jiménez M, Castaneda C. Experimental Study of Double-Acting Cylinder. *Experimental Techniques*. 2020;44(2):355–367. <https://doi.org/10.1007/s40799-020-00359-8>
10. Шилин Д.В. *Повышение точности позиционирования каретки бесштокового пневмоагрегата*. Дис. канд. техн. наук. Москва: Национальный исследовательский университет «МЭИ»; 2016. 257 с.
- Shilin DV. *Increasing the Accuracy of Positioning the Carriage of a Rodless Pneumatic Unit*. Cand.Sci. (Engineering) diss. Moscow: National Research University MPEI; 2016. 257 p. (In Russ.)
11. Urrea C, Kern J, Alvarado J. Design and Evaluation of a New Fuzzy Control Algorithm Applied to a Manipulator Robot. *Applied Sciences*. 2020;10(21):7482. <https://doi.org/10.3390/app10217482>
12. Behrouz Najjari, Masoud Barakati S, Ali Mohammadi, Mohammad Javad Fotuhi, Saeid Farahat, Mohammad Bostanian. Modelling and Controller Design of Electro-Pneumatic Actuator Based on PWM. *International Journal of Robotics and Automation (IJRA)*. 2012;1(3):125–136.
13. Дао Тхе Ань. *Позиционный пневмопривод повышенного быстродействия и точности*. Дисс. канд. техн. наук. Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет; 2016. 206 с.
- Dao The Anh. *High-Speed and High-Precision Positional Pneumatic Drive*. Cand.Sci. (Engineering) diss. Rostov-on-Don: DSTU; 2015. 206 p. (In Russ.)
14. Mobayen S, Mofid O, Din SU, Bartoszewicz A. Finite-Time Tracking Controller Design of Perturbed Robotic Manipulator Based on Adaptive Second Order Sliding Mode Control Method. *IEEE Access*. 2021;9:71159–71169. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3078760>
15. Чаплыгин Э.И., Дьячков Е.А., Горюнов В.А., Бурков Ю.Г. *Струйное устройство позиционирования привода возвратно-поступательного движения*. Патент РФ № RU 2352973 С1. 2009. 6 с. URL: [https://patents.s3.yandex.net/RU2352973C1\\_20090420.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2352973C1_20090420.pdf) (дата обращения: 20.06.2025).
- Chaplygin EhI, D'yachkov EA, Gorjunov VA, Burkov JuG. *Jet Device for Positioning of Reciprocal Motion Drive*. RF Patent No. RU 2352973 C1. 2009. 6 p. URL: [https://patents.s3.yandex.net/RU2352973C1\\_20090420.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2352973C1_20090420.pdf) (accessed: 20.06.2025).
16. Bae Hyo-Jeong, Jin Maolin, Suh Jinho, Lee Jun Young, Chang Pyung-Hun, Ahn Doo-sung. Control of Robot Manipulators Using Time-Delay Estimation and Fuzzy Logic Systems. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2017;12(3):1271–1279. <http://doi.org/10.5370/JEET.2017.12.3.1271>
17. Obukhova EN, Popov AN. Synergetic Synthesis of Nonlinear Adaptive Control for Pneumatic Drives. In: *Proc. IV International Conference on Control in Technical Systems (CTS)*. New York City: IEEE; 2021. P. 45–48. <https://doi.org/10.1109/CTS53513.2021.9562786>
18. Shenglin Mu, Seigo Goto, Satoru Shibata, Tomonori Yamamoto. Intelligent Position Control for Pneumatic Servo System Based on Predictive Fuzzy Control. *Computers and Electrical Engineering*. 2019;75:112–122. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.02.016>
19. Novoselov OG, Sabitov LS, Sibgatullin KE, Sibgatullin ES, Klyuev AV, Klyuev SV, et al. Method for Calculating the Strength of Massive Structural Elements in the General Case of Their Stress-Strain State (Parametric Equations of the Strength Surface). *Construction Materials and Products*. 2023;6(2):104–120. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-2-104-120>
20. Коротыч Д.А., Сидоренко В.С., Приходько С.П. *Струйная позиционная пневматическая система привода длинноходовых установочных координатных перемещений*. Патент РФ № RU 2802568 С1. 2023. 10 с. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/f5/07/6c/7d26ddeb88dd07/RU2802568C1.pdf> (дата обращения: 20.06.2025).
- Korotych DA, Sidorenko VS, Prikhodko SP. *Jet Positional Pneumatic Drive System for Long-Stroke Positioning Coordinate Movements*. RF Patent No. RU 2802568 C1. 2023. 10 p. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/f5/07/6c/7d26ddeb88dd07/RU2802568C1.pdf> (accessed: 20.06.2025).
21. Božek P, Nikitin Yu. The Development of an Optimally-Tuned PID Control for the Actuator of a Transport Robot. *Actuators*. 2021;10(8):195. <https://doi.org/10.3390/act10080195>
22. Hailin Sun, Longlong Gao, Zhixin Zhao, Baoren Li. Finite-Time Active Disturbance Rejection Control for High-Pressure Pneumatic Servo System Subject to Matched and Mismatched Disturbances. In: *Proc. 9th International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM)*. New York City: IEEE; 2023. P. 1–7. <https://doi.org/10.1109/FPM57590.2023.10565461>

23. Weiping Hu, Rahim Mutlu, Weihua Li, Gursel Alici. A Structural Optimisation Method for a Soft Pneumatic Actuator. *Robotics*. 2018;7(2):24. <https://doi.org/10.3390/robotics7020024>
24. Галлямов Ш.Р., Стариков К.В., Целищев В.А. Экспериментальное исследование характеристик пневмопривода FESTO с пропорциональным распределителем расхода. *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2011;15(1):26–33. URL: <http://journal.ugatu.su/index.php/Vestnik/article/view/900> (дата обращения: 20.06.2025).
- Gallyamov ShR, Starikov KV, Celishev VA. Experimental Study on the Characteristics of the FESTO Pneumatic Drive with a Proportional Flow Distributor. *Vestnik UGATU*. 2011;15(1):26–33. (In Russ.). URL: <http://journal.ugatu.su/index.php/Vestnik/article/view/900> (accessed: 20.06.2025).
25. Novoselov OG, Sabitov LS, Sibgatullin KE, Sibgatullin ES, Klyuev AS, Klyuev SV, et al. Method for Calculating the Strength of Massive Structural Elements in the General Case of Their Stress-Strain State (Kinematic Method). *Construction Materials and Products*. 2023;6(3):5–17. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-3-5-17>
26. Vardhan Alok, Dasgupta Kaustubh, Mishra Santosh. Dynamic Analysis of a Closed-Circuit Hydraulic Drive System Used in the Rotary Head of Blasthole Drilling Machine Using MATLAB–Simulink Environment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. 2018;233(6):702–719. <https://doi.org/10.1177/0959651818808870>
27. Abela K, Refalo P. Analysis of Pneumatic Parameters to Identify Leakages and Faults on the Demand Side of a Compressed Air System. *Cleaner Engineering and Technology*. 2022;6:100355. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100355>
28. Дао Тхе Ань, Сидоренко В.С., Дымочкин Д.Д. Исследование точности позиционирования автоматизированного пневмопривода с внешним тормозным устройством. *Вестник Донского государственного технического университета*. 2015;15(4):46–53. <https://doi.org/10.12737/16077>
- The Anh Dao, Sidorenko VS, Dymochkin DD. Study on Positioning Accuracy of Automated Pneumatic Drive with an Outer Brake. *Vestnik of Don State Technical University*. 2015;15(4):46–53. <https://doi.org/10.12737/16077>
29. Grishchenko VI, Kilina MS, Dolgov GA. Mathematical Model of Hydraulic Shock Absorber with Feedback. In: Radionov AA, Gasiyarov VR (eds). *Proc. 6th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham: Springer; 2021. P.1262–1270. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9\\_147](https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_147)
30. Lemeshko M, Molev M, Golovin I. Hydraulic Technological Machines with Adaptive Drive Structure. *MATEC Web of Conferences*. 2018;224:02087. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822402087>
31. Ling Zhao, Shaomeng Gu, Jinhui Zhang, Sihang Li. Finite-Time Trajectory Tracking Control for Rodless Pneumatic Cylinder Systems with Disturbances. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2022;69(4):137–147. <https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3071707>
32. Haili Li, Jiantao Yao, Pan Zhou, Xinbo Chen, Yundou Xu, Yongsheng Zhao. High-Force Soft Pneumatic Actuators Based on Novel Casting Method for Robotic Applications. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2020;306:111957. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.111957>
33. Xiaoqian Chen, Xiang Zhang, Yiyong Huang, Lu Cao, Jinguo Liu. A Review of Soft Manipulator Research, Applications, and Opportunities. *Journal of Field Robotics*. 2022;39(3):281–311. <https://doi.org/10.1002/rob.22051>

**Об авторе:**

Даниил Андреевич Коротыч, старший преподаватель кафедры «Гидравлика, гидропневмоавтоматика и тепловые процессы» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearchGate](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [daniilberuk@gmail.com](mailto:daniilberuk@gmail.com)

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

**About the Author:**

Daniil A. Korotych, Senior Lecturer of the Department of Hydraulics, Hydropneumoautomatics and Thermal Processes, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ResearchGate](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [daniilberuk@gmail.com](mailto:daniilberuk@gmail.com)

**Conflict of Interest Statement:** the author declares no conflict of interest.

*The author has read and approved the final version of manuscript.*

Поступила в редакцию / Received 14.06.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 04.07.2025

Принята к публикации / Accepted 18.07.2025

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

## MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.791

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-208-220>

### Исследование влияния взаиморасположения электродов на геометрические параметры слоя и морфологию зоны проплавления при наплавке расщепленной дугой



EDN: AAVODZ

Я.П. Скобликов<sup>1</sup> , Е.И. Ефимов<sup>2</sup>, В.В. Мурзин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> ООО «ТРИНИТЕХ», Ленинградская область, Российская Федерация

✉ [iakov98sp@gmail.com](mailto:iakov98sp@gmail.com)

#### Аннотация

**Введение.** Повышение производительности однопроволочной наплавки за счёт увеличения скорости подачи проволоки приводит к дефектам — подрезам и несплавлениям между слоями, что снижает качество наплавленного покрытия и увеличивает брак. Для решения этой проблемы в среде защитных газов развиваются многопроволочные методы наплавки, позволяющие повысить производительность без ухудшения качества. В литературе показано, что взаиморасположение электродов в многопроволочных системах существенно влияет на теплофизические и электрофизические характеристики дуги, а следовательно — на геометрию усиления и форму проплавления. Однако имеющиеся исследования фрагментарны: недостаточно данных по морфологии зоны проплавления и взаимосвязи её параметров с конкретными схемами расположения электродов при наплавке расщеплённой дугой в защитной среде, что оставляет научный пробел. Цель данной работы — оценить изменение геометрических параметров усиления наплавленного слоя и морфологии зоны проплавления при различных взаиморасположениях электродов при наплавке расщеплённой дугой в среде защитного газа.

**Материалы и методы.** Эксперимент проводился на 6-осевом роботе Fanuc 120iD с источником питания EWM Titan XQ500 и экспериментальной наплавочной головкой, состоящей из двух сварочных горелок. Слои наплавливались на стальные подложки марки Ст3 методом GMAW-Pulse проволокой Св-08Г2С диаметром 1.2 мм в среде Ar/CO<sub>2</sub> (98 %/2 %) при зафиксированном режиме наплавки (WFS = 6,5 м/мин на каждую горелку, TS = 4 мм/с, MBT = 150 °С). В качестве исследуемых факторов приняты следующие параметры: расстояния между электродами ( $z = 15, 18, 21$  мм), угол их наклона ( $\alpha = 5^\circ, 10^\circ$ ). На поперечных сечениях наплавленных слоев, подготовленных шлифовкой и травлением, измерялись геометрические параметры усиления (высота  $h$ , ширина  $S$ , угол смачивания  $\gamma$ ) и проплавления (глубины  $a, a_1$ , ширина  $b$ ). Количественный анализ геометрии шва выполнялся с использованием ПО Digitizer для оценки влияния взаиморасположения электродов на формирование слоя.

**Результаты исследования.** Установлено, что расстояние между электродами ( $z$ ) существенно влияет на геометрию усиления: увеличение  $z$  приводит к росту ширины слоя ( $S$ ) и угла смачивания ( $\gamma$ ), но снижению его высоты ( $h$ ). Глубина осевого проплавления ( $a$ ) демонстрирует нелинейную зависимость от  $z$ , достигая максимума (~2,2 мм) при  $z = 18$  мм. Угол наклона ( $\alpha$ ) оказал незначительное влияние (<5 %) на параметры усиления, но существенно повлиял на форму основной зоны проплавления ( $a_1$ ): увеличение  $\alpha$  уменьшало  $a_1$  и делало проплавление более пологим. При  $z = 21$  мм влияние  $\alpha$  на проплавление исчезало. Выявлены зависимости между взаиморасположением электродов при наплавке расщеплённой дугой, геометрическими параметрами усиления и глубиной зоны проплавления.

**Обсуждение.** Объяснение установленных зависимостей основано на изменении теплофизических и электрофизических свойств электрической дуги в зависимости от взаимного расположения электродов. Осевая глубина проплавления зависит не только от расстояния между электродами, но и от объёма сварочной ванны. При избыточном объёме сварочной ванны для конкретного режима наплавки возникает эффект демпфирования тепловых потоков от электрической дуги к основному металлу — объём сварочной ванны поглощает часть тепла, что приводит к уменьшению глубины проплавления. Изменение вектора давления дуги при увеличении угла между электродами объясняет уменьшение глубины основной зоны проплавления.

**Заключение.** Экспериментально установлены закономерности влияния взаимного расположения электродов на геометрию наплавленного слоя и форму зоны проплавления при наплавке расщеплённой дугой в защитном газе. Показано, что увеличение расстояния между электродами приводит к росту ширины валика, уменьшению его высоты и увеличению угла смачивания. Отмечено, что глубина проплавления зависит от объёма сварочной ванны. Определено, что угол наклона электродов в исследованных режимах оказывал незначительное влияние — менее 5 % — на геометрию наплавленного металла, хотя гипотетически оно может усиливаться при меньших межэлектродных расстояниях. Полученные данные выявляют чёткие тенденции и формируют основу для дальнейшего углублённого изучения теплофизических и электрофизических аспектов процесса наплавки расщеплённой дугой в среде защитного газа.

**Ключевые слова:** наплавка расщепленной дугой, GMAW, многопроволочная сварка, взаимное расположение электродов, морфология наплавленного слоя, зона проплавления, электромагнитное взаимодействие дуг

**Благодарности.** Авторы выражают искреннюю признательность руководителям компании ООО «Тринитех» — директору Ф.А. Шамраю и ведущему инженеру А.И. Куракину, за проявленный интерес к исследованию и предоставленную возможность проведения работ на производственных объектах компании.

**Для цитирования.** Скобликов Я.П., Ефимов Е.И., Мурзин В.В. Исследование влияния взаиморасположения электродов на геометрические параметры слоя и морфологию зоны проплавления при наплавке расщепленной дугой. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(3):208–220. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-208-220>

*Original Empirical Research*

## Study of Effect of Electrode Arrangement on Layer Geometry and Fusion Zone Morphology under Twin-Arc Surfacing

Iakov P. Skoblikov<sup>1</sup>  , Evgeny I. Efimov<sup>2</sup>, Victor V. Murzin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> TRINITECH LLC, Saint Petersburg, Russian Federation

 [iakov98sp@gmail.com](mailto:iakov98sp@gmail.com)

### Abstract

**Introduction.** Increasing the productivity of single-wire surfacing through raising the wire feed rate causes defects — undercuts and poor fusion between layers, which reduces the quality of the deposited coating and increases the reject rate. To solve this problem, multiwire surfacing techniques are being developed in a shielded gas environment which increase productivity without compromising quality. The literature shows that the relative position of electrodes in multiwire systems affects significantly the thermal and electrophysical characteristics of the arc, and therefore, the geometry of the reinforcement and the shape of the fusion penetration. However, the available studies are fragmentary: there is insufficient data on the morphology of the fusion zone, and the relationship of its parameters and specific electrode arrangement schemes under twin-arc surfacing in a shielded environment, which leaves a scientific gap. The objective of this research is to evaluate the change in the geometric parameters of the reinforcement of the deposited layer and the morphology of the fusion zone with different relative positions of the electrodes under twin-arc surfacing in a shielded gas environment.

**Materials and Methods.** The experiment was conducted on a 6-axis Fanuc 120iD robot with an EWM Titan XQ500 power source and an experimental surfacing head consisting of two welding torches. The layers were deposited on steel substrates of grade St3 using the GMAW Pulse method with Sv 08G2S wire with a diameter of 1.2 mm in an Ar/CO<sub>2</sub> environment (98%/2%) under a fixed surfacing mode (WFS = 6.5 m/min for each torch, TS = 4 mm/s, MW = 150°C). The following parameters were adopted as the studied factors: distances between electrodes ( $z = 15, 18, 21$  mm), their angle of inclination ( $\alpha = 5^\circ, 10^\circ$ ). On the cross-sections of the deposited layers prepared by grinding and etching, the geometric parameters of reinforcement (height  $h$ , width  $S$ , wetting angle  $\gamma$ ) and fusion penetration (depths  $a, a_1$ , width  $b$ ) were measured. Quantitative analysis of the weld geometry was performed using Digimizer software to assess the effect of the relative position of the electrodes on the formation of the layer.

**Results.** It has been found that the distance between the electrodes ( $z$ ) affects significantly the reinforcement geometry: a growth of  $z$  causes an increase in the layer width ( $S$ ) and the wetting angle ( $\gamma$ ), but a decrease in its height ( $h$ ). The axial fusion depth ( $a$ ) demonstrated a nonlinear dependence on  $z$ , reaching a maximum ( $\sim 2.2$  mm) at  $z = 18$  mm. The inclination angle ( $\alpha$ ) had a minor effect ( $< 5\%$ ) on the reinforcement parameters, but affected significantly the shape of the main fusion zone ( $a_1$ ): an increase in  $\alpha$  decreased  $a_1$  and made the penetration more gently sloping. At  $z = 21$  mm, the impact of  $\alpha$  on the penetration disappeared. The relationships between the relative positions of the electrodes under twin-arc surfacing, the geometric parameters of the reinforcement, and the depth of the fusion zone were specified.

**Discussion.** The explanation of the established dependences is based on the change in the thermal and electrophysical properties of the electric arc depending on the mutual arrangement of the electrodes. The axial depth of fusion penetration depends not only on the distance between the electrodes, but also on the volume of the weld pool. With an excessive volume of the weld pool for a specific surfacing mode, a damping effect of heat flows from the electric arc to the base metal occurs — the volume of the weld pool absorbs part of the heat, which causes a decrease in the depth of penetration. The change in the arc pressure vector with an increase in the angle between the electrodes explains the decrease in the depth of the main fusion zone.

**Conclusion.** The regularities of the effect of the mutual arrangement of electrodes on the geometry of the deposited layer and the shape of the fusion zone under twin-arc surfacing in a shielded gas have been experimentally established. It is shown that an increase in the distance between the electrodes results in an increase in the width of the bead, a decrease in its height, and an increase in the wetting angle. It has been noted that the penetration depth depends on the volume of the weld pool. It is determined that the angle of inclination of the electrodes in the studied modes has an insignificant effect — less than 5% — on the geometry of the deposited metal, although hypothetically, it can be enhanced at smaller interelectrode distances. The data obtained extract clear trends and form the basis for further in-depth study of the thermal and electrophysical aspects of the process of twin-arc surfacing in a shielded gas environment.

**Keywords:** twin-arc welding, GMAW, multiwire welding, mutual arrangement of electrodes, morphology of the deposited layer, fusion zone, electromagnetic interaction of arcs

**Acknowledgments.** The authors appreciate the management of TRINITECH LLC. They would like to thank Director F.A. Shamrai and Lead Engineer A.I. Kurakin for their interest in the research and for providing the opportunity to carry out work at the company's production facilities.

**For Citation.** Skoblikov IP, Efimov EI, Murzin VV. Study of Effect of Electrode Arrangement on Layer Geometry and Fusion Zone Morphology under Twin-Arc Surfacing. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(3):208–220. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-208-220>

**Введение.** Развитие технологий сварки и наплавки играет ключевую роль в автомобилестроении, судостроении, энергетике и других отраслях машиностроения, где требуются высокие эксплуатационные характеристики деталей. Газозащитная дуговая наплавка и сварка остаются одними из наиболее распространённых методов получения износостойких и коррозионно-устойчивых поверхностных слоёв. Одной из задач современного сварочного производства является увеличение производительности наплавки при сохранении качества. В настоящий момент данная задача актуальна в аддитивных технологиях на основе GMAW, где часто требуется увеличение скорости наплавки для сокращения сроков производства и снижения затрат [1]. Особенно это актуально при изготовлении крупногабаритных деталей в судостроительной, аэрокосмической и других отраслях промышленности [2]. Применение многопроволочной наплавки также позволяет управлять химическим составом наплавленного металла путем использования присадочных проволок с различным химическим составом [3].

Достичь большей производительности за счёт простого увеличения скорости подачи проволоки и/или линейной скорости сварки в традиционных однопроволочных процессах сварки и наплавки в защитных газах приводит к появлению дефектов — таких как подрезы или эффект хампинга. Из работы [4] следует, что возникновение подрезов является следствием высокой погонной энергии, а появление эффекта хампинга объясняется высокой мгновенной скоростью охлаждения сварочной ванны, обусловленной чрезмерной скоростью рабочего инструмента для выбранного режима наплавки.

Из работ [5–7], посвящённых исследованию дефектообразования в процессе высокоскоростной сварки, следует, что предельная производительность однопроволочных систем сварки/наплавки в защитном газе, обеспечивающая бездефектное формирование, лежит в районе 3–4 кг/час для стальных проволок. Данная оценка сопоставима с выводами работы [8], посвящённой изучению многопроволочной сварки.

Авторами в работе [8] выполнен обзор многопроволочной сварки/наплавки и проведено сравнение данного способа с традиционными однопроволочными процессами. Один из выводов заключается в том, что значительное увеличение производительности наплавки достигается не путём увеличения скорости подачи проволоки или диаметра подаваемой проволоки в однопроволочной системе, а путём увеличения количества расплавляемых проволок при использовании одного рабочего инструмента. В работе [2] выделяют множество способов наплавки в среде защитного газа с применением нескольких плавящихся электродов. Однако подробного описания системы наплавки, где два электрода подключены к одному источнику питания, нет. Кратко упоминается, что данный процесс наплавки является нестабильным, а для его реализации необходимы системы принудительного контроля режима наплавки, обеспечивающие равномерную скорость плавления проволоки. Авторами работы [9] подтверждается, что процесс наплавки расщеплённой дугой не является стабильным при работе на больших напряжениях (27–33 В): электрическая дуга горит попеременно на каждом электроде с определённой частотой.

Однако при уменьшении напряжения до 26 В образуется V-образная стабильная дуга, обеспечивающая глобулярный перенос металла в сварочную ванну. Образование глобулы происходит за счёт слияния капель электрода под действием электромагнитного поля, возникшего при протекании электрического тока через электроды. Отметим, что исследование в работе [9] проводилось с применением модифицированного оборудования для сварки под слоем флюса и источника питания, обеспечивающего жёсткую/пологопадающую ВАХ, характерную для сварки под слоем флюса или сварки в среде защитного газа с короткими замыканиями. Авторами в работе [10] исследован процесс сварки расщепленной дугой с применением импульсного режима наплавки. Данный режим обеспечивает стабильный каплеперенос металла по механизму: одна капля за один импульс (ODPP). Для управления размером капель авторами предложена методика, основанная на зависимости диаметра капли от медианного значения тока импульса. Выявлено, что данная регулировка необходима, так как от размера капель зависит сила их взаимного притяжения друг к другу. При столкновении капель расплавленного металла в дуговом промежутке горение дуги дестабилизируется.

Расположение электродов в процессе сварки/наплавки играет ключевую роль, определяющую форму усиления наплавленного металла и зоны проплавления, а также формирование дефектов. Среди многопроволочных способов наплавки выделяют системы с продольным или поперечным расположением рабочего инструмента относительно вектора перемещения. При продольном размещении электродов процесс называют тандемным. Данное расположение электродов характерно для систем, выполняющих сварные соединения [11]. Для выполнения наплавки характерно поперечное расположение электродов относительно вектора перемещения рабочего инструмента [11].

Помимо расположения электродов в пространстве, на форму усиления и зоны проплавления существенное влияние оказывает взаиморасположение электродов друг относительно друга. Электроды могут быть разведены или сведены на определенное расстояние или быть наклонены друг относительно друга [11]. Расстояние между электродами при наплавке расщепленной дугой оказывает существенное влияние на давление электрической дуги и распределение тепла в ней. Авторами работы [11] выполнено численное моделирование тепловых полей расщепленной электрической дуги без зазора и с зазором в 1 мм между электродами. При этом электроды располагались параллельно. При наплавке с зазором рассчитано уменьшение давления электрической дуги в 1,3 раза, а по сравнению с однопроволочной наплавкой — в 4,2 раза. Согласно экспериментам, проведенным в данной работе, определено, что при наплавке с зазором глубина проплавления уменьшается, а ширина наплавленного металла увеличивается.

Исходя из вышесказанного, следует, что наплавка расщепленной дугой в защитном газе представляет интерес для тяжелой промышленности, в том числе применяющей аддитивные методы электродугового выращивания. Данный процесс способен обеспечивать стабильное горение электрической дуги при использовании импульсных режимов наплавки, однако требует детальной настройки импульсов тока для переноса металла по режиму «одна капля в один импульс». Использование двух проволок в одной наплавочной головке позволяет значительно уменьшить давление электрической дуги по сравнению с традиционными однопроволочными системами наплавки. При разведении электродов друг относительно друга давление электрической дуги уменьшается, вследствие чего изменяется форма усиления и зона проплавления.

Исходя из проведенного анализа, выявлено отсутствие комплексного изучения влияния взаиморасположения электродов при многопроволочной наплавке расщепленной дугой в среде защитного газа на:

- тепловые характеристики электрической дуги;
- распределение давления в электрической дуге;
- геометрические параметры формы усиления и зоны проплавления основного металла;
- микро- и макроструктуру.

Цель исследования — систематически оценить влияние конфигурации рабочего инструмента на геометрические параметры усиления и формы проплавления при наплавке расщепленной дугой в среде защитного газа. Для выполнения данного исследования использовалась сконструированная наплавочная головка, состоящая из двух сварочных горелок, закреплённых на кронштейне, позволяющем регулировать их взаиморасположение друг относительно друга. Анализ геометрических параметров формы усиления и зоны проплавления выполнялся на макрошлифах.

В рамках цели поставлены следующие задачи:

- обосновать выбор факторов для экспериментальной проверки;
- разработать и реализовать план эксперимента с количеством повторов, позволяющим рассчитывать доверительные интервалы для ключевых показателей; выполнить измерения геометрических параметров наплавленного слоя зоны проплавления;
- провести статистический анализ результатов с оценкой значимости факторов и их взаимодействий;
- сформулировать практические рекомендации по оптимизации технологического процесса.

**Материалы и методы.** Для проведения исследовательской работы использовался 6-ти осевой робот Fanuc 120iD в связке с источником питания EWM Titan XQ500. В качестве рабочего инструмента выступала экспериментальная наплавочная головка, состоящая из двух сварочных горелок, закрепленных на регулируемом кронштейне. Для настройки взаиморасположения сварочных горелок использовалась линейка и цифровой уровень. На рис. 1 представлено фото и схема установки.

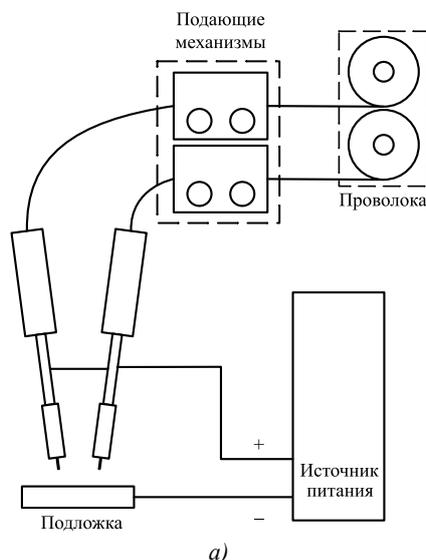


Рис. 1. Лабораторная установка:  
*а* — схема лабораторной установки; *б* — фото лабораторной установки

В качестве подложек использовался стальной лист марки Ст3 с габаритами 150×70×20 мм. Наплавка выполнялась методом GMAW-Pulse с применением сварочной проволоки марки Св-08Г2С диаметром 1,2 мм. Химический состав проволоки приведен в таблице 1. В качестве защитной газовой среды использовалась смесь аргона (98 %) и углекислого газа (2 %). Контроль температуры предварительного подогрева подложки выполнялся тепловизором НИКМИСРО В20. Для визуализации макроструктуры наплавленного слоя и зоны термического влияния проводилось травление образцов электролитическим методом в концентрированном растворе хлорида натрия (NaCl). Анализ результатов выполнялся с использованием ПО Digimizer.

Таблица 1

Химический состав проволоки Св-08Г2С (мас. %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
0,05–0,11	0,70–0,95	1,80–1,90	≤ 0,030	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,020	≤ 0,025

В качестве независимых факторов, определяющих взаиморасположение горелок, выбраны следующие параметры: расстояние между электродами ( $z$ ) и угол их наклона относительно вертикали ( $\alpha$ ). Наплавка выполнялась с одинаковым вылетом (SO), равным 20 мм. На рис. 2 приведено схематическое изображение описанных параметров.

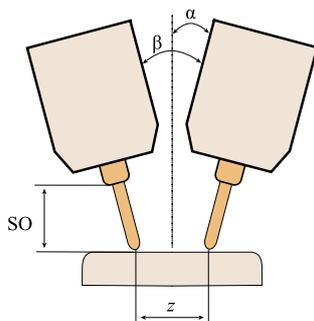


Рис. 2. Исследуемые параметры

Наплавка слоев выполнялась с подачей проволоки (WFS) равной 6,5 м/мин на каждой из горелок и постоянной линейной скоростью (TS) равной 4 мм/сек. В процессе наплавки фиксировались значения силы тока ( $I$ ) и напряжение ( $U$ ). Для поддержания схожей тепловой картины использовались подложки с одинаковыми габаритными размерами. Перед наплавкой слоя выполнялась зачистка подложек до металлического блеска и подогрев до температуры (МВТ) равной 150 °С. Подогрев выполнялся газовой горелкой. Расход защитного газа для каждой из горелок составлял 15 л/мин. В таблице 2 приведены значения режимов наплавки.

Таблица 2

Режим наплавки

WFS, м/мин	$I$ , А	$U$ , В	TS, мм/с	МВТ, °С	SO, мм	Расход газа, л/мин
6,5	420	25	4	150	20	15

Определение граничных значений факторов выполнялось исходя из конструктивных особенностей рабочего инструмента и условий формирования наплавленного металла. Минимальное значение  $\alpha$ , которое может быть установлено для рабочего инструмента, равно 5°, а максимальное — 10°. Минимальное значение параметра  $Z$ , равное 15 мм, также определялось конструкцией наплавочной головки. Максимальное значение параметра  $Z$  принято равным 21 мм, поскольку при большем расстоянии между электродами при неизменном режиме наплавки не удалось получить сплошной слой. Для оценки влияния выбранных факторов было принято решение о проведении двух однофакторных экспериментов, где группирующим значением выступал угол наклона электродов. В таблице 3 приведён план эксперимента с учётом граничных условий.

Таблица 3

План эксперимента

Опыт	$z$ , мм	$\alpha$ , °
1	15	5
2	18	5
3	21	5
4	15	10
5	18	10
6	21	10

Выборка образцов выполнялась на участке равном 3/4 от длины наплавленного слоя. Принято, что на данном участке слоя тепловая картина при наплавке слоя идентичная. На рис. 3 представлена фотография выборки образцов для исследования.



Рис. 3. Выборка образцов

После вырезки образцов выполнена шлифовка и травление поперечных сечений наплавленных слоев. На рис. 4 представлена макроструктура поперечных сечений наплавленных слоев.

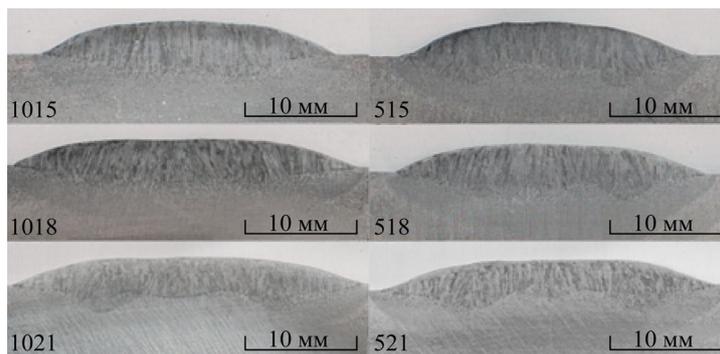


Рис. 4. Фото макроструктуры наплавленного металла

Для количественной оценки влияния взаиморасположения электродов на формирование слоя в программе Digimizer были очерчены и измерены области поперечного сечения слоя, характеризующие усиление и зону проплавления. В качестве отклика на изменяемые факторы выбраны следующие геометрические параметры валика: высота слоя ( $h$ ), ширина слоя ( $S$ ), угол смачивания валика ( $\gamma$ ).

Анализируя форму проплавления каждого наплавленного слоя, можно выделить несколько зон с аналогичными геометрическими характеристиками. Первая зона ( $P_1$ ), характерная для всех режимов наплавки, расположена на оси слоя. Вторая зона ( $P_2$ ) возникает по обе стороны от осевой зоны и называется основной. На рис. 5 представлено схематическое изображение исследуемых зон проплавления.

В зависимости от взаиморасположения электродов форма проплавления изменяется — она меняет свою глубину ( $a$  или  $a_1$ ) и ширину ( $b$ ). На рис. 6 представлено схематическое изображение указанных параметров.

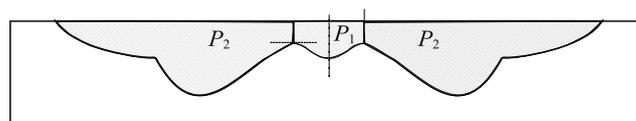


Рис. 5. Зоны проплавления

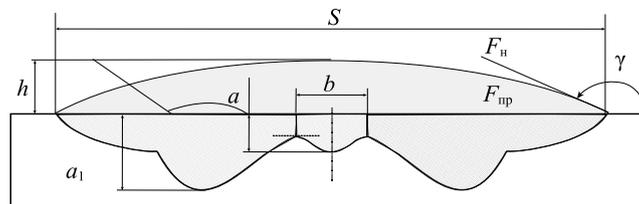


Рис. 6. Схема формы поперечного сечения слоя

**Результаты исследования.** На рис. 7 представлены фотографии макроструктуры наплавленного металла с нанесенными на них реперными точками для измерения формы наплавленного слоя и зоны проплавления в программе Digimizer. На рис. 8 представлены графики, отражающие геометрические параметры усиления и зоны проплавления для каждого наплавленного слоя. Измерения выполнялись в программе Digimizer. Графики сгруппированы по критерию угла наклона электродов относительно вертикали.

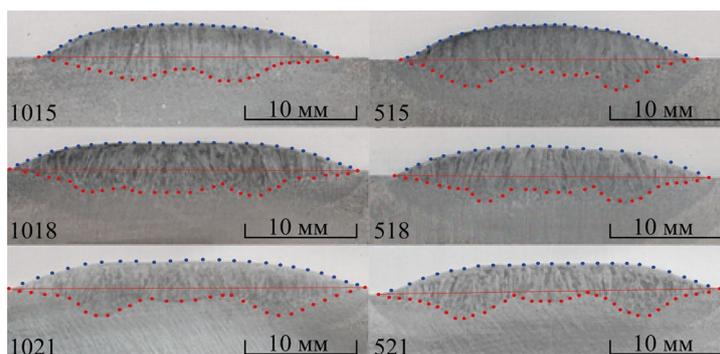


Рис. 7. Определение границ геометрических параметров усиления и зоны проплавления

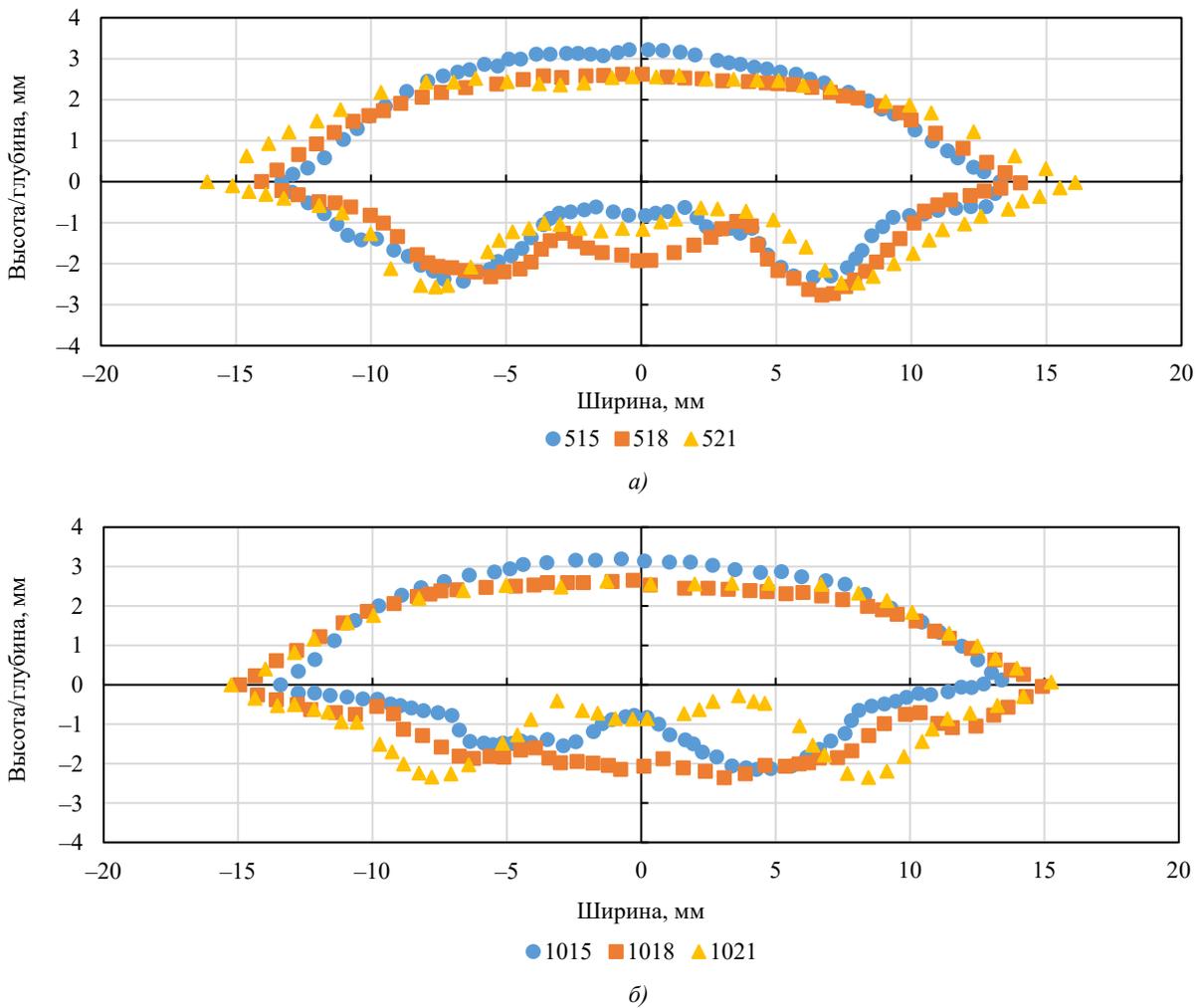


Рис. 8. Геометрические параметры усиления и формы проплавления:  
 а — при  $\alpha = 5^\circ$  для  $z = 15, 18, 21$  мм; б — при  $\alpha = 10^\circ$  для  $z = 15, 18, 21$  мм

По полученным данным выполнено построение графиков для оценки величины и характера исследуемых откликов. На рис. 9–11 представлены графики, описывающие изменение геометрических характеристик усиления в зависимости от взаимного расположения электродов. На рис. 12–13 показаны графики, иллюстрирующие, как изменяются ширина и глубина проплавления на оси слоя и глубина проплавления в основной зоне при изменении взаимного расположения электродов.

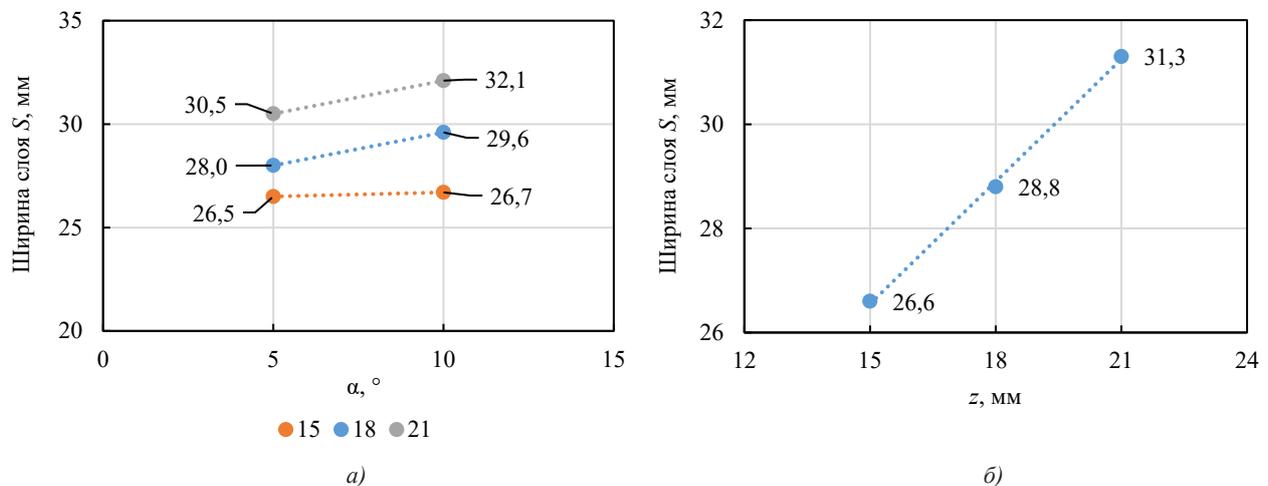


Рис. 9. Изменение ширины усиления от взаиморасположения электродов:  
 а — зависимость ширины слоя от угла наклона электродов  $\alpha$ ;  
 б — зависимость ширины слоя от расстояния между электродами  $z$

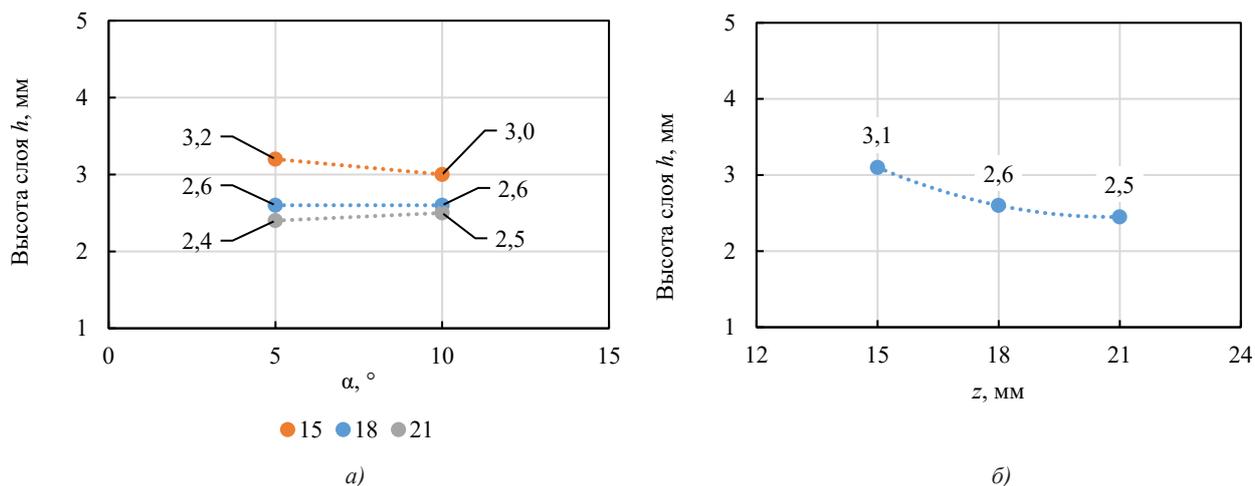


Рис. 10. Изменение высоты усиления взаиморасположения электродов:  
 а — зависимость высоты слоя от угла наклона электродов  $\alpha$ ;  
 б — зависимость высоты слоя от расстояния между электродами  $z$

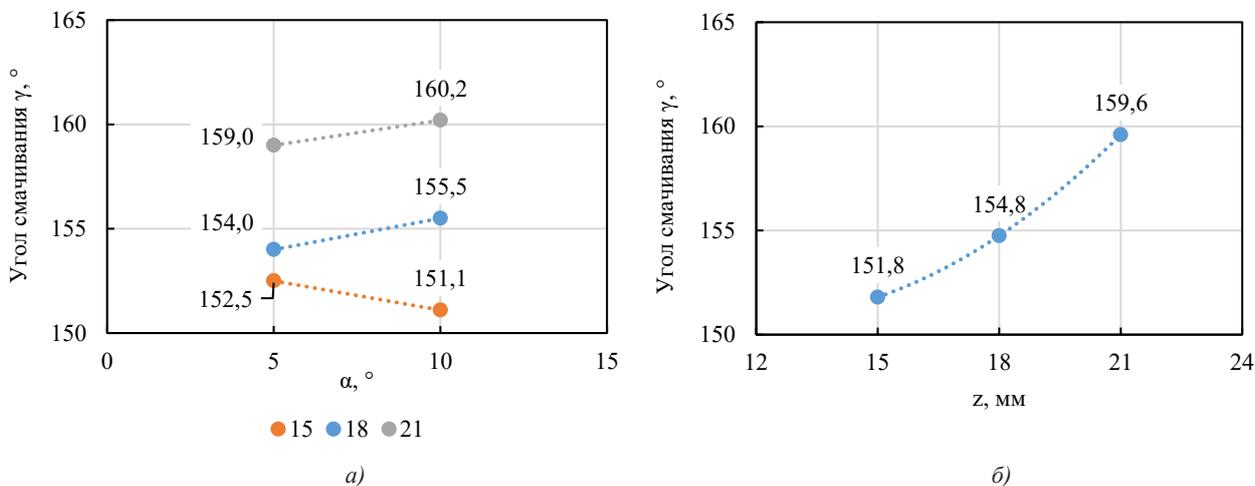
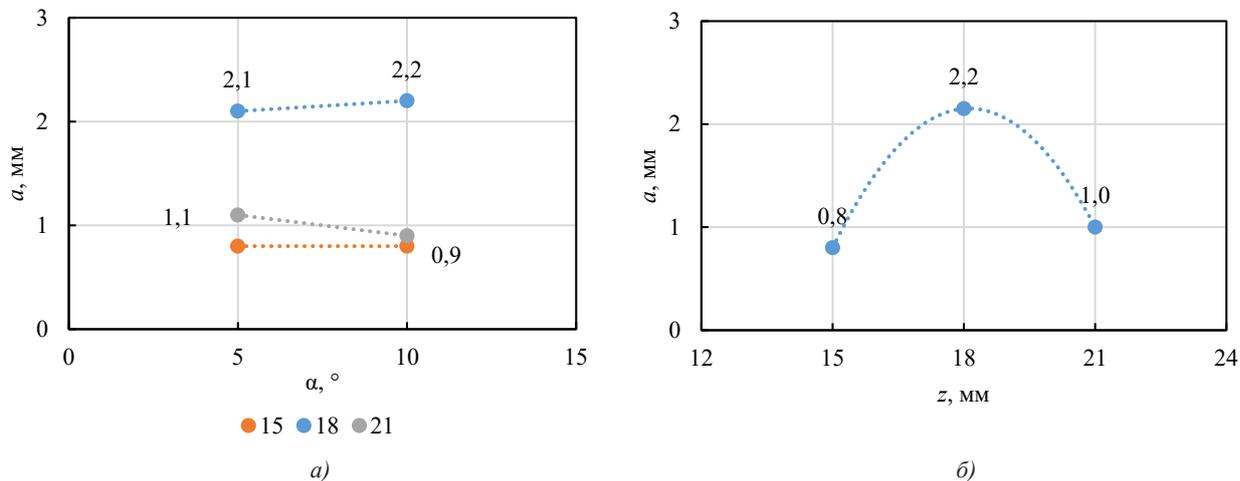


Рис. 11. Зависимость угла смачивания усиления от взаиморасположения электродов:  
 а — зависимость угла смачивания усиления от угла наклона электродов  $\alpha$ ;  
 б — зависимость угла смачивания усиления расстояния между электродами  $z$

Из результатов измерений следует, что ширина, высота и угол смачивания наплавленного слоя зависят от расстояния между электродами. С увеличением расстояния между электродами ширина слоя увеличивается, его высота уменьшается, а угол смачивания становится больше.

Влияние угла между горелками на геометрию валика определено как незначительное. При изменении угла наклона между горелками исследуемые геометрические характеристики усиления изменяются на величину, не превышающую 5 %.



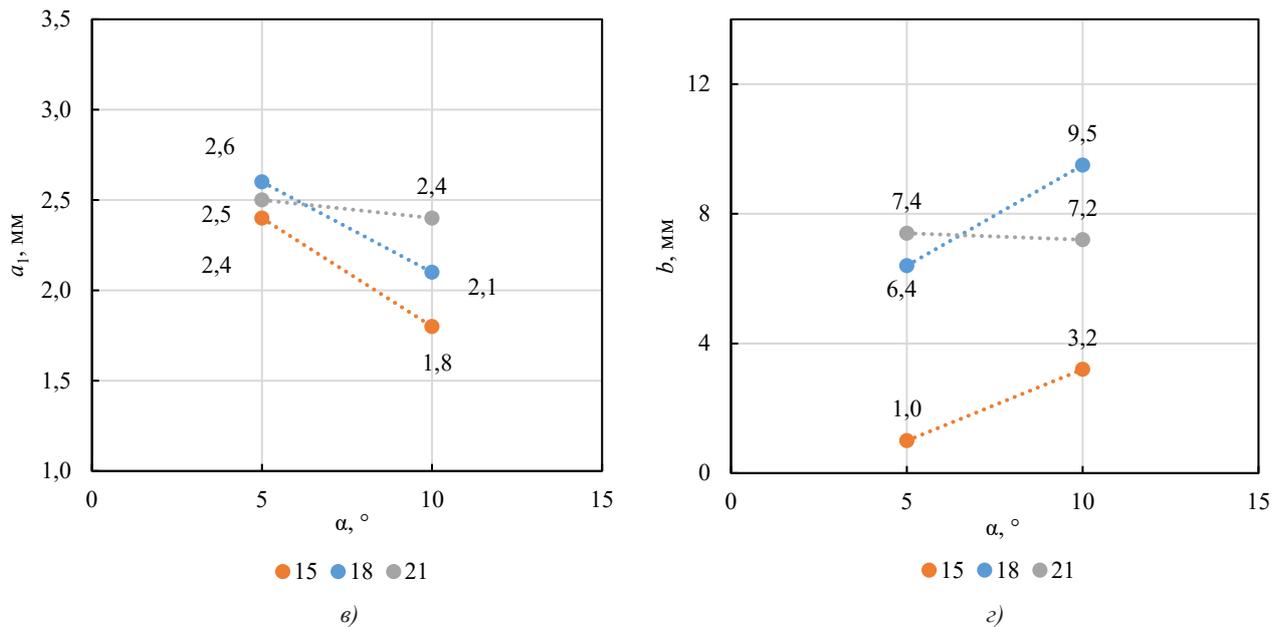


Рис. 12. Глубина и ширина проплавления в различных зонах:

- $a$  — зависимость осевой глубины проплавления от угла наклона электродов  $\alpha$ ;  
 $b$  — зависимость осевой глубины проплавления от расстояния между электродами  $z$ ;  
 $v$  — зависимость основной глубины проплавления от угла наклона электродов  $\alpha$ ;  
 $z$  — ширина осевой глубины проплавления в зависимости от угла наклона электродов  $\alpha$

Из результатов измерений следует, что при относительно близком расположении электродов изменение осевой глубины проплавления незначительно. Основное влияние на осевую глубину оказывает расстояние между электродами.

Изменение ширины осевой зоны проплавления определяется углом расположения электродов: с увеличением угла между электродами ширина осевой зоны растёт. Глубина проплавления в основной зоне тоже зависит от угла между электродами — при увеличении угла величина глубины осевого проплавления уменьшается. Однако при относительно большом расстоянии между электродами влияние угла на изменение ширины и глубины отдельных зон проплавления отсутствует. Зависимость площади поперечного сечения проплавленного металла от взаиморасположения электродов не установлена.

**Обсуждение результатов.** Выявлены зависимости, подтверждающие влияние угла и расстояния между электродами на форму проплавления и геометрические параметры наплавленного слоя.

Изменение геометрии наплавленного слоя в зависимости от расстояния между электродами происходит за счёт различного распределения массы расплавленного металла по наплавляемой поверхности. При разнесении источников тепла формируется сварочная ванна с различной площадью зеркала. В результате, при увеличении расстояния между электродами, наплавленные слои становятся шире, высота слоя меньше, а угол смачивания увеличивается.

Изменение угла наклона электродов относительно вертикальной плоскости при неизменном расстоянии между электродами не оказывает существенного влияния на геометрические параметры наплавленного слоя. Отсутствие значительного влияния на форму усиления объясняется тем, что угол наклона определяет вектор давления электрической дуги и силу взаимодействия электромагнитных полей, но не определяет площадь зеркала сварочной ванны. Данные результаты сходятся с теоретическими ожиданиями.

Исходя из анализа данных о форме проплавления, следует, что оба фактора — угол наклона электродов и расстояние между ними — являются весомыми. Это объясняется тем, что эти параметры влияют на взаимодействие электромагнитных полей, возникающих при протекании электрического тока по электродам. Данное взаимодействие, в свою очередь, влияет на распределение тепла в электрической дуге и её давление на зеркало сварочной ванны.

При протекании однонаправленного электрического тока по проводникам в пространстве между ними создаётся область электромагнитного разрежения. По этой причине в межэлектродном пространстве происходит концентрация заряженных частиц. Наблюдается эффект сближения электрических дуг во время наплавки и устремления потоков плазмы в пространство между электродами. О данном взаимодействии упоминается в работах [11–13]. На рис. 13 представлено изображение процесса горения электрических дуг, снятое в процессе выполнения эксперимента.

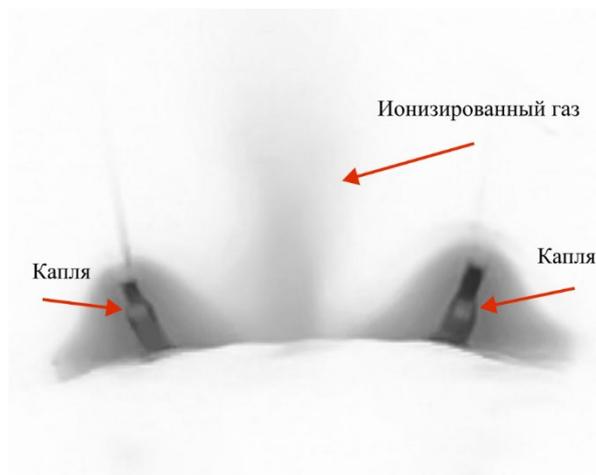


Рис. 13. Изображение каплепереноса при наплавке слоя с параметрами:  $Z = 18$  мм;  $\alpha = 10^\circ$

За счёт облака плазмы между электродами возникает зона осевого проплавления. При увеличении расстояния между электродами интенсивность взаимодействия электромагнитных полей уменьшается, и глубина проплавления в осевой зоне также уменьшается. При расстоянии между электродами 18 мм и 21 мм глубина осевого проплавления составляет 2,2 мм и 1 мм соответственно. Однако при относительно малом расстоянии между электродами (15 мм) глубина проплавления в осевой зоне равна 0,9 мм. Исходя из результатов, полученных в работе [11], следует, что при уменьшении расстояния между электродами давление электрической дуги и концентрация ионизированного газа в области между электродами увеличиваются. Вследствие чего значение осевой глубины проплавления должно увеличиваться — что не соответствует полученным данным.

Вероятно, данное несоответствие происходит за счёт того, что при расстоянии между электродами, равном 15 мм, в процессе наплавки формируется сварочная ванна с меньшим зеркалом, чем при наплавке с расстоянием 18 мм. Данный факт подтверждает меньшая ширина слоя, полученная в ходе проведения эксперимента. Сварочная ванна с относительно меньшей площадью зеркала, но таким же объёмом расплавленного металла имеет большую толщину. Следовательно, можно сделать вывод, что более толстая прослойка жидкого металла препятствует передаче тепла от облака плазмы и капель расплавленного металла к основному металлу. В результате чего осевая глубина проплавления в данном эксперименте не соответствует теоретическому ожиданию.

Влияние угла наклона электрода относительно вертикальной плоскости на глубину осевой зоны проплавления не определено. Вероятнее всего отсутствие данного влияния объясняется значительным расстоянием между электродами. При сближении электродов интенсивность взаимодействия электромагнитных полей увеличится — и данный фактор начнёт иметь вес при оценке осевой глубины проплавления. Для подтверждения данной гипотезы необходимо проведение дополнительных исследований.

В свою очередь основная глубина проплавления незначительно изменяет свои значения при изменении угла наклона электродов за счёт изменения взаимодействия электромагнитных полей и изменения вектора давления электрической дуги. При увеличении наклона электродов друг относительно друга вектор силы давления электрической дуги не перпендикулярен поверхности, а стремится к оси наплавляемого слоя. С учётом взаимного притяжения электрических дуг основная зона проплавления имеет пологую, а не остrokонечную форму — как при наплавке с параллельно расположенными горелками к вертикальной плоскости [13].

**Заключение.** Итак, можно отметить следующее: наплавка с применением расщеплённой дуги в среде защитного газа представляет интерес для промышленности, в частности для высокопроизводительной наплавки и технологии электродугового аддитивного выращивания. По литературному обзору видно, что этот процесс в полной мере не раскрыт в вопросах взаимодействия электромагнитных полей, распределения теплового поля в электрической дуге, а также морфологии микро- и макроструктуры наплавленного металла в зависимости от взаиморасположения электродов при наплавке расщеплённой дугой.

Что касается проделанной работы, то полученных данных недостаточно для построения математической модели, позволяющей предопределять геометрические параметры наплавленного слоя и форму проплавления, но их достаточно, чтобы сформировать представление о тенденциях и закономерностях в наплавленном и проплавленном металле при наплавке расщеплённой дугой в среде защитного газа при различном взаиморасположении электродов.

Определены следующие зависимости:

1. С увеличением расстояния между электродами ширина наплавленного слоя увеличивается, высота уменьшается, а угол смачивания возрастает — этот эффект связан с перераспределением объёма расплавленного металла по наплавляемой поверхности.

2. Глубина проплавления в осевой зоне зависит от объёма и площади зеркала сварочной ванны, а также от расстояния между электродами. С увеличением расстояния глубина осевого проплавления возрастает до критического значения, при котором достигается максимальная передача тепла от электрической дуги к основному металлу. При дальнейшем увеличении расстояния осевая глубина проплавления уменьшается. При уменьшении расстояния между электродами площадь зеркала сварочной ванны сокращается, что приводит к образованию прослойки жидкого металла, демпфирующей тепло от электрической дуги.

3. При проведении данного эксперимента угол наклона электродов оказывает незначительное влияние на геометрию наплавленного слоя — изменения не превышают 5 %. Однако выдвинута гипотеза, что при более близком расположении электродов это влияние будет более заметным.

4. Отмечено, что с увеличением угла наклона электродов глубина основной зоны проплавления уменьшается и становится более полой, а при расстоянии между электродами, равном 21 мм, влияние угла наклона на ширину и глубину отдельных зон проплавления практически отсутствует.

Данное исследование служит отправной точкой для дальнейшего изучения теплофизических и электрофизических свойств расщеплённой электрической дуги в среде защитного газа в зависимости от взаиморасположения электродов.

Данное исследование служит отправной точкой для изучения теплофизических и электрофизических свойств расщепленной электрической дуги в среде защитного газа в зависимости от взаиморасположения электродов.

### Список литературы / References

1. Somashekara MA, Suryakumar S. Studies on Dissimilar Twin-Wire Weld-Deposition for Additive Manufacturing Applications. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2017;70:2123–2135. <https://doi.org/10.1007/S12666-016-1032-3>
2. Rui Xiang, Jiankang Huang, Xiaoquan Yu, Huayu Zhao, Ding Fan. A Review of Double-Electrode GMAW: Approaches, Developments and Variants. *Journal of Manufacturing Processes*. 2025;133:1160–1182. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.12.017>
3. Sudnik W. Physical Mechanisms and Mathematical Models of Bead Defects Formation During Arc Welding. In book: *Arc Welding*. London: InTech; 2011. P. 243–266. <https://doi.org/10.5772/30803>
4. Zong R, Chen J, Chen MA. Undercutting Formation Mechanism in Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal*. 2016;95:174–184.
5. Lin Wang, Ji Chen, Juansong Wu, Jinqiang Gao. Backward Flowing Molten Metal in Weld Pool and Its Influence on Humping Bead in High-Speed GMAW. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016;237:342–350. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.06.028>
6. Bajcer B, Hrženjak M, Pompe K, Jež B. Improvement of Energy and Materials Efficiencies by Introducing Multiple-Wire Welding. *Metalurgija*. 2007;46(1):47–52.
7. Siyuan Han, Guoqiang Liu, Xinhua Tang, Lidong Xu, Haichao Cui, Chendong Shao. Effect of Molten Pool Behaviors on Welding Defects in Tandem NG-GMAW Based on CFD Simulation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022;195:123165. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123165>
8. Елсуков С.К., Соколов Г.Н., Зорин И.В., Фастов С.А., Полунин И.А. Исследование дугового процесса при наплавке расщеплённым электродом в смеси защитных газов. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2020;237(2):62–66. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2020-2-237-62-66>
9. Elsukov SK, Sokolov GN, Zorin IV, Fastov SA, Polunin IA. Investigation of the Arc Process of a Split Electrode in a Gas Metal Arc Welding. *Izvestia VSTU*. 2020;237(2):62–66. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2020-2-237-62-66>
9. Kaiyuan Wu, Jiatong Zhan, Xuanwei Cao, Min Zeng, Nian Ding. Metal Transfer of Aluminum Alloy Double-Wire Pulsed GMAW with a Median Waveform. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;286:116761. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116761>
10. Guoqiang Liu, Siyuan Han, Xinhua Tang, Haichao Cui. Effects of Torch Configuration on Arc Interaction Behaviors and Weld Defect Formation Mechanism in Tandem Pulsed GMAW. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;62:729–742. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.01.007>
11. Xiaoli Wang, Yangsen Liu, Qi Zhang, Chengfu Luo, Qingxian Hu. Numerical Analysis Arc Behavior in Single-Power Double-Wire Single-Arc Gas Metal Arc Welding. *Results in Engineering*. 2025;26:105538. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105538>
12. Ning Xiao, Haoyu Kong, Qingjie Sun, Ninshu Ma. Study of Process, Microstructure, and Properties of Double-Wire Narrow-Gap Gas Metal Arc Welding Low-Alloy Steel. *Materials*. 2024;17(24):6183. <https://doi.org/10.3390/ma17246183>
13. Kaiyuan Wu, Yifei Wang, Taoyuan Tao, Xiaobin Hong. Effect of Phase Shift on Arc Interference and Weld Bead Formation in Aluminum Alloy Tandem GMAW with a Median Pulsed Waveform. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;120:8013–8030. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09200-5>

**Об авторах:**

**Яков Павлович Скобликов**, аспирант кафедры «Сварки судовых конструкций» Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearchGate](#), [iakov98sp@gmail.com](mailto:iakov98sp@gmail.com)

**Евгений Игоревич Ефимов**, руководитель инжинирингового центра ООО «ТРИНИТЕХ» (88400, Ленинградская обл., Всеволожский р-н, г.п. Свердловское, п. Центральное Отделение, д. 24Б), [SPIN-код](#), [boodoomber@yandex.ru](mailto:boodoomber@yandex.ru)

**Виктор Васильевич Мурзин**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварки судовых конструкций» Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3), [SPIN-код](#), [vik-murzin@mail.ru](mailto:vik-murzin@mail.ru)

**Заявленный вклад авторов:**

**Я.П. Скобликов:** разработка концепции, проведение исследования, разработка методологии, визуализация.

**Е.И. Ефимов:** проведение исследования, предоставление ресурсов, научное руководство.

**В.В. Мурзин:** написание рукописи, внесение замечаний и исправлений.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

**About the Authors:**

**Iakov P. Skoblikov**, Postgraduate student of the Department of Welding of Ship Structures, Saint Petersburg State Marine Technical University (3, Lotsmanskaya, Saint Petersburg, 190121, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearchGate](#), [iakov98sp@gmail.com](mailto:iakov98sp@gmail.com)

**Evgeny I. Efimov**, Head of the Engineering Center of TRINITECH LLC (24B, Central Office, Sverdlovskoye Town, Vsevolozhsk District, Leningrad Region, 188400, Russian Federation), [SPIN-code](#), [boodoomber@yandex.ru](mailto:boodoomber@yandex.ru)

**Viktor V. Murzin**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Welding of Ship Structures, Saint Petersburg State Marine Technical University (3, Lotsmanskaya, Saint Petersburg, 190121, Russian Federation), [SPIN-code](#), [vik-murzin@mail.ru](mailto:vik-murzin@mail.ru)

**Claimed Contributorship:**

**IP Skoblikov:** conceptualization, investigation, methodology, visualization.

**EI Efimov:** investigation, resources, supervision.

**VV Murzin:** writing – review & editing.

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

**All authors have read and approved the final manuscript.**

Поступила в редакцию / Received 23.06.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 21.07.2025

Принята к публикации / Accepted 01.08.2025

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



УДК 004.89

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-221-232>

## Подход к реконструкции модели тела на основе ограниченного набора данных о двигательной активности рук

А.Д. Обухов  , Д.В. Теселкин 

Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация

✉ [obuhov.art@gmail.com](mailto:obuhov.art@gmail.com)

EDN: HLYDVW

### Аннотация

**Введение.** Точная реконструкция модели тела человека крайне важна для визуализации цифровых аватаров в виртуальных тренажерах и реабилитационных системах. Однако использование экзоскелетных систем может привести к перекрытию и экранированию датчиков, что затрудняет работу систем отслеживания. Это подчеркивает актуальность задачи реконструкции модели тела человека на основе ограниченного набора данных о движениях рук, как в сфере реабилитации, так и в спортивной подготовке. Существующие исследования сосредоточены либо на масштабных IMU-сетях, либо на полном видеоконтроле, не рассматривая вопрос реконструкции модели тела на основе данных о движениях рук. Цель данной работы заключается в разработке и тестировании методов машинного обучения, направленных на восстановление координат модели тела с использованием ограниченных данных, например, информации о положении рук.

**Материалы и методы.** Для проведения исследования была сформирована виртуальная имитационная среда, в которой виртуальный аватар выполнял различные движения. Эти движения фиксировались камерами с видом от первого лица и боковой. В качестве эталонных данных сохранялись положения ключевых точек модели тела относительно точки спины. Рассматривалась задача регрессии, целью которой было восстановление положения рук пользователя в полной модели его тела в пяти различных вариациях, включающих координаты ключевых точек, извлеченные из видео и виртуальной сцены. Задача также подразумевала сравнение различных моделей регрессии, среди которых были линейные модели, деревья решений, ансамбли, а также три глубокие нейронные сети (DenseNN, CNN-GRU, Transformer). Точность оценивалась с использованием MAE и среднего Евклидова отклонения сегментов тела. Проведены экспериментальные исследования на пяти наборах данных, размер которых варьировался от 25 до 180 тысяч кадров.

**Результаты исследования.** Эксперименты показали, что ансамбли (LightGBM) наиболее эффективны в большинстве ситуаций. Среди нейросетевых моделей наименьшую погрешность обеспечила модель на базе CNN-GRU. Обучение моделей на последовательности из 20 кадров не дало значительного улучшения. Применение модуля инверсной кинематики на ряде сценариев позволяет снизить погрешность до 3 %, но в ряде случаев ухудшает итоговый результат.

**Обсуждение.** Анализ полученных результатов показал низкую точность реконструкции при использовании наборов данных от компьютерного зрения, а также отсутствие превосходства сложных моделей перед более простыми ансамблями и линейными моделями. Тем не менее, обученные модели позволяют с некоторой погрешностью восстанавливать положение ног пользователя для более достоверного отображения цифровой модели его тела.

**Заключение.** Полученные данные показывают сложность решения задачи реконструкции модели тела человека при использовании ограниченного объема данных, а также большую погрешность у ряда моделей машинного обучения. Сравнение моделей на различных наборах данных показало низкую применимость данных от первого лица, не содержащих информацию о расстоянии до рук. С другой стороны, использование в качестве входной информации абсолютных значений положения рук позволяет осуществить реконструкцию модели тела со значительно меньшей погрешностью.

**Ключевые слова:** реконструкция модели тела человека, машинное обучение, виртуальные тренажеры, ограниченные данные

**Благодарности.** Авторы благодарят руководителя научного проекта М.Н. Краснянского, доктора технических наук, профессора, ректора Тамбовского государственного технического университета за организацию научно-исследовательского процесса.

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Разработка иммерсивной системы взаимодействия с виртуальной реальностью для профессиональной подготовки на основе всенаправленной платформы» ([124102100628-3](https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-221-232)).

**Для цитирования.** Обухов А.Д., Теселкин Д.В. Подход к реконструкции модели тела на основе ограниченного набора данных о двигательной активности рук. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(3):221–232. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-221-232>

Original Empirical Research

## Reconstructing a Full-Body Model from a Limited Set of Upper-Limb Motion Data

Artem D. Obukhov  , Daniil V. Teselkin 

Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation

 [obuhov.art@gmail.com](mailto:obuhov.art@gmail.com)

### Abstract

**Introduction.** Accurate reconstruction of the human body model is required when visualizing digital avatars in virtual simulators and rehabilitation systems. However, the use of exoskeleton systems can cause overlapping and shielding of sensors, making it difficult for tracking systems to operate. This underlines the urgency of the task of reconstructing a human body model based on a limited set of data on arm movements, both in the field of rehabilitation and in sports training. Existing studies focus on either large-scale IMU networks or full video monitoring, without considering the issue of reconstructing a body model based on arm motion data. The objective of this research is to develop and test machine learning methods aimed at reconstructing body model coordinates using limited data, such as arm position information.

**Materials and Methods.** To conduct the study, a virtual simulation environment was created in which a virtual avatar performed various movements. These movements were recorded by cameras with a first-person and side view. The positions of the keypoints of the body model relative to the back point were saved as reference data. The regression task considered was to reconstruct the user's arm positions in a full body model in five different variations, including keypoint coordinates extracted from a video and a virtual scene. The task also involved comparing different regression models, including linear models, decision trees, ensembles, and three deep neural networks (DenseNN, CNN-GRU, Transformer). The accuracy was estimated using MAE and the mean Euclidean deviation of body segments. Experimental studies were conducted on five datasets, whose size varied from 25 to 180 thousand frames.

**Results.** The experiments showed that ensembles (LightGBM) were best-performing in most situations. Among neural network models, the CNN-GRU-based model provided the lowest error. Training models on a sequence of 20 frames did not give significant improvement. Using the inverse kinematics module on a number of scenarios allowed reducing the error to 3%, but in some cases worsened the final result.

**Discussion.** The analysis of the results obtained showed low reconstruction accuracy when using computer vision datasets, as well as the lack of superiority of complex models over simpler ensembles and linear models. However, the trained models allowed, with some error, for the reconstruction of the position of the user's legs for a more reliable display of the digital model of his body.

**Conclusion.** The data obtained showed the complexity of solving the problem of reconstructing a human body model using a limited amount of data, as well as a large error in a number of machine learning models. The comparison of models on different datasets proved low applicability of first-person data that did not contain information on the distance to the arms. On the other part, using absolute values of arm positions as input information provided for the reconstruction of the body model with significantly less error.

**Keywords:** reconstruction of the human body model, machine learning, virtual simulators, limited data

**Acknowledgements.** The authors would like to thank the head of the scientific project, M.N. Krasnyansky, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Rector of TSTU, for organizing the research process.

**Funding Information.** The research is done with the financial support from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the project “Development of an Immersive Virtual Reality Interaction System for Professional Training Based on an Omnidirectional Platform” ([124102100628-3](https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-221-232)).

**For Citation.** Obukhov AD, Teselkin DV. Reconstructing a Full-body Model from a Limited Set of Upper-Limb Motion Data. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(3):221–232. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-221-232>

**Введение.** Виртуальные тренажеры, интегрированные с управляемыми экзоскелетами, позволяют моделировать физические нагрузки и реабилитационные упражнения в контролируемой среде [1]. Для достижения максимального эффекта погружения необходимо точное отслеживание всей кинематики тела пользователя, чтобы сформировать виртуальный аватар, соответствующий реальным движениям человека. Однако верхние экзоскелеты могут перекрывать датчики, требующие прямого визуального контроля (например, HTC Vive Tracker), а также создавать электромагнитные помехи и ограничивать обзор внешних камер, что требует использования дополнительных маркеров [2]. В таких условиях традиционные системы отслеживания, такие как инфракрасные маркеры и множественные камеры захвата, не могут постоянно обеспечивать полный набор данных о положении всех сегментов тела [3]. Таким образом, перед исследователями стоит задача реконструкции полной модели тела на основе ограниченной информации, например, данных о положении рук или кистей.

Одним из возможных решений является использование носимых датчиков, таких как инерциальные измерительные устройства (IMU). Однако для полной реконструкции модели тела требуется достаточное количество сенсоров (не менее 11, а часто и до 18 элементов) [4]; при уменьшении числа сенсоров точность данных резко снижается. В то же время технологии компьютерного зрения активно развиваются и все чаще применяются в системах виртуальной реальности для отслеживания рук и пальцев, что делает задачу реконструкции модели тела по ограниченному набору данных, полученному только от рук пользователя, особенно актуальной [5].

Задача восстановления полной скелетной модели человека по ограниченному набору визуальных данных (например, движений рук) имеет значительное практическое и научное значение. В классических маркерных системах захвата движения использовались инфракрасные камеры и маркеры на суставах, а для безмаркерных решений разрабатываются и успешно внедряются алгоритмы на основе компьютерного зрения. Современные сверточные нейронные сети, такие как OpenPose, BlazePose и MediaPipe Pose, способны обнаруживать 2D положение ключевых точек тела без дополнительных меток [6]. Эти методы эффективно определяют видимые точки (руки, плечи, таз и т. д.), однако без глубинной информации от одиночной камеры расстояние до тела не восстанавливается, что затрудняет полную 3D-реконструкцию модели тела. Решение данной проблемы может быть найдено с помощью применения стереокамер и методов триангуляции [7]. Используя такие подходы, современные модели (например, MediaPipe Pose) могут отслеживать до 33 ключевых точек с погрешностью порядка 1–2 см, что позволяет в реальных условиях получать 3D-координаты основных суставов (например, кистей, локтей, коленей), комбинируя данные с нескольких камер и минимизируя ошибку проекции. Тем не менее, такие системы отслеживания часто оказываются непригодными, если камеры видят лишь руки, и нужно оценивать остальную часть скелета на основании движений кистей без прямого визуального контроля. Это крайне актуально в системах виртуальной реальности, где камеры присутствуют только на шлеме и фиксируют в рабочей зоне лишь кисти пользователя. В связи с этим необходимо рассмотреть существующие подходы к решению данной проблемы.

Основное направление работы над данной задачей включает использование методов на основе регрессии или нейронных сетей, которые способны дополнять позу, опираясь только на частичные данные [4]. Например, регрессионные модели, обученные на видеопарах с частично замаскированными телами и руками, могут восстанавливать отсутствующие части тела в сложных условиях [8, 9]. Это указывает на то, что современные модели действительно способны выводить полную позу тела по частичной визуальной информации о руках. В других исследованиях используются нейросетевые архитектуры, ориентированные на последовательность движений, такие как рекуррентные сети (LSTM/GRU) и особенно Transformer [10, 11]. Например, в работе [12] описывается AvatarPoser — модель на базе трансформера, которая прогнозирует полную 3D-позу тела (включая ноги и туловище) по положению головы и рук. Эта система извлекает глубокие признаки из поступающих сигналов движений и разделяет глобальное перемещение тела и локальные ориентации суставов. Для точного согласования позы также производится оптимизация конечностей с использованием метода обратной кинематики [12]. Более того, идея улучшения устойчивости предсказаний при отсутствии видимости реализована в модели EgoPoser, которая также опирается на механизмы Transformer для учета прерывистых данных о движении рук, обеспечивая стабильные предсказания [13]. Стоит отметить, что обучение таких моделей требует разметки полных поз, что приводит к необходимости использовать большие датасеты, такие как Human3.6M, CMU MoCap/AMASS, MPI-INF-3DHP и другие, где имеется синхронизированное видео и 3D-скелет [14, 15]. Однако существующих датасетов, сопоставляющих вид от первого лица с полной моделью тела, недостаточно, что делает задачу сбора и сопоставления таких данных весьма актуальной. Формирование такого датасета можно организовать, воссоздавая движения человека в виртуальной сцене, где можно гибко настроить положение виртуальных камер для записи видео и получить точные координаты точек тела с необходимой частотой [4].

В данном исследовании основным предметом для внедрения полученных научных результатов рассматривается система виртуального тренажера на основе верхнего управляемого экзоскелета. Современные модели VR-шлемов ориентированы на позиционирование по камерам, предполагая, что основной источник информации о движении рук будет поступать от встроенной камеры шлема, используемой для распознавания рук. Кроме того, для расширения экспериментальной базы и выявления закономерностей в движениях человека предполагается наличие внешней системы кадрового захвата, фиксирующей положение тела пользователя в целом. Целью данной работы является

разработка и тестирование методов машинного обучения для восстановления координат тела на основе частичных данных о положении рук. Завершая исследование, планируется сравнение как классических регрессионных моделей, так и нейросетевых, включая современные архитектуры, основанные на механизмах внимания, что позволит оценить преимущества каждого подхода в различных экспериментальных сценариях.

**Материалы и методы.** Сначала была рассмотрена процедура сбора и первичной обработки данных. Данные собирались в виртуальной среде, где имитировался процесс использования VR-шлема с камерой; все данные (вид от первого лица, вид с боковой камеры) отслеживались виртуальными камерами. Далее видео обрабатывались моделями библиотеки MediaPipe, что позволяло осуществить детекцию рук для выделения 21 ключевой точки ладони, а также извлечь с боковой виртуальной камеры данные о 33 ключевых точках модели тела. Параллельно в виртуальном пространстве фиксировались «истинные» метрические координаты всех сегментов тела (18 ключевых точек стандартной цифровой модели аватара, заданной в игровом движке Unity), включая точки положения рук. Эти реальные координаты (эталон) формировали целевой набор  $Y$  для большинства сценариев. Использование виртуальной камеры позволяло обойти ограничения с физическими сенсорами и получить эталонную информацию о позе тела. MediaPipe был выбран в качестве основного фреймворка трекинга рук благодаря модульной системе графов обработки и готовым ML-моделям (детектор ладони и полная модель тела). Ввели сокращение «CV» для тех данных, что были получены в ходе обработки компьютерным зрением и моделями MediaPipe (обозначим как  $cx_i, cy_i, cz_i$ ), а под «эталонном» понимали метрические координаты точек тела (обозначим как  $vx_i, vy_i, vz_i$ ), записанные в виртуальной сцене относительно спины пользователя.

Далее рассмотрели процедуру подготовки данных для различных сценариев регрессии. Для анализа моделей машинного обучения и их возможностей были сформированы пять наборов данных (экспериментов), различающихся тем, какие признаки  $X$  использовались и какие целевые переменные  $Y$  предсказывались:

1) Набор 1 «Руки (вид от первого лица) → Руки (эталон)»:  $X = \{(cx_i, cy_i, cz_i)\} \in \mathbb{R}^{63}, i = 1-21$  — координаты ключевых точек рук при виде от первого лица (63 значения),  $Y = \{(vx_i, vy_i, vz_i)\} \in \mathbb{R}^{18}, i = 1-6$  — метрические координаты тех же точек рук (18 значений).

2) Набор 2 «Руки (вид от первого лица) → Тело (эталон)»:  $X = \{(cx_i, cy_i, cz_i)\} \in \mathbb{R}^{63}, i = 1-21$  — координаты рук (полученные из вида от первого лица, 63 значения),  $Y = \{(vx_i, vy_i, vz_i)\} \in \mathbb{R}^{54}, i = 1-18$  — метрические координаты всех точек тела (54 значения). Таким образом осуществляется полная реконструкция тела по данным рук.

3) Набор 3 «Руки (вид от первого лица) → Тело (CV)»:  $X = \{(cx_i, cy_i, cz_i)\} \in \mathbb{R}^{63}, i = 1-21$  — координаты рук (вид от первого лица на основе CV, 63 значения),  $Y = \{(vx_i, vy_i, vz_i)\} \in \mathbb{R}^{99}, i = 1-33$  — координаты 33 точек тела из дополнительного видео сбоку (99 значений). Отличается от предыдущей задачи тем, что регрессии осуществляются исключительно по CV данным.

4) Набор 4 «Тело (CV) → Тело (эталон)»:  $X = \{(cx_i, cy_i, cz_i)\} \in \mathbb{R}^{99}, i = 1-33$  — координаты точек тела (вид с боковой камеры, 99 значений),  $Y = \{(vx_i, vy_i, vz_i)\} \in \mathbb{R}^{54}, i = 1-18$  — метрические координаты всех точек тела (54 значения). Задача состоит в проверке точности прямого преобразования данных от CV в метрические величины 18 ключевых точек.

5) Набор 5 «Руки (эталон) → Тело (эталон)»:  $X = \{(vx_i, vy_i, vz_i)\} \in \mathbb{R}^{18}, i = 1-6$  — метрические координаты точек рук (18 значений),  $Y = \{(vx_i, vy_i, vz_i)\} \in \mathbb{R}^{54}, i = 1-18$  — метрические координаты всего тела (54 значения). От набора 2 отличается тем, что используются только эталонные данные, таким образом, проверяется сам факт реконструкции движения по ограниченному набору точек.

Далее рассмотрим модели, используемые для решения указанных пяти задач регрессии. Архитектуры всех моделей в различных задачах будут схожи; отличия для каждого набора заключаются лишь в размерности входа и выхода. В общей сложности рассматриваются два класса моделей: классические регрессионные модели из библиотеки Scikit-Learn (а также модели XGBoost и LightGBM) и нейросетевые модели на базе фреймворка Keras [16, 17].

К классическим моделям относятся: линейная регрессия (LinearRegression), ElasticNet (с L1/L2-регуляризацией), ансамбли деревьев (RandomForestRegressor, HistGradientBoostingRegressor), бустинг (XGBRegressor, LightGBMRegressor) и KNN-регрессор. Поскольку целевая переменная включает несколько выходов (координаты точек), модели обернуты в MultiOutputRegressor, что позволяет одновременно предсказывать все параметры. Все древовидные модели настроены на 100 деревьев и глубину, равную 5, в то время как бустинговые модели имеют learning\_rate = 0,05.

Далее рассмотрим нейросетевые архитектуры. Полносвязная сеть (обозначим как DenseNN). Входной слой соответствует размерности признаков  $X$  (здесь и далее зависит от набора данных), за ним располагаются 4 полносвязных слоя: 256, 512, 1024 и 128 нейронов с активацией ReLU и слоями разреживания Dropout (25 %). Модель завершается выходным слоем размерностью  $Y$  (также зависит от набора данных). Используется нормализация пакетов (BatchNorm) и оптимизатор Adam ( $lr = 1e-3$ ) с функцией потерь MSE.

Сверточно-рекуррентная сеть (CNN-GRU). После входного слоя применяются 1D-свертка (128 фильтров, kernel = 3) и BatchNormalization. Далее следует слой GRU (128 единиц) с возвратом последовательности. Реализован механизм внимания: плотный слой с активацией tanh над выходом GRU выдает веса кадров, которые затем с помощью softmax перемножаются с выходом GRU и суммируются. Затем идут полносвязный слой из 128 нейронов с активацией ReLU и Dropout (30 %), после чего следует выходной слой. Оптимизатор Adam ( $lr = 1e-3$ ) с функцией потерь MSE.

Трансформер (Transformer). В начале применяются несколько 1D-сверток ( $\text{kernel} = 3$ ,  $\text{dilation\_rate} = 1, 2$  и  $4$ ) для создания локального контекста, затем добавляется слой Squeeze-and-Excite для адаптивной фильтрации каналов [18]. Далее вводятся обучаемые позиционные эмбединги и 3 энкодерных блока трансформера, в каждом из которых реализована MultiHeadAttention (4 головы, ключ размером  $64/4$ ), последующее суммирование и нормализация, а затем двухслойная плотная сеть (размер  $256, 64$ ) с Dropout — снова суммирование и нормализация. После энкодеров производится GlobalAveragePooling1D, затем полносвязная прослойка из 128 нейронов с активацией ReLU и Dropout (25 %), после чего следует линейный выход. Оптимизатор Adam ( $\text{lr} = 1e-3$ ) с функцией потерь MSE.

На основании проведенного обзора и имеющегося опыта в данной области можно предложить подход к решению рассматриваемых задач регрессии. Формируется датасет анимации типовых движений человека, который применяется к виртуальному аватару в имитационной сцене. Движения записываются с помощью нескольких виртуальных камер: одна из них расположена на уровне глаз аватара (вид от первого лица), а вторая наблюдает за ним сбоку (боковая камера), охватывая его во весь рост. Дополнительно фиксируются метрические значения 18 точек модели тела. Итоговый вид данных для каждого источника представлен на рис. 1.

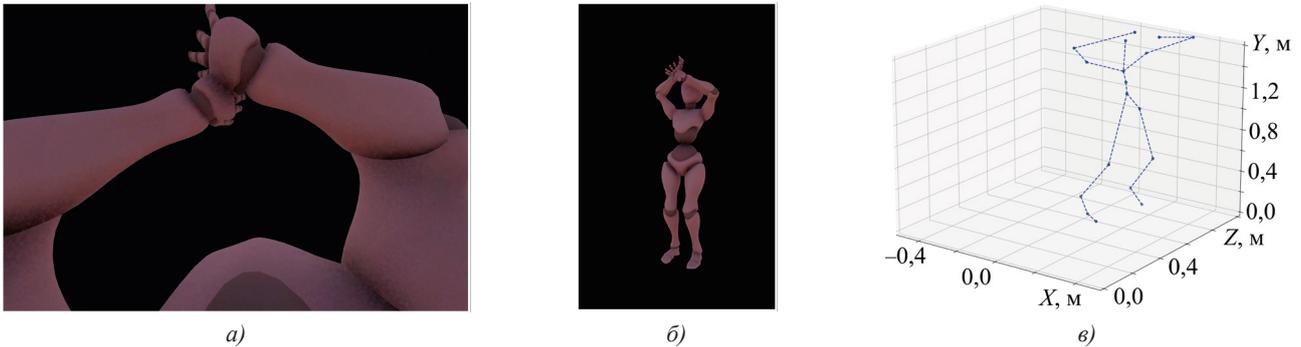


Рис. 1. Исходные данные: *а* — кадр с камеры от первого лица; *б* — кадр с боковой камеры; *в* — скелет, построенный по эталонным данным

Видеоданные обрабатываются соответствующими моделями (MediaPipe Pose/Hands), после чего координаты точек сохраняются в массивы. Затем в рамках предлагаемого подхода осуществляется обучение моделей машинного обучения, которые на основе одних исходных данных (например, информации о руках) формируют полную 3D-конфигурацию тела. После прогнозирования позы можно дополнительно скорректировать локтевые и коленные суставы, чтобы длины сегментов и положения конечностей лучше соответствовали сигнатурам рук. Также для оценки вклада временного контекста в точность решения задачи реконструкции предлагается провести дополнительный эксперимент по решению задачи регрессии для каждого набора не по данным одного кадра, а некоторой последовательности из  $N$ -кадров.

В рамках данной работы не будет сделан акцент на коррекции модели тела после реконструкции на основе правил обратной кинематики. Основная цель заключается в обучении и сравнении набора регрессоров (линейные, древовидные, KNN модели) и нейросетей (DenseNN, CNN-GRU и Transformer) для определения наиболее точной модели. Выбор осуществляется по метрикам средней абсолютной ошибки (MAE), суммарного отклонения (евклидово расстояние) по всем точкам модели от эталонных, а также по оценке вычислительной сложности (времени прогнозирования). Это позволит решить задачу реконструкции модели тела на основе ограниченного набора информации о движениях рук. Кроме того, в рамках экспериментального раздела будут рассмотрены и другие варианты регрессии. Расчет будет производиться по следующим формулам:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|$$

$$\Delta = \frac{1}{MJ} \sum_{n=1}^M \sum_{j=1}^J \|y_{n,j} - \hat{y}_{n,j}\|, \quad \|v\| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2},$$

где  $y_i$  — истинное значение;  $\hat{y}_i$  — прогноз модели,  $N$  — число сравниваемых значений,  $M$  — число кадров;  $J$  — число суставов (ключевых точек),  $y_{n,j}, \hat{y}_{n,j} \in \mathbb{R}^3$  — истинный и предсказанный 3-D вектор позиции  $j$ -го сустава в  $n$ -м кадре.

**Результаты исследования.** В соответствии с описанной методикой был осуществлён сбор данных по 11 типам различной сложной анимации, включая перемещения тела, прыжки и активные движения. Девять типов использовались для обучения, а два — для валидации (данные из них не участвовали в процессе обучения). Общий объём составил 239 968 записей, однако на каждом этапе проводилась фильтрация и отбор записей в случае, если один из источников не возвращал корректные значения (чаще всего это касалось получения координат рук с

помощью компьютерного зрения). Таким образом, для наборов 1–3 было отобрано 25 и 8 тысяч записей для тренировки и валидации, для наборов 4 и 5 — 183 и 56 тысяч соответственно. В процессе обучения тренировочная выборка была дополнительно разделена в соотношении 75/25. Размерность данных по каждому эксперименту была указана выше при описании соответствующих наборов. На рис. 2 представлены сравнительные результаты всех моделей по всем наборам данных по метрике MAE, на рис. 3 — по метрике суммарного отклонения, на рис. 4 — сравнение моделей по времени вычисления одного прогноза. Далее сравним полученные результаты.

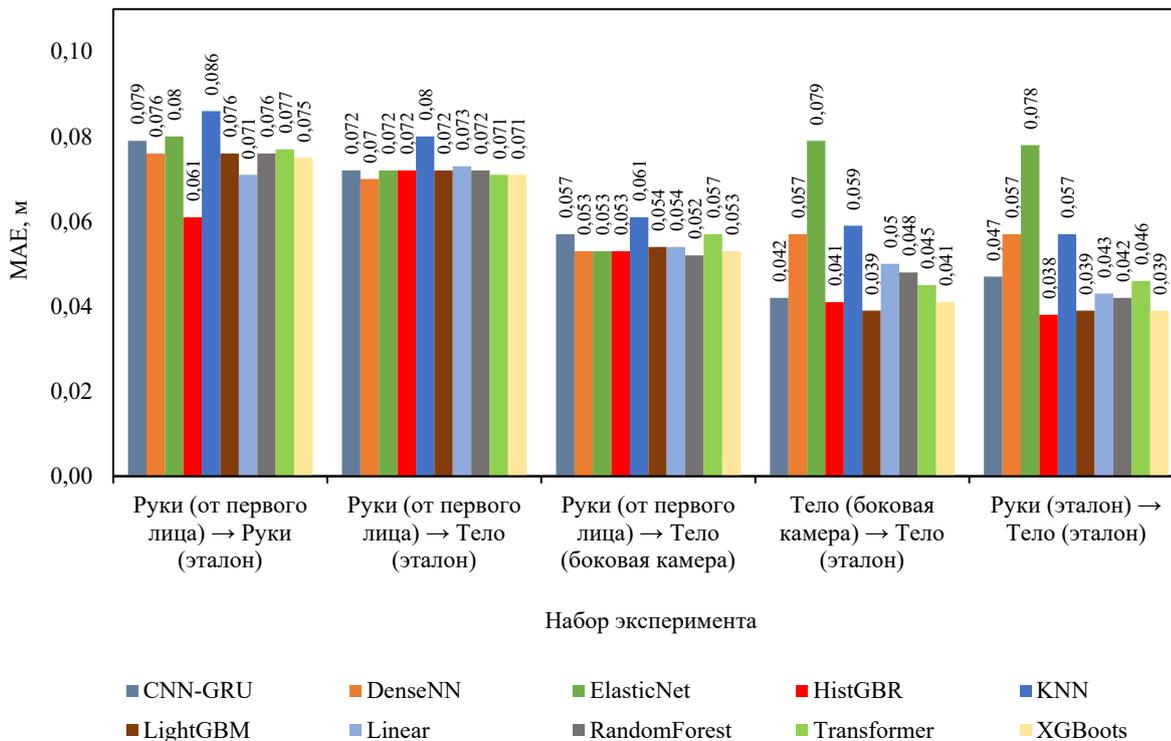


Рис. 2. Сравнение моделей по метрике MAE

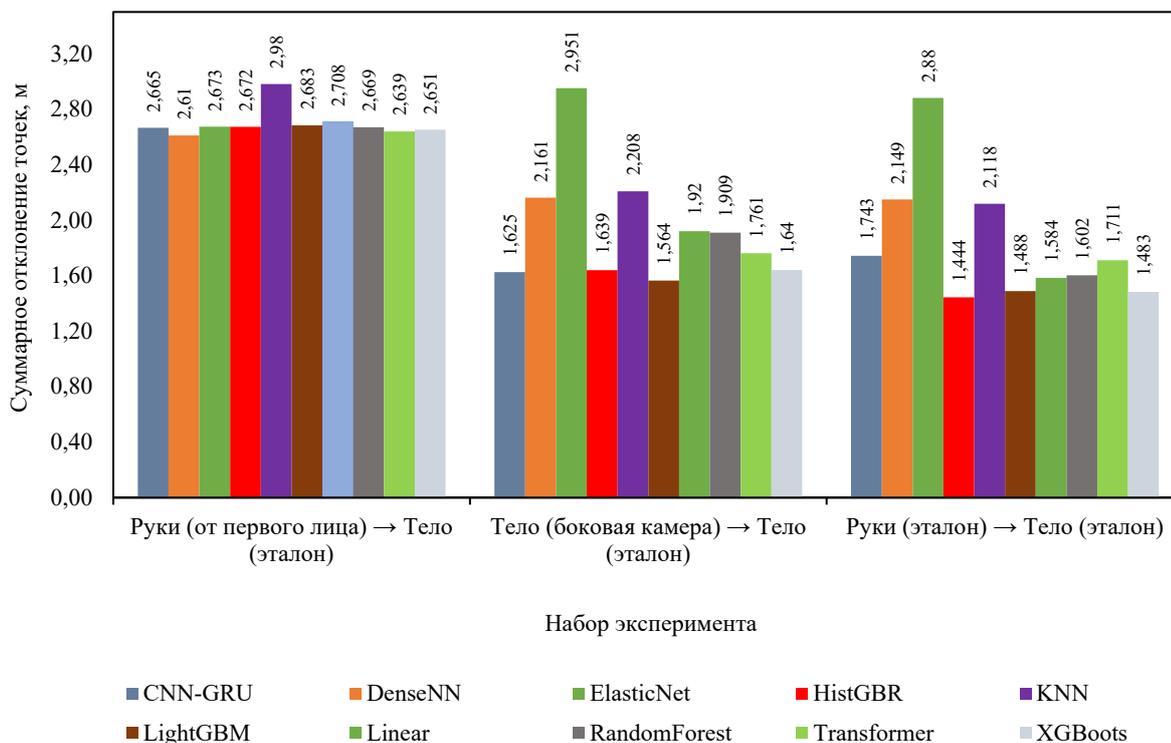


Рис. 3. Сравнение моделей по суммарному отклонению

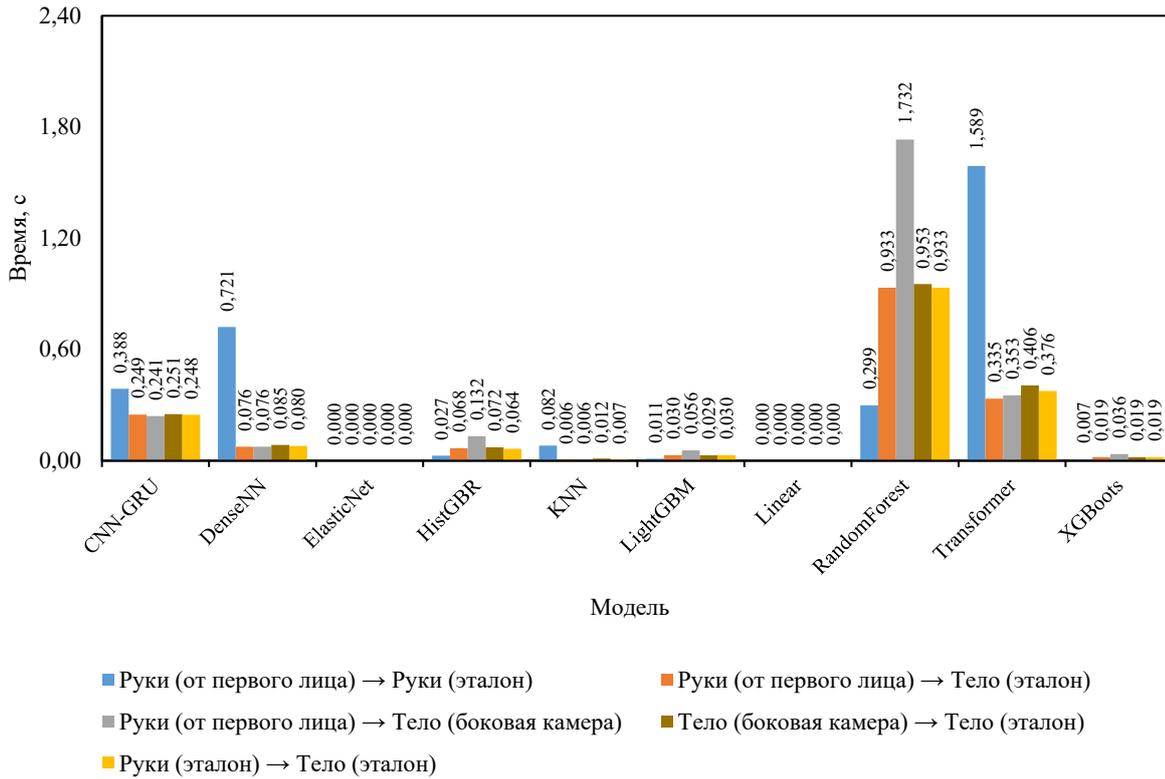


Рис. 4. Сравнение моделей по производительности

Анализ полученных данных показал неоднородность поведения моделей при смене источника входной информации и на различных метриках. В большинстве сценариев наименьшую погрешность по MAE демонстрируют градиентные ансамбли (HistGBR, LightGBM, XGBoost и RandomForest). Нейросетевые модели показывают себя хуже, особенно если учесть сложные задачи реконструкции тела на основе данных о руках (CV). Тем не менее, если оценивать все модели по MAE, то однозначного лидера выделить не удастся. С другой стороны, суммарное отклонение всех точек (рис. 3) значительно проясняет ситуацию при решении трех задач регрессии. Наблюдается превосходство ансамблей, как и в предыдущем случае, но среди нейросетевых моделей наилучшей оказывается CNN-GRU. Полученные значения суммарного отклонения, находящиеся в диапазоне от 1,4 до 3,5 метров, свидетельствуют о низкой эффективности решения задачи регрессии всеми моделями, особенно на наборе «Руки (вид от первого лица) → Тело (эталон)». Оценивая производительность моделей по времени вычисления, можно отметить, что классические модели машинного обучения (линейные и ансамбли) обладают достаточной производительностью для использования в режиме реального времени. В то же время CNN-GRU, Transformer и особенно Random Forest крайне затратны по вычислениям, что делает их применимыми только в офлайн-системах (не реального времени). Для DenseNN часто наблюдается длительный расчет при первом вызове модели.

Принимая во внимание имеющийся опыт в задачах реконструкции тела, важно оценивать модели не только по указанным метрикам, но и визуально. Для этого будет осуществлена реконструкция скелетов тела по наборам 2, 4 и 5 с использованием моделей LightGBM и CNN-GRU. Данное сравнение (рис. 5) позволит оценить, как наиболее точная архитектура (LightGBM) визуально отличается от более сложной (CNN-GRU).

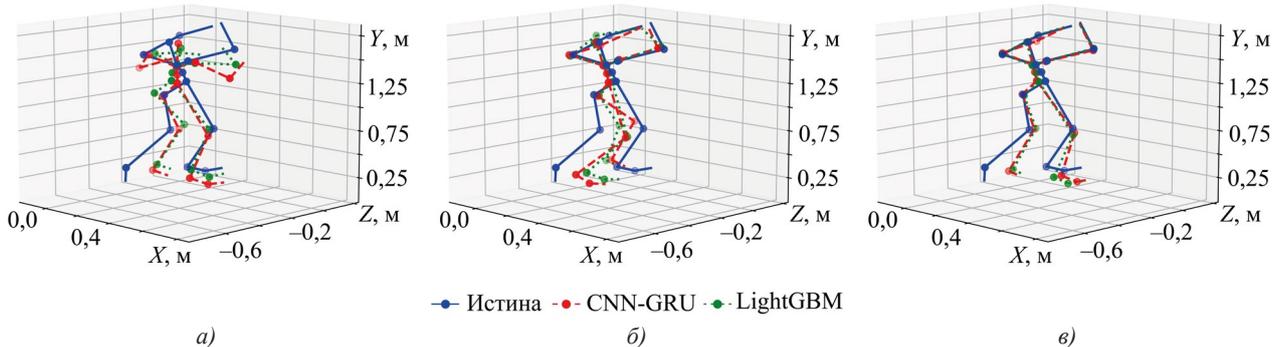


Рис. 5. Визуальное сравнение моделей CNN-GRU и LightGBM: а — на наборе «Руки (вид от первого лица) → Тело (эталон)»; б — на наборе «Тело (CV) → Тело (эталон)»; в — на наборе «Руки (эталон) → Тело (эталон)»

Визуальное сравнение демонстрирует, что между данными CV и реальным положением существует заметная разница, поскольку камера от первого лица не способна точно определить реальную глубину и расстояние до рук. Это приводит к приближенному расположению верхних частей тела (первый график — рис. 5). При использовании данных всего тела CV также наблюдается значительная погрешность, хотя поза в известной степени совпадает. Третий набор, основанный на данных о руках из эталона (что может быть достигнуто путём извлечения координат контроллеров виртуальной реальности или датчиков абсолютного положения), показывает, что верхняя часть тела реконструируется достаточно точно, тогда как ноги — лишь приблизительно, с большой погрешностью. Таким образом, для всех трёх наборов и обеих моделей можно говорить лишь о приближенной реконструкции, что в целом соответствует результатам метрик суммарного отклонения на рис. 3.

Далее был проведён эксперимент по обучению перечисленных моделей не на единственном кадре, а на последовательности из 20 кадров. Это позволяет выявить некоторые динамические характеристики и увеличить объём исходной информации. Поскольку определяющей метрикой, как показало визуальное сравнение, является суммарное отклонение, рассмотрим только его (рис. 6). В целом, использование последовательности кадров незначительно снизило суммарное отклонение; некоторые модели даже показали худшие результаты. С визуальной точки зрения (рис. 7) наблюдается определённое улучшение у модели LightGBM, когда качество восстановления значительно возросло, даже при реконструкции тела на основе данных рук (вид от первого лица). Это касается и двух других наборов данных. Однако для нейросетевой модели в целом значительных улучшений не выявлено.

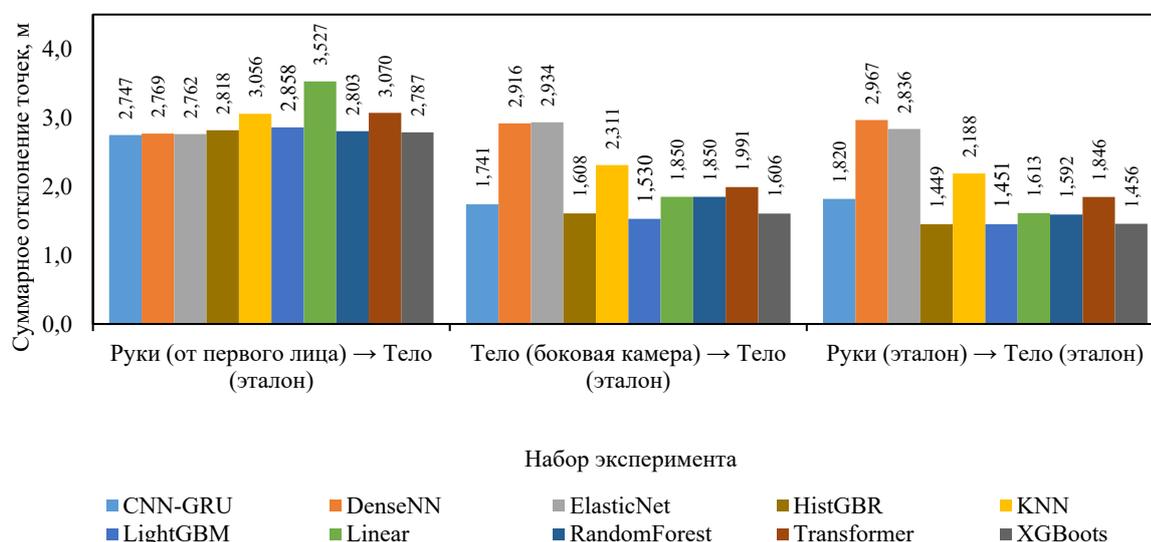


Рис. 6. Сравнение моделей по суммарному отклонению (при обучении на последовательности кадров)

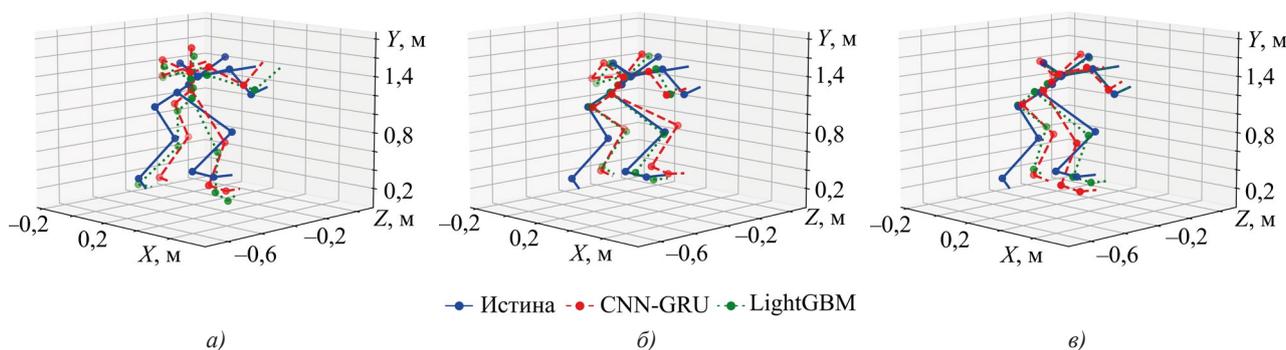


Рис. 7. Визуальное сравнение моделей CNN-GRU и LightGBM (при обучении на последовательности кадров): а — на наборе «Руки (вид от первого лица) → Тело (эталон)»; б — на наборе «Тело (CV) → Тело (эталон)»; в — на наборе «Руки (эталон) → Тело (эталон)»

В завершение эксперимента был проведён опыт по внедрению корректировки точек на основе модели инверсной кинематики (ИК). Для этого, после прогнозирования точек тела с использованием моделей машинного обучения, применялся разработанный модуль инверсной кинематики, который сначала корректирует конечные звенья (кисти и стопы) методом FABRIK [19, 20] с учётом угловых ограничений локтей и коленей. Затем модуль перераспределяет возникшие смещения между тазом и грудным отделом, автоматически выравнивая ось позвоночника. Результаты работы данного модуля представлены на рис. 8.

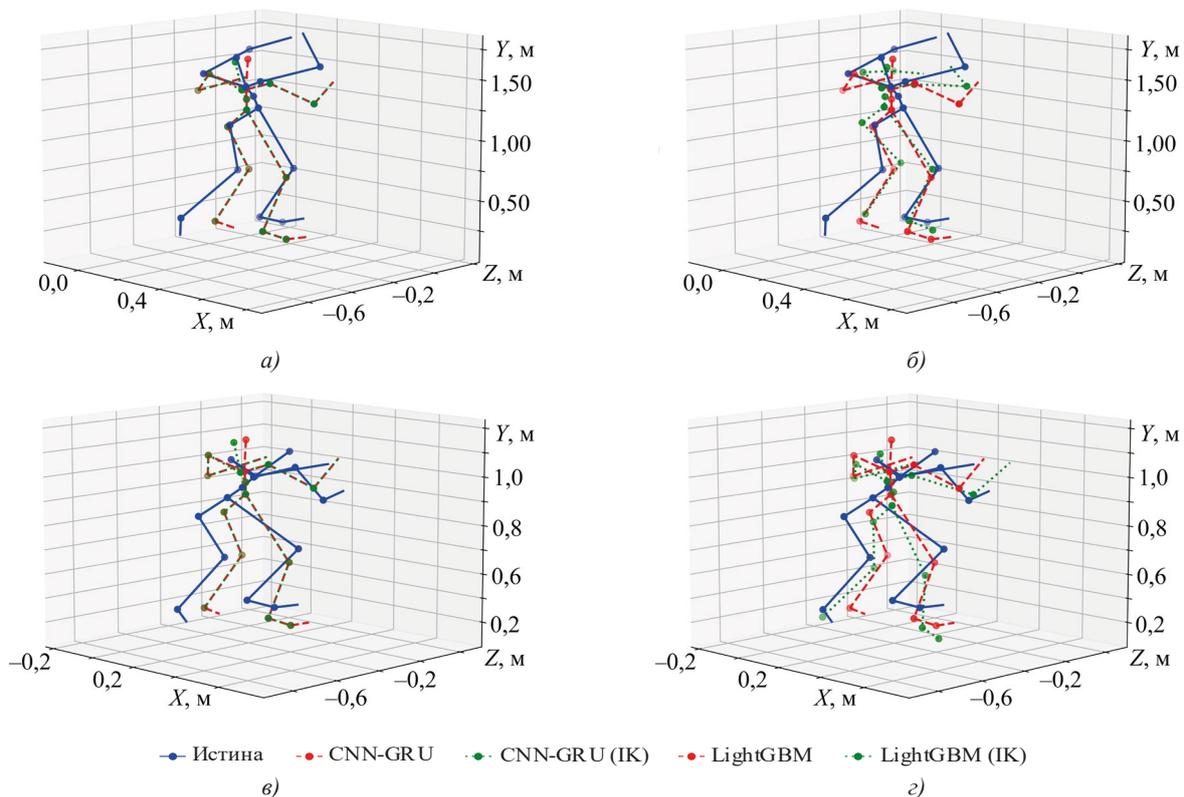


Рис. 8. Визуальное сравнение моделей без и с коррекцией модулем инверсной кинематики (с указанием суммарного отклонения до и после коррекции) на наборе «Руки (вид от первого лица) → Тело (эталон)»: а — CNN-GRU (до = 3,511, после = 3,436 м); б — LightGBM (до = 3,183, после = 3,112 м); в — CNN-GRU на последовательности кадров (до = 2,952, после = 2,991 м); г — LightGBM на последовательности кадров (до = 3,261, после = 3,306 м)

Полученные визуализации и численные оценки демонстрируют, что внедрение предложенной двухпроходной инверсной кинематики в целом снижает суммарное евклидово отклонение суставов от эталона для одиночных кадров, однако эффект варьируется в зависимости от типа модели и позиции тела. В первом эксперименте для модели CNN-GRU суммарное отклонение уменьшилось с 3,511 до 3,436 метров, а для LightGBM — с 3,183 до 3,112 метров, что соответствует улучшению примерно на 2–3 %. Графически это проявляется в более естественном выравнивании головы и уменьшении «перегибов» в локтях и коленях. Во втором эксперименте, основанном на 20 кадрах и другой анимации, наблюдается иная картина: для CNN-GRU ошибка возросла с 2,952 до 2,991 метров, а для LightGBM — с 3,261 до 3,306 метров. Замечено, что процедура коррекции стремится выпрямить скелет, что в данном случае только усугубляет ситуацию. Это указывает на то, что геометрические ограничения, примененные постфактум, могут улучшить статическую анатомическую правдоподобность, но в сложной анимации ухудшать текущую позу.

**Обсуждение.** Проведенное исследование выявило несколько закономерностей. Во-первых, реконструкция полной модели тела на основе ограниченного набора данных возможна, особенно когда исходные и выходные данные получены из одного источника, что подтверждается качественной реконструкцией модели тела по положению рук. Однако выявлены значительные проблемы в восстановлении положения ног пользователя, так как недостаточно информации о движениях рук для прогнозирования сложной анимации. В-третьих, использование положения рук из видеопотока от первого лица, полученное с помощью компьютерного зрения, для реконструкции полной модели тела приводит к высокой погрешности из-за отсутствия данных о расстоянии до рук, имея лишь их положение относительно глаз пользователя. Предварительная обработка данных, смоделированных в виртуальной среде, также показала трудности с распознаванием рук при сложной анимации, что негативно сказалось на процессе обучения.

При сравнении различных архитектур машинного обучения в рамках данной задачи стоит отметить, что более простые линейные модели демонстрируют хорошие результаты в прогнозировании положения сегментов тела, поскольку между исходными и выходными данными существуют четкие зависимости, которые можно аппроксимировать этими моделями. Сложные нейросетевые модели также решают аналогичную задачу, показывая большую гибкость в работе с комплексными входными данными, однако они не отличаются высокой производительностью, а процесс их обучения затратен. В визуальном сравнении нейросетевые модели не продемонстрировали высокой эффективности, показывая результаты, сравнимые или даже худшие.

Проведенный эксперимент показывает, что использование сильно ограниченного по информационной ценности источника данных (информация о положении рук от системы компьютерного зрения является именно таким источником) приводит к значительной погрешности в решении задачи регрессии. Во-первых, объект отслеживания часто выходит из поля зрения и не распознается моделью (это явно видно в снижении объема данных для обучения в наборах 1 и 2). Во-вторых, отсутствие корректных данных о глубине, т.е. расстоянии до рук, затрудняет их абсолютное позиционирование. В системах виртуальной реальности этот аспект нивелируется за счет триангуляции с использованием данных нескольких камер, однако в рамках проведенного моделирования нейросетевая модель для распознавания рук не отражала корректные координаты по оси  $Z$ . Потенциальным решением проблемы и темой следующего исследования могло бы стать получение данных непосредственно с шлемов виртуальной реальности, оснащенных интегрированными камерами, что расширило бы обучающую выборку за счет данных о естественных движениях и обеспечило бы более качественный захват рук в виртуальном кадре, поскольку система захвата шлема могла бы возвращать координаты в метрическом пространстве для цифровой модели, предоставляя набор типа 5 («Руки (эталон) → Тело (эталон)»).

Анализируя актуальность исследования в рамках предметной области, следует сравнить его с существующими работами. Главным отличием является ограничение на использование данных о движениях рук, так как более точным подходом считается использование не менее 5 точек тела для дальнейшей реконструкции [21]. Это подтверждают и наши предыдущие исследования [4], в которых оптимальным количеством точек для реконструкции указано не менее 5–7, полученных с использованием эталонной системы отслеживания.

Важно отметить, что во многих VR-приложениях и играх внедряется система отслеживания, основанная только на контроллерах и шлеме, с последующей реконструкцией упрощенного положения тела с использованием алгоритмов инверсной кинематики, что позволяет распространять движение рук на все тело. Как подчеркивают авторы [21], в таких системах одни и те же показания датчиков, расположенных на руках, могут соответствовать множеству разных полных поз, что указывает на необходимость дополнительной настройки инверсной кинематики, чтобы избежать артефактов, а обученные модели должны подбирать правдоподобный вариант. Поэтому сложность задачи без дополнительных источников информации о положении ног или туловища остается высокой. Проведенное исследование подчеркивает данную проблему, указывая на необходимость поиска и сбора дополнительных источников информации для достижения, как минимум, отображения «Руки (эталон) → Тело (эталон)», а в идеале — для распознавания всей траектории движения, что поможет более точно спрогнозировать положение других частей тела. Перспективным направлением здесь может быть использование не только предобученных нейронных сетей (например, MediaPipe), но и захват всей информации об окружающем мире, что позволит лучше сегментировать руки, а, возможно, туловище и ноги пользователя.

Еще одним ограничением проведенного исследования является отсутствие оценки влияния размера обучающей выборки на качество моделей. В данной работе были собраны данные 11 различных типов анимации, для валидации использовались два дополнительных типа, но учитывая объемы и вариативность движений, набор должен быть значительно больше. Тем не менее, исследование ставило целью сравнение моделей в рамках заданной задачи, что продемонстрировало неоднозначность их эффективности по сравнению с классическими линейными моделями и ансамблями. Это также указывает на необходимость дальнейшего улучшения архитектуры моделей.

Наконец, этап коррекции модели тела на основе кинематической модели, реализованный через наложение анатомических ограничений и переоценку позы, дал неоднозначные результаты — на одной позе это снизило суммарное отклонение, а на другой, наоборот, увеличило. С другой стороны, следует учитывать, что модуль инверсной кинематики должен работать с уже искаженными данными о руках и голове в случае набора 1, поэтому переход к более качественному набору данных может снизить погрешность в модуле кинематики.

**Заключение.** Таким образом, в результате проведенных исследований был разработан подход к прогнозированию модели тела на основе ограниченного набора точек, включающий этапы обработки данных, решения задач регрессии и применения модуля инверсной кинематики для корректировки модели тела. Проведены соответствующие экспериментальные исследования, которые показали, что модели типа LightGBM (среди ансамблей) и CNN-GRU с механизмом внимания (среди нейросетевых моделей) продемонстрировали наилучшие результаты по выбранным метрикам. Сравнение также показало низкую точность реконструкции модели тела при использовании моделей (ElasticNet, KNN, DenseNN), что свидетельствует о их слабой обобщающей способности. В ходе визуального сравнения выявлены противоречия в качестве реконструкции скелета при выполнении сложной анимации, поскольку положение рук недостаточно для определения положения ног и головы. Кроме того, применение коррекции на основе инверсной кинематики не всегда обосновано для сложных поз, так как наложение анатомических ограничений и переоценка позы могут приводить к дополнительным искажениям.

Сравнение разработанных моделей также позволяет сделать выводы о степени их применимости: модели, обученные на наборе данных от первого лица, не позволяют достоверно реконструировать модель тела, показывая высокую визуальную погрешность, что ограничивает их использование только теоретическим сравнением; в то время как модели, обученные на реальных положениях рук (набор 5), показывают более достоверные прогнозы положения тела, что может быть востребовано в виртуальных тренажерах без достаточного набора датчиков. Поскольку модели, обученные на наборе 5, работают с абсолютными положениями рук, это обеспечивает их универсальность при выборе системы отслеживания, так как данные о положении рук могут быть получены не только с помощью системы компьютерного зрения, но и контроллеров виртуальной реальности или инерциальных датчиков, отслеживающих положение рук.

Данное исследование формирует несколько направлений для дальнейшей работы в рамках задачи реконструкции модели тела. Проведенные сравнительные эксперименты моделей машинного обучения показали, что для успешного решения поставленной задачи необходим сбор большего объема информации о движениях человека, расширение датасета и реализация более эффективных моделей обучения с большей обобщающей способностью.

### Список литературы / References

1. Tiboni M, Borboni A, Vèrité F, Bregoli Ch, Amici C. Sensors and Actuation Technologies in Exoskeletons: A Review. *Sensors*. 2022;22(3):884. <https://doi.org/10.3390/s22030884>
2. Vélez-Guerrero MA, Callejas-Cuervo M, Mazzoleni S. Artificial Intelligence-Based Wearable Robotic Exoskeletons for Upper Limb Rehabilitation: A Review. *Sensors*. 2021;21(6):2146. <https://doi.org/10.3390/s21062146>
3. Zihe Zhao, Jiaqi Wang, Shengbo Wang, Rui Wang, Yao Lu, Yan Yuan, et al. Multimodal Sensing in Stroke Motor Rehabilitation. *Advanced Sensor Research*. 2023;2(9):2200055. <https://doi.org/10.1002/adrs.202200055>
4. Obukhov A, Dedov D, Volkov A, Teselkin D. Modeling of Nonlinear Dynamic Processes of Human Movement in Virtual Reality Based on Digital Shadows. *Computation*. 2023;11(5):85. <https://doi.org/10.3390/computation11050085>
5. Kuan Cha, Jinying Wang, Yan Li, Longbin Shen, Zhuoming Chen, Jinyi Long. A Novel Upper-Limb Tracking System in a Virtual Environment for Stroke Rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2021;18:166. <https://doi.org/10.1186/s12984-021-00957-6>
6. Jen-Li Chung, Lee-Yeng Ong, Meng-Chew Leow. Comparative Analysis of Skeleton-Based Human Pose Estimation. *Future Internet*. 2022;14(12):380. <https://doi.org/10.3390/fi14120380>
7. 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>
8. Islam MdM, Nooruddin Sh, Karray F, Muhammad G. Human Activity Recognition Using Tools of Convolutional Neural Networks: A State-of-the-Art Review, Data Sets, Challenges, and Future Prospects. *Computers in Biology and Medicine*. 2022;149:106060. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2022.106060>
9. Obukhov A, Dedov D, Volkov A, Rybachok M. Technology for Improving the Accuracy of Predicting the Position and Speed of Human Movement Based on Machine-Learning Models. *Technologies*. 2025;13(3):101. <https://doi.org/10.3390/technologies13030101>
10. Титаренко Д.Ю., Ръжкова М.Н. Возможности использования нейросетей для распознавания ошибок при выполнении физических упражнений. *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2024;(3):62–72. <https://doi.org/10.24412/2221-2574-2024-3-62-72>
- Titarenko DYU, Ryzhkova MN. Possible Neural-Network Use for Error Recognition during Physical Exercising. *Radio Engineering and Telecommunications Systems*. 2024;(3):62–72. <https://doi.org/10.24412/2221-2574-2024-3-62-72>
11. Hung Le Viet, Han Le Hoang Ngoc, Khoa Tran Dinh Minh, Son Than Van Hong. A Deep Learning Framework for Gym-Gesture Recognition Using the Combination of Transformer and 3D Pose Estimation. *Cybernetics and Physics*. 2024;13(2):161–167. <https://doi.org/10.35470/2226-4116-2024-13-2-161-167>
12. Jiayi Jiang, Paul Strelí, Huajian Qiu, Andreas Fender, Larissa Laich, Patrick Snape, et al. AvatarPoser: Articulated Full-Body Pose Tracking from Sparse Motion Sensing. In book: Avidan S, Brostow G, Cissé M, Farinella GM, Hassner T (eds). *Computer Vision — ECCV 2022*. Cham: Springer; 2022. P. 443–460. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-20065-6\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-031-20065-6_26)
13. Jiayi Jiang, Paul Strelí, Manuel Meier, Christian Holz. EgoPoser: Robust Real-Time Egocentric Pose Estimation from Sparse and Intermittent Observations Everywhere. In book: Leonardi A, Ricci E, Roth S, Russakovsky O, Sattler T, Varol G (eds). *Computer Vision — ECCV 2024*. Cham: Springer; 2024. P. 277–294. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-72627-9\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-031-72627-9_16)
14. Baradel F, Groueix Th, Weinzaepfel Ph, Brégier R, Kalantidis Y, Roges G. Leveraging MoCap Data for Human Mesh Recovery. In: *Proc. IEEE/CVF Conference on 3D Vision (3DV)*. New York City: IEEE; 2021. P. 586–595. <https://doi.org/10.1109/3DV53792.2021.00068>
15. Seong Hyun Kim, Sunwon Jeong, Sungbum Park, Ju Yong Chang. Camera Motion Agnostic Method for Estimating 3D Human Poses. *Sensors*. 2022;22(20):7975. <https://doi.org/10.3390/s22207975>
16. Kumar S, Srivastava M, Prakash V. Advanced Hybrid Prediction Model: Optimizing LightGBM, XGBoost, Lasso Regression and Random Forest with Bayesian Optimization. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2024;102(9):4103–4115. URL: <https://jatit.org/volumes/Vol102No9/32Vol102No9.pdf> (дата обращения: 01.06.2025).

17. Nidhi Dua, Shiva Nand Singh, Vijay Bhaskar Semwal. Multi-Input CNN-GRU Based Human Activity Recognition Using Wearable Sensors. *Computing*. 2021;103(7):1461–1478. <https://doi.org/10.1007/s00607-021-00928-8>

18. Vosco N, Shenkler A, Grobman M. Tiled Squeeze-and-Excite: Channel Attention with Local Spatial Context. In: *Proc. IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops*. New York City: IEEE; 2021. P. 345–353. <https://doi.org/10.1109/ICCVW54120.2021.00043>

19. Колпашиков Д.Ю., Гергет О.М., Данилов В.В. Сравнение алгоритмов FABRIK обратной кинематики для многосекционных непрерывных роботов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2022;753(12):34–45. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-12-34-45>

Kolpashchikov DYu, Gerget OM, Danilov VV. FABRIK-Based Comparison of the Inverse Kinematic Algorithms Operation Results for Multi-Section Continuum Robots. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2022;753(12):34–45. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-12-34-45>

20. Lamb M, Lee S, Billing E, Högberg D, Yang J. Forward and Backward Reaching Inverse Kinematics (FABRIK) Solver for DHM: A Pilot Study. In: *Proc. 7th International Digital Human Modeling Symposium*. 2022;7(1):26. <https://doi.org/10.17077/dhm.31772>

21. Qiang Zeng, Gang Zheng, Qian Liu. DTP: Learning to Estimate Full-Body Pose in Real-Time from Sparse VR Sensor Measurements. *Virtual Reality*. 2024;28(2):116. <https://doi.org/10.1007/s10055-024-01011-1>

#### **Об авторах:**

**Артём Дмитриевич Обухов**, доктор технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений» Тамбовского государственного технического университета (392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearchGate](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [obuhov.art@gmail.com](mailto:obuhov.art@gmail.com)

**Даниил Вячеславович Теселкин**, ассистент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений» Тамбовского государственного технического университета (392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearchGate](#), [ScopusID](#), [dteselk@mail.ru](mailto:dteselk@mail.ru)

#### **Заявленный вклад авторов:**

**А.Д. Обухов:** разработка концепции, получение финансирования, проведение исследования, разработка методологии, научное руководство, написание черновика рукописи, написание рукописи, предоставление ресурсов, административное руководство исследовательским проектом.

**Д.Л. Теселкин:** курирование данных, формальный анализ, разработка программного обеспечения, валидация результатов, визуализация, написание черновика рукописи.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

#### **About the Authors:**

**Artem D. Obukhov**, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automated Decision Support Systems, Tambov State Technical University (112, Michurinskaya Str., Tambov, 392000, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ResearchGate](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [obuhov.art@gmail.com](mailto:obuhov.art@gmail.com)

**Daniil V. Teselkin**, Assistant Professor of the Department of Automated Decision Support Systems, Tambov State Technical University (112, Michurinskaya Str., Tambov, 392000, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ResearchGate](#), [ScopusID](#), [dteselk@mail.ru](mailto:dteselk@mail.ru)

#### **Claimed Contributorship:**

**AD Obukhov:** conceptualization, funding acquisition, investigation, methodology, project administration, resources, supervision, writing – original draft preparation, writing – review & editing.

**DV Teselkin:** data curation, formal analysis, software, validation, visualization, writing – original draft preparation.

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

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

**Поступила в редакцию / Received** 24.06.2025

**Поступила после рецензирования / Reviewed** 20.07.2025

**Принята к публикации / Accepted** 31.07.2025

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



УДК 51-74

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-233-241>

## Математическое моделирование оценки мощности заряда при исключении просадочности лёссов глубинными гидровзрывами

Е.О. Тарасенко 

Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Российская Федерация

✉ [galail@mail.ru](mailto:galail@mail.ru)

EDN: OVUJUV

### Аннотация

**Введение.** Просадочные лёссовые грунты, широко распространённые в России, Китае и Средней Азии, представляют собой значимую проблему в современном строительстве из-за своей склонности к просадке и низкой прочности при внешних нагрузках. Недостаточное внимание к их физико-механическим свойствам может привести к деформации сооружений, что создаёт угрозу безопасности и финансовые потери. Научные исследования в этой области являются фрагментарными и не дают достаточного понимания методов уплотнения и их влияния на долговечность конструкций. Кроме того, не существует разработанных оптимизированных математических моделей, позволяющих предсказать эффективность инженерно-технологических процессов уплотнения. Таким образом, целью данного исследования является разработка математической модели, определяющей мощность заряда взрывчатого вещества для уплотнения лёссов. Данная модель направлена на исключение экспериментального этапа, что улучшает качество уплотнения и способствует экономии финансовых ресурсов в строительстве.

**Материалы и методы.** Математическое моделирование проводили путём включения решения обратной прикладной задачи оценки мощности заряда взрывчатого вещества при устранении просадочности лёссов. Начально-граничные задачи с полуэмпирическим дифференциальным уравнением в частных производных, описывающим уплотнение лёсса с выбросом и без выброса грунта на поверхность строительной площадки, рассматривались путём анализа конкретных моделей и математических подходов. На основе решения этих задач с использованием аналитического метода была создана математическая модель оценки мощности заряда взрывчатого вещества. Мощность определяли численно двумя методами: расчётами в программе, разработанной на языке Python, и путём моделирования вычислительного эксперимента с оценкой погрешности результата. При этом учитывали влияние физико-механических свойств грунтов, их изотропность и анизотропность.

**Результаты исследования.** Построена математическая модель мощности заряда взрывчатого вещества при уплотнении просадочных лёссов с использованием глубинных гидровзрывов. Учтены плотность сухого грунта до и после уплотнения, коэффициент вертикальной диффузии, дисперсионные координатные изменения газа в уплотняемом грунте, а также глубина заложения заряда взрывчатого вещества. При средней плотности сухого уплотнённого грунта абсолютная погрешность расчётных значений мощности заряда составила 3,28 г для уплотнения лёссов без выброса и 21,13 г — для ситуации с выбросом грунта на поверхность. Показана адекватность предлагаемого математического решения экспериментальным данным натурального строительного объекта.

**Обсуждение.** Предложенная модель позволяет проводить оценку мощности заряда взрывчатого вещества для изотропных и анизотропных геологических систем. Полученные аналитические представления демонстрируют степень и характер влияния физико-механических свойств грунтов на величину мощности заряда. Численное сравнение как с экспериментальными данными натурального уплотнения грунтов, так и с рекомендациями по уплотнению просадочных грунтов большой мощности гидровзрывным методом показало, что предложенная математическая модель согласуется с эмпирическими данными.

**Заключение.** Основным результатом исследования является математическая модель мощности заряда взрывчатого вещества при устранении просадочности лёссов глубинными гидровзрывами. Построены аналитические представления мощности заряда с учётом физико-механических свойств грунтов. Получена численная оценка мощности, согласующаяся со значениями эмпирических данных. Практическая значимость исследования состоит в возможности применения математической модели в качестве расчётной методики и внедрения в исследовательские и проектные организации. Дальнейшие исследования будут направлены на построение решений средствами математического моделирования и других обратных задач в рамках инженерно-технологического процесса уплотнения грунтов.

**Ключевые слова:** мощность заряда, просадочность, лёссы, глубинный гидровзрыв, глубина заложения заряда, уплотнение с выбросом, уплотнение без выброса, изотропность, анизотропность, вычислительный эксперимент

**Благодарности.** Автор выражает признательность и благодарит Бориса Фёдоровича Галая, доктора геолого-минералогических наук, профессора за консультирование и оказанную помощь при написании статьи. Также автор благодарен редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и замечания, которые позволили повысить её качество.

**Для цитирования.** Тарасенко Е.О. Математическое моделирование оценки мощности заряда при исключении просадочности лёссов глубинными гидровзрывами. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(3):233–241. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-233-241>

*Original Empirical Research*

## Mathematical Modeling of Charge Power Assessment with Exclusion of Loess Subsidence by Deep Hydraulic Blasts

Elena O. Tarasenko 

North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation

✉ [galail@mail.ru](mailto:galail@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** Subsidence loess soils, widespread in Russia, China and Central Asia, are a challenge in modern construction due to their tendency to subsidence and low strength under external loads. Insufficient attention to their mechanical-and-physical properties can cause deformation of structures, which creates a safety hazard and financial losses. Scientific research in this area is fragmentary and does not provide sufficient understanding of compaction methods and their impact on the durability of structures. Moreover, there are no developed optimized mathematical models to predict the efficiency of engineering and technology processes of compaction. Thus, the objective of this study is to develop a mathematical model that determines the explosive charge capacity for compaction of loess. This model is aimed at eliminating the experimental stage, which improves the quality of compaction and contributes to saving financial resources in construction.

**Materials and Methods.** Mathematical modeling was carried out by including the solution to the inverse applied problem of assessing the power of an explosive charge when eliminating loess subsidence. Initial-boundary value problems with a semiempirical partial differential equation describing the compaction of loess with and without the ejection of soil onto the construction site's surface were considered by analyzing specific models and mathematical approaches. Based on the solution to these problems using the analytical method, a mathematical model for assessing the power of an explosive charge was developed. The power was determined numerically using two methods: calculations in a program developed in the Python language, and modeling a computational experiment with an assessment of the error of the result. In this case, the effect of the mechanical-and-physical properties of soils, their isotropy and anisotropy were taken into account.

**Results.** A mathematical model of the explosive charge power during compaction of subsiding loess using deep hydraulic blasts was constructed. The density of dry soil before and after compaction, the vertical diffusion coefficient, dispersion coordinate changes of gas in the compacted soil, and the depth of the explosive charge were taken into account. With an average density of dry compacted soil, the absolute error of the calculated values of the charge power was 3.28 g for compaction of loess without ejection, and 21.13 g for the situation with soil ejection onto the surface. The adequacy of the proposed mathematical solution to the experimental data of a full-scale construction site was shown.

**Discussion.** The proposed model allows for the assessment of the explosive charge power for isotropic and anisotropic geological systems. The resulting analytical representations demonstrate the degree and nature of the influence of mechanical-and-physical properties of soils on the magnitude of the charge power. Numerical comparison with both experimental data on natural soil compaction and recommendations for compaction of subsidence soils of high power by the hydraulic blasting method has shown that the proposed mathematical model is consistent with empirical data.

**Conclusion.** The main result of the study is a mathematical model of the explosive charge power when eliminating loess subsidence using deep hydraulic blasts. Analytical representations of the charge power are constructed taking into account the mechanical-and-physical properties of soils. A numerical estimate of the power consistent with the values of empirical data is obtained. The practical significance of the study involves the possibility of using the mathematical model as a calculation method and implementing it in research and design organizations. Further study will be aimed at constructing solutions using mathematical modeling and other inverse problems within the framework of the engineering and technology process of soil compaction.

**Keywords:** charge power, subsidence, loess, deep hydraulic blast, charge depth, compaction with ejection, compaction without ejection, isotropy, anisotropy, computational experiment

**Acknowledgements.** The author would like to thank Boris Fedorovich Galay, Dr.Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, for his consultation and assistance in writing the article. The author also appreciates the editors and reviewers for their attentive attitude to the article and comments that improve its quality.

**For Citation.** Tarasenko EO. Mathematical Modeling of Charge Power Assessment with Exclusion of Loess Subsidence by Deep Hydraulic Blasts. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(3):233–241. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-233-241>

**Введение.** Исследование поверхности земной коры показало распространение структурно неустойчивых просадочных лёссовых грунтов по всему миру. Преобладают они в России [1], Китае [2] и Средней Азии [3]. Лёссами покрыто около 17 % территории России. Наиболее часто лёссовые грунты встречаются на Северном Кавказе, юге России, в Крыму и на других территориях.

В планетарном масштабе лёсс представляет собой горную породу четвертичного периода. Ему характерны жёлтые, жёлто-коричневые или жёлто-палевые цвета [4]. Лёссы имеют низкую плотность и высокую макропористость, что позволяет воде глубоко проникать в структуру грунта. Это приводит к быстрому размоканию [5] и просадкам [6]. Рассчитанные просадки от собственного веса достигают значений 2,5 м [7].

Возведение безопасных и прочных зданий и сооружений на просадочных грунтах не представляется возможным. Проектирование и строительство объектов на лёссах, а также недостаточное исследование их физико-механических свойств приводят к деформациям зданий и сооружений, снижая срок их безопасной эксплуатации. Как следствие, увеличиваются финансовые затраты и стремительно возрастает угроза безопасности.

Устранение просадочности осуществляется различными методами, выбор которых зависит от условий их реализации. В данной работе рассматривается метод уплотнения лёссов глубинными гидровзрывами, показывающий экономическую эффективность при низких производственных затратах [8].

Инженерно-технологический процесс уплотнения осуществляется на основе всестороннего детального исследования физико-механических свойств просадочных лёссовых грунтов, которые широко представлены в современной литературе. Проведены исследования проницаемости просадочных грунтов [9], деформационных характеристик лёсса [10] с различной влажностью, энергии уплотнения [11], ползучести [12] и механической устойчивости глин [13]. Прочностные и деформационные свойства глинистых грунтов с точки зрения физико-химической теории проанализированы под действием внешних нагрузок, сжимающей нагрузки, противодействия [14]. Однако математическое описание физико-механических свойств просадочных глин и суглинков, а также их изменения в результате уплотнения глубинными взрывами в отмеченных работах не проведено. Исследования осуществляются на основе полевых и компрессионных испытаний лёссовых грунтов.

Математизация отдельных свойств уплотняемых взрывом грунтов, а именно их прочностных характеристик, приведена в отчётах об инженерно-геологических изысканиях [15]. Реализована адаптация прочностных показателей к значениям для численных расчётов. Исследования показателей удельного сцепления и угла внутреннего трения уплотняемых глубинными взрывами грунтов методом регрессионного анализа проводятся в [16]. Реализовано моделирование коэффициента вертикальной диффузии газа в лёссовых грунтах, уплотняемых взрывом [17]. Построены регрессионные модели отдельных физических параметров грунтов, таких как пористость, проницаемость, водонасыщенность [18], фильтрация в зависимости от давления [19]. Эти исследования позволяют оценить физико-механические свойства лёссовых грунтов после их уплотнения глубинными взрывами, но не описывают особенности реализации инженерно-технологического процесса уплотнения лёссов.

Математическое моделирование уплотнения лёссовых грунтов глубинными гидровзрывами требует решения отдельных обратных прикладных задач — оценки мощности заряда взрывчатого вещества, глубины его заложения, дисперсионных координатных изменений атомов газа, образуемого при взрыве, в грунтах и другие. Одна из этих задач задаёт цель статьи — математическое моделирование мощности заряда взрывчатого вещества с учётом физико-механических свойств уплотняемых геологических систем, их анизотропности и изотропности.

Создание модели позволит не только улучшить качество уплотнения, но и сократить финансовые затраты на реализацию инженерно-технологического процесса. Уплотнение лёсса с использованием предложенной модели исключает этап пробных предварительных взрывов на строительной площадке, который проводится для определения оптимальной мощности заряда взрывчатого вещества и достижения требуемых механических свойств непресадочных грунтов.

Достижение цели исследования реализуется на основе применения инструментария математического моделирования (аналитически и численно). Будут построены аналитические представления для оценки мощности заряда взрывчатого вещества, исходя из решения начально-граничных задач с полуэмпирическим уравнением диффузии. Учтутся физико-механические свойства уплотняемых грунтов. Для получения оценки мощности заряда будут применены средства численного моделирования. Проведение вычислительного эксперимента позволит установить адекватность предлагаемого решения обратной задачи экспериментальным данным.

**Материалы и методы.** Обратная задача оценки мощности заряда взрывчатого вещества возникает в рамках математического моделирования уплотнения просадочных грунтов глубинными взрывами. Процесс уплотнения лёссов с целью устранения их просадочности описывается моделью, основанной на заданном дифференциальном полуэмпирическом уравнении диффузии, а также с учетом начальных и граничных условий. Математическая постановка плотностной модели уплотняемых грунтов имеет вид [17]:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \sum_{i=x,y,z} \frac{\partial(u_i q)}{\partial i} + \alpha q = \sum_{i=x,y,z} \left( \frac{\partial}{\partial i} \sum_{j=x,y,z} K_{ij} \frac{\partial q}{\partial j} \right) + Q, \quad (1)$$

$$q(t_0, x, y, z) = Q \cdot \delta(x - x^0) \cdot \delta(y - y^0) \cdot \delta(z - z^0), \quad (2)$$

$$K_{zz} \frac{\partial q}{\partial z} \Big|_{z=z^0} = 0, \quad t > t_0, \quad (3)$$

$$q(t, x, y, z) \Big|_{z=z^0}, \quad t > t_0, \quad (4)$$

здесь  $q(t, x, y, z)$  — плотность уплотнённого грунта при глубинном взрыве в момент времени  $t$ ;  $u$  — параметр горизонтального распространения газа;  $K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}$  — коэффициенты диффузии;  $\alpha$  — параметр взаимодействия газа, появившегося в результате взрыва, и лёссового просадочного грунта;  $Q$  — мощность заряда взрывчатого вещества (т.е. количество газа, выброшенного зарядом в момент времени  $t_0$  в точке  $x_0, y_0, z_0$ );  $\delta$  — дельта-функция Дирака.

Начально-граничная задача (1)–(3) соответствует процессу уплотнения лёсса глубинными взрывами с выбросом грунта на поверхность. Задача (1), (2), (4) — уплотнение лёсса без выброса на поверхность. Аналитические решения задач (1)–(3) и (1), (2), (4) представимы, соответственно, в виде [17]:

$$q_1(t, x, y, z) = \frac{Q}{(4\pi t)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \times \exp \left\{ -\frac{(x - u_x \cdot t)^2}{4\sigma_x^2 \cdot t} - \frac{y^2}{4\sigma_y^2 \cdot t} \right\} \times \left[ \exp \left\{ -\frac{(z - H)^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} \right\} + \exp \left\{ -\frac{(z + H)^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} \right\} \right], \quad (5)$$

$$q_2(t, x, y, z) = \frac{Q}{(4\pi t)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \times \exp \left\{ -\frac{(x - u_x \cdot t)^2}{4\sigma_x^2 \cdot t} - \frac{y^2}{4\sigma_y^2 \cdot t} \right\} \times \left[ \exp \left\{ -\frac{(z - H)^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} \right\} - \exp \left\{ -\frac{(z + H)^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} \right\} \right]. \quad (6)$$

В решениях (5) и (6)  $(0, 0, H)$  — координаты расположения сосредоточенного заряда взрывчатого вещества с мощностью  $Q = const > 0$ , действующего в момент времени  $t_0$ ;  $H$  — глубина заложения заряда взрывчатого вещества;  $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$  — дисперсионные изменения координат атомов газа в грунте.

Постановка обратной задачи об оценке мощности заряда взрывчатого вещества: пусть установлены средние значения плотности грунта  $q_1$  и  $q_2$  уплотнённого методом глубинного взрыва зарядов взрывчатого вещества, соответствующие соотношениям (5) и (6) для случаев уплотнения грунтов с выбросом и без выброса на поверхность; известно значение глубины расположения заряда взрывчатого вещества  $H$ ; определена величина дисперсионных координатных изменений атомов газа в грунте  $\sigma$ . Требуется оценить мощность заряда взрывчатого вещества  $Q$ .

**Результаты исследования.** Решения обратных прикладных задач об оценке мощности заряда при уплотнении просадочных лёссов глубинными гидровзрывами реализуем на основе аналитического и численного методов математического моделирования.

Согласно (5) и (6) возможны два случая: уплотнение с выбросом на поверхность и без выброса. В первом случае на основе (5) получим уравнение:

$$q_1(t, x, y, z) - \frac{Q}{(4\pi t)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \times \exp \left\{ -\frac{(x - u_x \cdot t)^2}{4\sigma_x^2 \cdot t} - \frac{y^2}{4\sigma_y^2 \cdot t} \right\} \times \left[ \exp \left\{ -\frac{(z - H)^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} \right\} + \exp \left\{ -\frac{(z + H)^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} \right\} \right] = 0. \quad (7)$$

Во втором случае на основе (6) приходим к уравнению:

$$q_2(t, x, y, z) - \frac{Q}{(4\pi t)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \times \exp \left\{ -\frac{(x - u_x \cdot t)^2}{4\sigma_x^2 \cdot t} - \frac{y^2}{4\sigma_y^2 \cdot t} \right\} \times \left[ \exp \left\{ -\frac{(z - H)^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} \right\} - \exp \left\{ -\frac{(z + H)^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} \right\} \right] = 0. \quad (8)$$

Для геологических систем характерными физико-механическими свойствами являются анизотропность и изотропность.

Если исследуемая геологическая система является анизотропной, то фильтрационные свойства грунта зависят от направления движения грунтовой воды. При реализации уплотнения грунтов взрывами с поверхностным выбросом искомым корень  $Q$  уравнения (7) примет аналитическое представление:

$$Q = \frac{(4\pi t)^{3/2} \cdot q_1(t, x, y, z)}{\exp \left\{ -\frac{(x - u_x \cdot t)^2}{4\sigma_x^2 \cdot t} - \frac{y^2}{4\sigma_y^2 \cdot t} \right\}} \times \frac{\sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z}{\left[ \exp \left\{ -\frac{(z - H)^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} \right\} + \exp \left\{ -\frac{(z + H)^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} \right\} \right]}. \quad (9)$$

Если исследуемая система является изотропной, тогда фильтрационные свойства грунта не зависят от направления движения грунтовой воды. Предположим, что дисперсионные координатные изменения равны по всем направлениям  $\sigma_z = \sigma_y = \sigma_x$ , тогда при уплотнении грунтов с выбросом на поверхность искомым корень  $Q$  уравнения (7) примет аналитическое представление:

$$Q = \frac{(4\pi t)^{3/2} \cdot q_1(t, x, y, z)}{\exp \left\{ -\frac{(x - u_x \cdot t)^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} - \frac{y^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} \right\}} \times \frac{\sigma_z^3}{\left[ \exp \left\{ -\frac{(z - H)^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} \right\} + \exp \left\{ -\frac{(z + H)^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} \right\} \right]}. \quad (10)$$

Теперь рассмотрим случай уплотнения грунта глубинными взрывами без выброса на поверхность. Если рассматриваемая геологическая система является анизотропной, то искомым корень  $Q$  уравнения (8) примет аналитический вид:

$$Q = \frac{(4\pi t)^{3/2} \cdot q_2(t, x, y, z)}{\exp \left\{ -\frac{(x - u_x \cdot t)^2}{4\sigma_x^2 \cdot t} - \frac{y^2}{4\sigma_y^2 \cdot t} \right\}} \times \frac{\sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z}{\left[ \exp \left\{ -\frac{(z - H)^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} \right\} - \exp \left\{ -\frac{(z + H)^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} \right\} \right]}. \quad (11)$$

Если рассматриваемая система является изотропной, то  $\sigma_z = \sigma_y = \sigma_x$  и тогда искомым корень  $Q$  уравнения (8) запишем в виде:

$$Q = \frac{(4\pi t)^{3/2} \cdot q_2(t, x, y, z)}{\exp \left\{ -\frac{(x - u_x \cdot t)^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} - \frac{y^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} \right\}} \times \frac{\sigma_z^3}{\left[ \exp \left\{ -\frac{(z - H)^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} \right\} - \exp \left\{ -\frac{(z + H)^2}{4\sigma_z^2 \cdot t} \right\} \right]}. \quad (12)$$

Построенные соотношения (9)–(12) аналитически задают мощность заряда взрывчатого вещества в зависимости от физико-механических свойств уплотняемых грунтов и глубины заложения заряда. Для оценки значений мощности применим средства численного моделирования.

**Вычислительный эксперимент.** Проведём вычислительный эксперимент по решению обратных задач, возникающих при математическом моделировании уплотнения лёссов глубинными взрывами с целью численной оценки мощности заряда взрывчатого вещества. Расчёты будут основаны на данных натурального строительного объекта.

На строительном объекте «Строительство товарно-сырьевого склада СУГ ООО «Ставролен» (г. Будённовск) проведено уплотнение глубинными взрывами просадочных грунтов [8], мощность которых равна 28 м. Суммарная просадка грунта под собственным весом составила от 43 до 78 см. На глубине 29–31 м были зафиксированы грунтовые воды [20]. Средняя плотность сухого грунта до уплотнения равнялась 1,43 г/см<sup>3</sup>.

На строительной площадке для проведения уплотнения пробурили дренажно-взрывные скважины диаметром 20 см по сетке см. В них поместили на глубину  $H = 600$  см заряды водостойкого аммонита массой по 10 000 г. Через месяц после уплотнения было выполнено бурение контрольных скважин с отбором монолитов. Плотность сухого грунта приняла значения в интервале от 1,60 г/см<sup>3</sup> до 1,75 г/см<sup>3</sup>. Средняя плотность сухого уплотнённого грунта составила 1,66 г/см<sup>3</sup> [8]. Лёсс относится к грунтам со столбчатой структурой и является ортотропным в вертикальном направлении [20]. Учитывая физические показатели грунта, рассчитаем коэффициент вертикальной диффузии газа в грунте  $Kz$ , согласно [17]. По  $Kz$  определим дисперсионные координатные изменения атомов газа в грунте, которые равны  $\sigma_z = 0,726$ . Параметр горизонтального распространения газа равен нулю  $u_x = 0$ . Расчёт значений мощности заряда взрывчатого вещества будет произведён по формуле (12). Уплотнение лёсса реализовано без выброса грунта на поверхность.

В таблице 1 представлен результат оценки мощности заряда взрывчатого вещества при известных значениях плотности уплотнённого грунта, дисперсионных координатных изменениях атомов газа в грунте и глубине заложения заряда. Расчёты проводились с использованием авторской программы, разработанной на языке программирования высокого уровня Python, предназначенной для расчёта мощности заряда взрывчатого вещества.

Таблица 1

Расчётная мощность заряда взрывчатого вещества при различных значениях плотности уплотнённого грунта без выброса на поверхность

Плотность грунта, г/см <sup>3</sup>	Расчётная мощность заряда, г
1,60	9 797,53
1,61	9 809,56
1,62	9 815,83
1,63	9 836,05
1,64	9 876,28
1,65	9 936,51
1,66	9 996,72
1,67	10 046,74
1,68	10 094,16
1,69	10 114,28
1,70	10 137,53
1,71	10 159,82
1,72	10 186,04
1,73	10 208,27
1,74	10 228,49
1,75	10 243,71

Проведём анализ результатов, представленных в таблице 1. Для исключения свойства просадочности и достижения плотности сухого уплотнённого грунта значения  $\geq 1,60$  г/см<sup>3</sup> мощность заряда взрывчатого вещества может принимать значения в интервале от 9 797,53 до 10 243,71 г. Согласно экспериментальным данным, мощность заряда взрывчатого вещества равна 10 000 г [8]. Абсолютная погрешность вычислений для значений плотности грунта от 1,60 г/см<sup>3</sup> до 1,75 г/см<sup>3</sup> не превышает значения 0,244. При средней плотности грунта  $q = 1,66$  г/см<sup>3</sup> абсолютная погрешность равна 3,28 г.

Рассмотрим уплотнение лёсса с выбросом грунта на поверхность. Расчёт значений мощности заряда взрывчатого вещества произведём по формуле (10) при  $\sigma_z = 0,726$  и плотности сухого грунта от 1,60 г/см<sup>3</sup> до 1,75 г/см<sup>3</sup>. Полученные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

Расчётная мощность заряда взрывчатого вещества при различных значениях плотности уплотнённого грунта с выбросом на поверхность

Плотность грунта, г/см <sup>3</sup>	Расчётная мощность заряда, г
1,60	9 852,18
1,61	9 881,62
1,62	9 952,77
1,63	10 021,13
1,64	10 053,84
1,65	10 094,28
1,66	10 123,92
1,67	10 157,54
1,68	10 187,62
1,69	10 204,75
1,70	10 221,83
1,71	10 242,25
1,72	10 256,89
1,73	10 279,34
1,74	10 293,79
1,75	10 301,24

Анализ значений мощности заряда взрывчатого вещества, представленных в таблице 2, показал, что расчётная мощность заряда может принимать значения от 9 852,18 г до 10 301,24 г. Абсолютная погрешность вычислений не превышает 0,301. При средней плотности грунта  $q = 1,66 \text{ г/см}^3$  абсолютная погрешность равна 123,92 г. Минимальная абсолютная погрешность 0,02113 при  $q = 1,63 \text{ г/см}^3$ .

На рис. 1, 2 приведена графическая интерпретация расчётных значений мощности заряда взрывчатого вещества при различных показателях плотности сухого уплотнённого грунта и экспериментальных данных о мощности заряда. Отмечены значения мощности заряда в соответствии с рекомендациями по уплотнению просадочных грунтов большой мощности гидровзрывным методом<sup>1</sup> (сплошная линия). При заложении заряда взрывчатого вещества на указанную глубину его мощность равна 9 960 г. На рис. 1 представлен случай уплотнения лёсса глубинным взрывом без выброса на поверхность. На рис. 2 — с выбросом на поверхность.

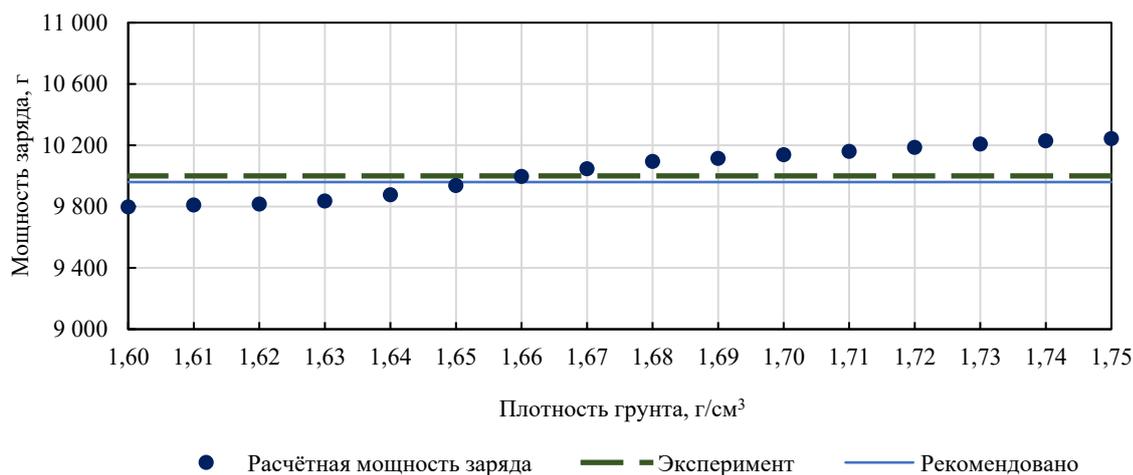


Рис. 1. Расчётная и экспериментальная мощность заряда взрывчатого вещества при различных значениях плотности грунта без выброса на поверхность

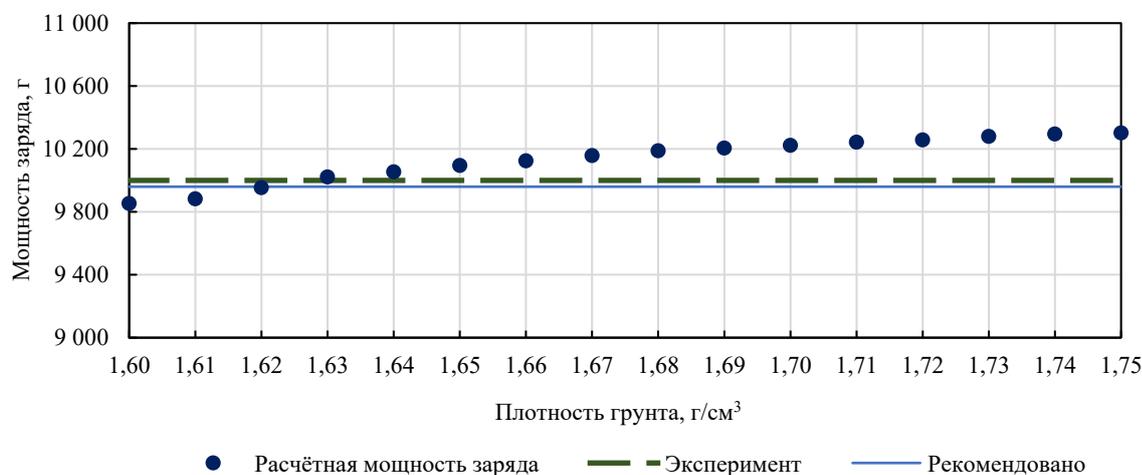


Рис. 2. Расчётная и экспериментальная мощность заряда взрывчатого вещества при различных значениях плотности грунта с выбросом на поверхность

По окончании проведения инженерно-технологического процесса уплотнения лёссов глубинными взрывами, в соответствии с [8], после сброса воды из котлована верхние буферные слои строительной площадки доуплотняются поверхностными методами.

**Обсуждение.** Построенная математическая модель мощности заряда взрывчатого вещества описана аналитически (9)–(12). Модель предназначена для проведения численных расчётов и оценки значений мощности заряда. Формулы показывают характер и степень зависимости мощности заряда и физико-механических свойств грунтов, их изотропности и анизотропности. Увеличение мощности заряда влечёт рост плотности грунта, снижение просадочности и пористости.

<sup>1</sup> Рекомендации по уплотнению просадочных грунтов большой мощности гидровзрывным методом. Москва: Стройиздат, 1984. 56 с. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293782/4293782665.pdf> (дата обращения: 01.06.2025).

Полученные представления позволили провести теоретический эксперимент по численной оценке значений мощности заряда взрывчатого вещества. Расчётные значения имеют абсолютную вычислительную погрешность в интервалах (3,28; 243,71) г — уплотнение без выброса грунта на поверхность и (21,13; 301,24) г — уплотнение с выбросом грунта на поверхность строительной площадки.

Недостатком предложенного подхода является то, что плотность уплотняемого лёсса, величина дисперсионных координатных изменений атомов газа в грунте определяются на основе полевых и лабораторных испытаний. Глубина расположения заряда взрывчатого вещества также указывается заранее. Таким образом, при оценке мощности заряда будут содержаться штамповые и компрессионные данные. Предложенная модель учитывает изотропность и анизотропность грунтов. Полученные в настоящем исследовании результаты адекватны экспериментальным данным и подтверждают возможность их практического применения при планировании инженерно-технологического процесса уплотнения просадочных грунтов глубинными гидровзрывами.

**Заключение.** Основным результатом исследования является математическая модель оценки мощности заряда взрывчатого вещества. Получены аналитические выражения мощности заряда. Учтены физико-механические свойства грунтов, их изотропность и анизотропность. Численно значения мощности найдены с использованием программы, разработанной в Python. Полученные результаты хорошо согласуются со значениями натурального эксперимента и рекомендуемыми значениями, основанными на эмпирических данных.

Практическая значимость исследования состоит в возможности применения математической модели в качестве расчётной методики в исследовательских и проектных организациях, занимающихся теоретическим исследованием и практической реализацией уплотнения просадочных лёссовых грунтов. Дальнейшие исследования будут направлены на построение решений средствами математического моделирования и других обратных задач в рамках инженерно-технологического процесса уплотнения грунтов.

#### Список литературы / References

1. Трофимов В.Т. (ред.), Балькова С.Д., Андреева Т.В., Ершова А.В., Шаевич Я.Е. *Опорные инженерно-геологические разрезы лёссовых пород Северной Евразии*. Монография. Москва: КДУ; 2008. 608 с.  
Trofimov VT (ed), Balykova SD, Andreeva TV, Ershova AV, Shaevich YaE. *Reference Engineering-Geological Sections of Loess Rocks of Northern Eurasia*. Monograph. Moscow: KDU; 2008. 608 p. (In Russ.)
2. Xiaoyu Zhu, Jessica Gray, Ying Gu, Tong He. Genesis of Loess Particles on the Chinese Loess Plateau. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2022;23(7):e2022GC010428. <https://doi.org/10.1029/2022GC010428>
3. Торгоев И.А., Алёшин Ю.Г. Оползни сейсмогенного разжижения в лёссовидных суглинках. В: *Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. «Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения»*. Москва: ГеоИнфо; 2022. С. 224–229.  
Torgoev IA, Aleshin YuG. Seismogenic Liquefaction Landslides in Loess-Like Loams. In: *Proc. Annual Session of the RAS Scientific Council on the Problems of Geoecology, Engineering Geology and Hydrogeology. "Sergeev Readings. Fundamental and Applied Issues of Modern Soil Science"*. Moscow: GeoInfo; 2022. P. 224–229. (In Russ.)
4. Королев В.А., Григорьева И.Ю. Эколого-геологические системы массивов лёссовых грунтов. *Инженерная геология*. 2022;XVII(2):42–64. <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2022-17-2-42-64>
5. Korolev VA, Grigorieva IYu. The Ecological-Geological Systems of Loess Soil Massifs. *Engineering Geology World*. 2022;XVII(2):42–64. (In Russ.) <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2022-17-2-42-64>
6. Jianhua Ma, Runqiang Zeng, Xingmin Meng, Zonglin Zhang, Shufen Zhao, Ziran Wei. Field Research on Preferential Infiltration in Rainfall-Induced Loess Landslides. *Engineering Geology*. 2025;354:108184. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.108184>
7. Jinduo Yang, Xi-An Li, Lincui Li, Zhang Jing, Weiping Wang. Formation Mechanism of Metastable Internal Support Microstructure in Malan Loess and Its Implications for Collapsibility. *Engineering Geology*. 2025;346:107892. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107892>
8. Shijie Zhai, Guangyin Du, Zhongxun Zhuang, Changhui Gao, Chuanle Wang. Effect of Resonance Compaction Method on the Bearing Capacity Considering Geotechnical Spatial Variability Characteristics. *Engineering Geology*. 2023;324:107256. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107256>
9. Галай Б.Ф. *Уплотнение просадочных грунтов глубинными взрывами*. Ставрополь: Сервисшкола, 2015. 240 с.  
Galay BF. *Compaction of Subsidence Soils by Deep Explosions*. Stavropol: Servisshkola, 2015. 240 p. (In Russ.)
10. Zekun Li, Penghui Ma, Jianqi Zhuang, Qingyi Mu, Jiaxu Kong, Luqing Zhao, et al. Permeability Characteristics, Structural Failure Characteristics, and Triggering Process of Loess Landslides in Two Typical Strata Structures. *Engineering Geology*. 2024;341:107728. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107728>
11. Прокопов А.Ю., Сычев И.В., Рязанцева А.В. Определение модуля деформации закрепленного грунтового основания по данным штамповых испытаний и геотехнического мониторинга. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2023;2(3):17–30. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-3-17-30>

Prokopov AYu, Sychev IV, Ryazantseva A. Determining the Stabilised Subfoudation Soil Deformation Modulus according to the Plate Load Tests and Geotechnical Monitoring Data. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2023;2(3):17–30. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-3-17-30>

11. Jing Yang, Xirong Niu, Qigao Guo, Zhiheng Wen, Hailong Cao. Strength and Deformation Characteristics of Compacted Loess with Different Moisture Content and Compaction Energy. *Results in Engineering*. 2023;20:101637. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101637>

12. Xiaowei Liu, Xudong Zhang, Xiaogang Fu, Tianxiang Yang, Zisong Su. Experimental Study on Creep Characteristics of Saturated Q<sub>2</sub> Loess. *Frontiers in Earth Science*. 2022;10:815275. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.815275>

13. Осипов В.И., Соколов В.Н., Карпенко Ф.С. Физико-химическая механика дисперсных пористых материалов — новый подход к оценке механической устойчивости глинистых грунтов. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2024;4:50–63. <https://doi.org/10.31857/S0869780924040059>

Osipov VI, Sokolov VN, Karpenko FS. Physicochemical Mechanics of Disperse Porous Materials as a New Approach to Assessing Mechanical Stability of Clay Soils. *Geology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocryology*. 2024;4:50–63. <https://doi.org/10.31857/S0869780924040059>

14. Карпенко Ф.С. Свойства глинистых грунтов с позиций физико-химической теории прочности. *Грунтоведение*. 2023;2:3–12. <https://doi.org/10.53278/2306-9139-2023-2-21-3-12>

Karpenko FS. Clayey Soils Properties on the Physicochemical Theory of Strength Positions. *Soil Science*. 2023;2:3–12. (In Russ.) <https://doi.org/10.53278/2306-9139-2023-2-21-3-12>

15. Петраков А.А., Прокопов А.Ю., Петракова Н.А., Панасюк М.Д. Интерпретация прочностных характеристик грунта для численных исследований. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2021;(1):225–236.

Petrakov AA, Prokopov AYu, Petrakova NA, Panasjuk MD. Interpretation of Strength Properties of Soil for Numerical Analyses. *Izvestiya TulGU. Sciences of Earth*. 2021;1:225–236.

16. Tarasenko EO. Mathematical Modeling of the Strength Properties of Lesses by the Method of Correlation-Regression Analysis. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024;20(1):171–181. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2024-20-1-171-181>

17. Tarasenko EO. Estimation of the Vertical Diffusion Coefficient of Gas in Compacted Soils by Means of Mathematical Modeling. *Proceedings of ISP RAS*. 2024;36(5):181–190. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2024-36\(5\)-13](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2024-36(5)-13)

18. Кожевникова П.В., Кунцев В.Е., Дорогобед А.Н., Мотрюк Е.Н. Математическое моделирование распределения достоверности петрофизических параметров при построении геологической модели. *Современные наукоемкие технологии*. 2021;(2):31–37. <https://doi.org/10.17513/snt.38490>

Kozhevnikova PV, Kuntsev VE, Dorogobed AN, Motryuk EN. Mathematical Modeling of the Distribution of the Reliability of Petrophysical Parameters in the Construction of a Geological Model. *Modern High Technologies*. 2021;2:31–37. <https://doi.org/10.17513/snt.38490>

19. Jingping Wang, Haichun Ma, Jiazhong Qian, Peichao Feng, Xiaohui Tan, Lei Ma. Experimental and Theoretical Study on the Seepage Mechanism Characteristics Coupling with Confining Pressure. *Engineering Geology*. 2021;291:106224. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106224>

20. Галай О.Б. *Буденновск: геология и город*. Монография. Ставрополь: Ставропольсервисшкола, 2022. 318 с.  
Galay OB. *Budennovsk: Geology and City*. Monograph. Stavropol: Stavropolservisshkola, 2022. 318 p. (In Russ.)

#### **Об авторе:**

**Елена Олеговна Тарасенко**, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Вычислительная математика и кибернетика» Северо-Кавказского федерального университета (355000, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ResearchGate](#), [galail@mail.ru](mailto:galail@mail.ru)

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

#### **About the Author:**

**Elena O. Tarasenko**, Cand.Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Department of Computational Mathematics and Cybernetics, North-Caucasus Federal University (1, Pushkin Str., Stavropol, 355017, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ResearchGate](#), [galail@mail.ru](mailto:galail@mail.ru)

**Conflict of Interest Statement:** the author declares no conflict of interest.

*The author has read and approved the final version of manuscript.*

Поступила в редакцию / Received 11.06.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 01.07.2025

Принята к публикации / Accepted 15.07.2025

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



УДК 681.5

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-242-255>

## Получение набора вибрационных сигналов подшипника качения с разной степенью развития локального дефекта наружного кольца

 З.А. Колосова , О.П. Колосова , Д.А. Шнайдер 

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация

✉ [kolosovaza@susu.ru](mailto:kolosovaza@susu.ru)

EDN: CRISFJ

### Аннотация

**Введение.** Создание достоверных тестовых наборов вибрационных сигналов остаётся актуальной задачей вибродиагностики, поскольку отсутствие данных по ранним стадиям дефектов подшипников затрудняет разработку и верификацию алгоритмов диагностики. Экспериментальное получение таких сигналов ограничено отсутствием соответствующих образцов и длительностью процесса накопления повреждений. Существующие подходы на основе численного моделирования требуют высоких вычислительных ресурсов и сложной настройки, что снижает их практическую применимость. Пробелом в исследованиях является отсутствие простой, воспроизводимой и валидированной методики генерации сигналов, отражающих последовательное развитие дефекта. Целью данного исследования является создание упрощённой методики формирования тестового набора сигналов вибрации подшипника, который может использоваться для разработки и верификации новых методов вибродиагностики. Методика основана на комбинировании экспериментальных и смоделированных сигналов.

**Материалы и методы.** В исследовании использовались экспериментальные данные, полученные с лабораторной установки, моделирующей роторный узел с подшипником качения (тип 180603). Для имитации ранних стадий дефекта (единичная и двойная ямка выкрашивания) применялось динамическое моделирование методом конечных элементов в среде ANSYS Mechanical (версия 16.2) на основе плоских элементов Plane162 с применением пакета LS-DYNA. Полученные последовательности импульсов накладывались на измеренный сигнал исправного подшипника для формирования комбинированных сигналов. Все сигналы (3 экспериментальных, 2 комбинированных) подвергались анализу с использованием преобразования Фурье, полосовой фильтрации (октавная полоса частот 5,4 кГц) и расчёта статистических параметров: СКЗ, пик-фактора и коэффициента эксцесса. Анализ проводился в среде Mathcad (версия 15.0).

**Результаты исследования.** В результате исследования разработана методика формирования тестового набора вибрационных сигналов подшипника качения, охватывающая исправное состояние и последовательное развитие локального дефекта наружного кольца. Результаты показали корреляцию между амплитудой вибрационных сигналов и стадиями дефектов — наблюдался рост амплитуд в высокочастотной области, что подтверждает взаимодействие тел качения с дефектными поверхностями. Дополнительный статистический анализ выявил увеличение диагностических параметров (среднего квадратического значения, пик-фактора и коэффициента эксцесса) по мере развития повреждения. Установлено, что смоделированные сигналы воспроизводят характерные признаки дефекта и корректно вписываются в общую тенденцию изменения параметров.

**Обсуждение.** Полученные данные демонстрируют, что предложенная методика позволяет упрощённо формировать эталонные сигналы без необходимости длительного накопления экспериментальных данных или повреждения оборудования. Физическая обоснованность смоделированных импульсов и согласованность динамики роста диагностических параметров с реальными данными подтверждают возможность использования данной методики для стандартизированного тестирования методов вибродиагностики.

**Заключение.** Разработанная методика обеспечивает эффективное и воспроизводимое формирование тестовых наборов сигналов для вибродиагностики. Она может быть использована для ускоренной верификации алгоритмов, снижения затрат на эксперименты и повышения надёжности диагностики. В дальнейшем планируется упрощение генерации импульсов на основе аналитического моделирования и расширение методики на другие типы подшипников и дефектов.

**Ключевые слова:** вибродиагностика, подшипник качения, МКЭ, моделирование сигналов вибрации

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность А.П. Бекетову — научному сотруднику Российского федерального ядерного центра Всероссийского научно-исследовательского института технической физики им. академика Е.И. Забабахина за построение конечно-элементной модели исправного подшипника.

**Для цитирования.** Колосова З.А., Колосова О.П., Шнайдер Д.А. Получение набора вибрационных сигналов подшипника качения с разной степенью развития локального дефекта наружного кольца. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(3):242–255. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-242-255>

*Original Empirical Research*

## Obtaining a Set of Vibration Signals from Rolling Bearings with Varying Degrees of Local Defect Development in the Outer Ring

Zoya A. Kolosova  , Olga P. Kolosova , Dmitry A. Shnayder 

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

 [kolosovaza@susu.ru](mailto:kolosovaza@susu.ru)

### Abstract

**Introduction.** The creation of reliable test sets of vibration signals remains a critical challenge in vibrodiagnostics, as the lack of data on early-stage bearing defects hinders the development and validation of diagnostic algorithms. Experimental acquisition of such signals is limited by the absence of appropriate test specimens and the long duration required for defect progression. Existing numerical simulation approaches demand high computational resources and complex setup, reducing their practical applicability. A significant gap in current research is the absence of a simple, reproducible, and validated methodology for generating signals that reflect the progressive development of defects. The objective of this study is to create a simplified methodology for generating a test set of bearing vibration signals that can be used to develop and verify new vibrodiagnostic techniques. The methodology is based on a combination of experimental and simulated signals.

**Materials and Methods.** Experimental data were obtained from a laboratory setup simulating a rotor unit with a rolling bearing (type 180603). To simulate early-stage defects (single and double chipping pits), dynamic finite element modelling was performed using ANSYS Mechanical (version 16.2) based on plane elements Plane162 using the LS-DYNA package. The resulting impulse sequences were superimposed onto the measured signal from a healthy bearing to generate combined signals. All signals (3 experimental, 2 combined) were analyzed using Fourier transform, bandpass filtering (5.4 kHz), and calculation of statistical parameters: root mean square (RMS), crest factor, and excess coefficient. Analysis was conducted in Mathcad (version 15.0).

**Results.** As a result of the study, a method for generating a test set of vibration signals from a rolling bearing was developed, covering the serviceable state and the sequential development of a local defect of the outer ring. The results showed a correlation between the amplitude of vibration signals and the stages of defects — an increase in amplitudes was observed in the high-frequency region, which confirmed the interaction of rolling elements and defective surfaces. Additional statistical analysis revealed an increase in diagnostic parameters (RMS value, crest factor, and excess coefficient) as the damage developed. It was found that the simulated signals reproduced the characteristic signs of a defect and fitted correctly into the general trend of parameter changes.

**Discussion.** The data obtained demonstrate that the proposed technique makes it possible to simplify the generation of reference signals without the need for long-term accumulation of experimental data or damage to equipment. The physical validity of the simulated pulses and the consistency of growth dynamics of diagnostic parameters with real data confirm the possibility of using this method for standardized testing of vibrodiagnostic techniques.

**Conclusion.** The developed methodology provides an efficient and reproducible approach to generating test signal sets for vibrodiagnostics. It can be used to accelerate algorithm verification, reduce experimental costs, and improve diagnostic reliability. Future research will focus on simplifying impulse generation through analytical modelling and extending the methodology to other bearing types and defect forms.

**Keywords:** vibrodiagnostics, rolling bearing, FEM, vibration signal modeling

**Acknowledgements.** The authors would like to thank A.P. Beketov, Research fellow of Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, for constructing a finite element model of the intact bearing.

**For Citation.** Kolosova ZA, Kolosova OP, Shnayder DA. Obtaining a Set of Vibrational Signals from Rolling Bearings with Varying Degrees of Local Defect Development in the Outer Ring. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(3):242–255. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-242-255>

**Введение.** В современной промышленности наблюдается тенденция к увеличению размеров, сложности и производительности машинного оборудования, вследствие чего возрастают капитальные затраты на его приобретение, ремонт и техническое обслуживание. Остановки оборудования приводят к значительным убыткам из-за недополученной продукции.

Значительная часть ротационного промышленного оборудования содержит подшипники качения. В большинстве случаев именно их техническое состояние является решающим фактором обеспечения безаварийной эксплуатации — то есть отказ подшипника качения ведёт к отказу всего изделия. Специалисты по вибродиагностике сталкиваются с необходимостью анализа и интерпретации вибрационных сигналов для оценки состояния подшипников качения. Наличие набора сигналов, отражающих различные стадии развития дефектов, является критически важным для разработки и тестирования новых методов диагностики. Это позволяет не только повысить точность и надёжность диагностических алгоритмов, но и обеспечить их адаптацию к реальным условиям эксплуатации оборудования. Однако получение такого набора сигналов в реальных условиях представляет собой непростую задачу [1]. Традиционные методы включают либо ожидание естественного появления дефекта, что может занять значительное время, либо намеренное повреждение подшипника, что не всегда целесообразно и может привести к дополнительным затратам. В связи с этим возникает необходимость разработки альтернативных подходов к получению вибрационных сигналов с разной степенью развития дефекта.

Одним из таких способов является математическое моделирование и симуляция вибрационных сигналов подшипников [2]. Исследователи разработали различные модели, включая системы с тремя [3] и двумя степенями свободы [4]. Эти модели учитывают такие факторы, как радиальный зазор, количество шариков и локализованные дефекты на внутреннем кольце, внешнем кольце или шариках. Были предложены усовершенствованные стохастические модели, учитывающие случайное скольжение роликовых элементов и периодически изменяющиеся передаточные функции [5]. Симуляции с использованием MATLAB применялись для генерации временных сигналов вибрации и частотных спектров [4].

Тем не менее моделирование сигналов вибрации подшипников остаётся нетривиальной задачей, связанной с рядом технических и методологических трудностей. Во-первых, реальные системы подшипников обладают высокой степенью сложности [6]. Точное представление в одной модели всех факторов, влияющих на вибрации подшипников, практически невозможно. Модели часто упрощают сложные взаимодействия между компонентами, что может приводить к потенциальным неточностям в предсказаниях. Во-вторых, подшипники демонстрируют нелинейное динамическое поведение, особенно при наличии дефектов [7]. Эта нелинейность трудно улавливается в математических моделях, особенно когда речь идёт о составных дефектах — таких, как одновременные дефекты на внутреннем и внешнем кольцах. В-третьих, проблема заключается в неопределённости параметров [8]. Многие модели зависят от параметров, которые трудно измерить или точно оценить, таких как жёсткость контакта и коэффициенты демпфирования. Это добавляет дополнительную сложность в процесс моделирования и может привести к неточностям в результатах [9]. Более комплексные модели требуют значительных вычислительных ресурсов, что делает анализ в реальном времени сложным для промышленных приложений. Некоторые модели могут игнорировать важные факторы, такие как температурные эффекты, условия смазки или вариации в производстве, что приводит к расхождениям между предсказанным и фактическим поведением [9]. Вследствие нехватки калибровочных подшипников возможности экспериментальной валидации ограничены, что ставит под вопрос полноту и надёжность верификации разработанных математических моделей [10].

Целью настоящего исследования является разработка упрощённой методики формирования тестового набора вибрационных сигналов подшипников, отражающих различные типы и стадии дефектов, и проверка её применимости для тестирования и верификации алгоритмов вибродиагностики. Предложенный подход направлен на преодоление ограничений существующих методов моделирования, связанных с высокой вычислительной сложностью и недостаточной адекватностью воспроизведения реальных условий работы системы.

Для достижения поставленной цели была разработана методика, сочетающая экспериментальное снятие исходного сигнала с оборудования в исправном состоянии с конечно-элементным моделированием поведения системы при наличии дефектов. На основе моделирования была получена последовательность импульсов, имитирующих влияние повреждения подшипника. Эти импульсы добавлялись к исходному сигналу, создавая набор комбинированных сигналов, соответствующих различным стадиям развития дефекта.

Такой подход позволяет сформировать стандартизованный и легко воспроизводимый набор данных, который может быть использован для тестирования и сравнительной оценки различных методов вибродиагностики. Предложенная методика симуляции дефектных сигналов представляет собой перспективное направление для развития вибродиагностики и может быть полезна для различных отраслей промышленности, где важна надёжность и долговечность оборудования.

**Материалы и методы.** Разработка методики получения набора сигналов подшипника с различными стадиями развития дефекта включает следующие этапы: получение исправного сигнала экспериментальным путём, создание модели исследуемого подшипника, имитация дефекта на модели, получение последовательности импульсов дефекта и подмешивание этой последовательности к реальному исправному сигналу.

Получение исправного сигнала с лабораторной установки целесообразно, поскольку при моделировании трудно учесть множество факторов, влияющих на реальный сигнал — такие как шум от самого оборудования, шум от прибора измерения, присутствующий дисбаланс валов оборудования и т.д.

Для сравнения реальных и смоделированных сигналов на лабораторной установке также были получены сигналы подшипников с дефектами. Для получения последовательности импульсов применялось моделирование методом конечных элементов (МКЭ), который является одним из наиболее эффективных и широко используемых подходов к численному анализу механических систем и структур [10]. Полученные с помощью МКЭ последовательности импульсов были сложены с реальным исправным сигналом для формирования сигналов с дефектом.

### 1. Получение исправного сигнала экспериментальным путем

В качестве объекта исследования выбран шариковый радиальный однорядный подшипник с уплотнением типа 180603 ГОСТ 8 882–75<sup>1</sup>. Геометрические характеристики данного подшипника приведены в таблице 1.

Таблица 1

Геометрические характеристики подшипника качения

Характеристика, размерность	Обозначение, формула	Значение
Габаритные размеры		
Внешний диаметр, мм	$D$	47
Внутренний диаметр, мм	$d$	17
Ширина, мм	$B$	19
Размеры тел качения		
Диаметр, мм	$d_b$	9,5
Количество	$z$	6
Угол контакта, рад	$\beta$	0
Угловой шаг тел качения, рад	$g = 2\pi/z$	$\pi/3$
Диаметр окружности, проходящей Через центры тел качения, мм	$D_0 = (D+d)/2$	32
Начальный радиальный зазор, мкм	$g$	8–15
Размеры дорожек качения		
Наименьшая толщина по желобу, мм	$h = [(D-d)/2 - d_b]/2$	2,75
Диаметр внешней дорожки, мм	$d_o = D - 2 \times h$	41,5
Диаметр внутренней дорожки, мм	$d_i = d + 2 \times h$	22,5
Радиус поперечного профиля, мм	$r = 0,515 \times d_b$	4,893

<sup>1</sup> ГОСТ 8 882–75 (СТ СЭВ 3 793–82) Подшипники шариковые радиальные однорядные с уплотнениями. Технические условия. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://base.garant.ru/5926172/> (дата обращения: 09.06.2025).

Схема подшипника приведена на рис. 1.

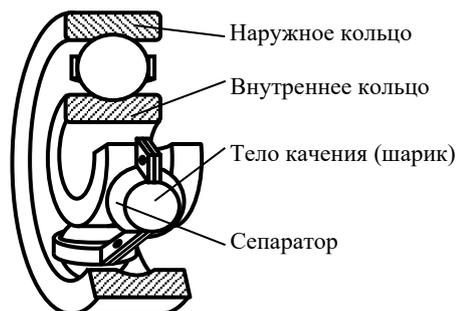


Рис. 1. Схема подшипника качения

Подшипники данного типа установлены в опоры лабораторной установки, которая моделирует простейшую ротационную машину и принципиально представляет собой ротор на двух опорах. Как и в любой реальной машине, в схеме установки присутствуют такие дефекты изготовления, как статический и динамический дисбаланс, перекос и излом осей, что приближает условия работы подшипника установки к реальным.

Конструктивно лабораторная установка, схема которой показана на рис. 2, состоит из платформы-основания, на которой крепятся две опоры и асинхронный электродвигатель типа 4А80А мощностью 1,1 кВт с номинальной частотой вращения 1000 об/мин. В опорах на подшипниках качения вращается вал с маховиком. Вал соединён с двигателем с помощью муфты.

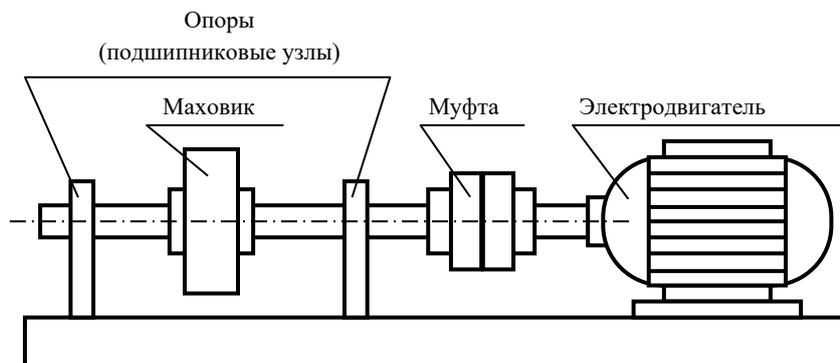


Рис. 2. Схема лабораторной установки

Из-за наличия трения в подшипниках частота вращения ротора лабораторной установки несколько отличается от номинальной частоты вращения двигателя и составляет 995 об/мин, или 16,58 Гц, или 104,2 рад/с. В правую опору установки (ближнюю к двигателю и менее доступную) помещается новый исправный подшипник. Изучаемый подшипник находится в удаленной от двигателя левой опоре в радиальном вертикальном направлении.

Для экспериментального изучения вибраций подшипника качения была использована измерительная система, показанная на рис. 3. Измерительная система включает в себя пьезоэлектрический акселерометр, усилитель сигнала, осциллограф, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и ЭВМ. Кроме этого, для калибровки измерительной системы вместо акселерометра и усилителя подключался генератор сигналов.

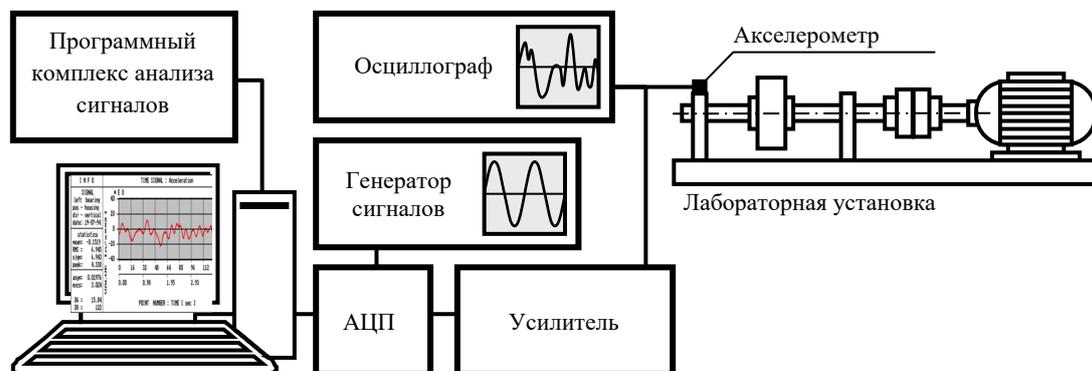


Рис. 3. Измерительная система

В левую опору лабораторной установки последовательно устанавливались три подшипника типа 180603 по ГОСТ 8882–75<sup>2</sup>:

- исправный подшипник качения;
- неисправный подшипник с развитым дефектом (интенсивное выкрашивание дорожек качения);
- подшипник в аварийном состоянии с трещиной наружного кольца.

С каждого из перечисленных подшипников были сняты сигналы виброускорения с частотой дискретизации 16 кГц и длительностью 0,12 секунд.

## 2. Построение модели подшипника с применением метода конечных элементов

Модель исправного подшипника качения, помещённого в опору лабораторной установки, изображена на рис. 4. Модель построена с использованием элементов Plane162. Упругая опора лабораторной установки жёстко закреплена по основанию. В опору вставлен подшипник — при этом опора и внешнее кольцо подшипника по линии касания имеют общие узлы. Вал и внутреннее кольцо подшипника соединены аналогично. Внешнее и внутреннее кольца подшипника упругие. Вал и сепаратор — жёсткие. Тела качения моделируются следующим образом: центральная часть шарика жёсткая, периферия упругая.

Во всех упругих элементах модели используется материал со свойствами:  $E = 210$  ГПа;  $\mu = 0,33$ ;  $\rho = 7\,850$  кг/м<sup>3</sup>. В материал введено демпфирование Рэлея.

Нагрузки на модель:

- валу, как жёсткому телу, задан закон движения — угол поворота вокруг оси  $z$  от времени  $\varphi(t) = \omega t$ ;
- к валу приложена радиальная нагрузка  $q_1 = q_0$ , направленная вертикально вниз (моделируется статическая нагрузка подшипника);
- к валу приложена радиальная нагрузка  $q_2 = q_{0/2}$ , направление которой поворачивается вместе с валом вокруг оси  $z$  (моделируется дисбаланс).

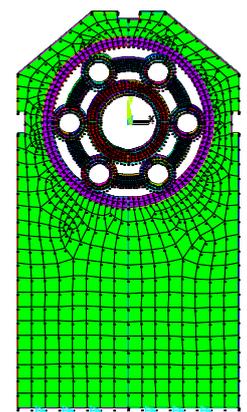


Рис. 4. Модель подшипника на основе элементов Plane162

Для облегчения задачи в вычислительном смысле были введены следующие упрощения модели.

1. Введены полые шарики, что привело к снижению числа узлов в модели. При этом плотность жесткой части шарика пересчитывается так, что масса шарика остаётся неизменной.
2. Вблизи контактных поверхностей сетка конечных элементов уплотнена. Размеры элементов в этих зонах минимальны.
3. Структурные элементы системы, жёсткостью которых можно пренебречь (вал, сепаратор), выполнены из материала «Rigid».

Особенность расчёта рассматриваемой модели заключается в том, что для последующей обработки вычисленного сигнала виброускорения (в частности, для применения к нему быстрого преобразования Фурье) необходимо, чтобы шаг записи сигнала по времени был постоянным.

## 3. Моделирование локального дефекта наружного кольца подшипника

Задачей расчётно-экспериментального исследования является получение вибросигналов подшипника для разных степеней развития локального дефекта наружного кольца подшипника качения. Задача решается путём наложения на измеренный сигнал исправного подшипника последовательности кратковременных быстрозатухающих «единичных импульсов», вызванных попаданием тела качения на дефект (ямку выкрашивания). Последовательность импульсов получим с помощью модели МКЭ.

<sup>2</sup> ГОСТ 8882–75 (СТ СЭВ 3793–82) Подшипники шариковые радиальные однорядные с уплотнениями. Технические условия. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://base.garant.ru/5926172/> (дата обращения: 09.06.2025).

Глубину ямки выкрашивания будем считать равной глубине залегания опасной точки в зоне контакта тела качения и дорожки при нарушении условия выносливости — достижении равенства амплитудного значения максимального эквивалентного напряжения в контакте тела и дорожки качения пределу выносливости материала — стали ШХ15:

$$\max \sigma_{\text{экр}} = 2\sigma_0. \quad (1)$$

Предел выносливости стали ШХ15 ГОСТ 801–79<sup>3</sup> при термообработке по типу «закалка при 840 °С в масле и отпуск при 300 °С», применяемой для шарикоподшипников, равен  $\sigma_{-1} = 650$  МПа. Однако предел выносливости  $\sigma_{-1}$  для симметричного цикла напряжений не подходит для расчётов на контактную прочность, поскольку цикл контактных напряжений является отнулевым (пульсационным). Предел выносливости в отнулевом цикле  $\sigma_0$  определяется с использованием схематизированной диаграммы предельных амплитуд, связывающей среднее напряжение цикла  $\sigma_m$  и его амплитудное напряжение  $\sigma_a = \sigma_{-1} - \psi\sigma_m$ , где коэффициент  $\psi = 0,2-0,3$  для легированных сталей. Откуда:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_{-1}}{(1 + \psi)} = 520 \text{ МПа}. \quad (2)$$

Для определения максимального эквивалентного напряжения рассмотрим напряжённое состояние в точке, расположенной на глубине  $z$  под центром эллиптической площадки контакта. Введём систему координат  $Sxyz$ :  $S$  — центр эллиптической площадки контакта, ось  $z$  перпендикулярна площадке контакта, ось  $x$  направлена по большой полуоси площадки контакта, ось  $y$  — по малой полуоси площадки контакта. Полуоси площадки контакта: большая —  $a$ , малая —  $b$ . Для удобства записи формул обозначим:  $a/b = \beta$ ,  $z/a = \zeta$ .

В площадках, параллельных координатным плоскостям, касательные напряжения равны 0, нормальные напряжения являются главными и определяются по следующим формулам:

$$\sigma_z = -p_0 \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\zeta}{\beta}\right)^2}}, \quad (3)$$

$$\sigma_x = -p_0 \cdot \frac{\beta}{1 - \beta^2} \cdot \left\{ 1 - \sqrt{\frac{\beta^2 + \zeta^2}{1 + \zeta^2}} + 2\zeta \cdot (L - K) - 2\mu \cdot \left[ 1 - \frac{1}{\beta^2} \cdot \sqrt{\frac{\beta^2 + \zeta^2}{1 + \zeta^2}} + \zeta \cdot \left( \frac{1}{\beta^2} L - K \right) \right] \right\}, \quad (4)$$

$$\sigma_y = -p_0 \cdot \frac{\beta}{1 - \beta^2} \cdot \left\{ -1 + \frac{1 + \zeta^2 \cdot \left( \frac{2}{\beta^2} - 1 \right)}{\sqrt{1 + \zeta^2} + \sqrt{\beta^2 + \zeta^2}} - 2\zeta \cdot \left( \frac{1}{\beta^2} L - K \right) + 2\mu \cdot \left[ 1 - \sqrt{\frac{\beta^2 + \zeta^2}{1 + \zeta^2}} + \zeta \cdot (L - K) \right] \right\}, \quad (5)$$

где  $K(e)$ ,  $L(e)$  — полные эллиптические интегралы, зависящие от эксцентриситета  $e$  эллиптической площадки контакта тела качения и кольца подшипника.

Эксцентриситет площадки контакта  $e$ , наибольшая интенсивность давления между соприкасающимися телами  $p_0$ , малая полуось эллиптической площадки контакта находятся из задачи Герца контакта шарообразных тел качения и тороидальной дорожки качения.

Эквивалентное растягивающее напряжение определяется из (3), (4) и (5) по гипотезе прочности Губера-Мизеса:

$$\sigma_{\text{экр}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2}. \quad (6)$$

По результатам проведённого расчёта с использованием формул (1), (2) и (6) для рассматриваемого подшипника глубина ямки выкрашивания на внутренней дорожке составила 0,56 мм, на наружной дорожке — 0,60 мм. Предполагая форму ямки выкрашивания полусферической, ее поперечный размер (диаметр) будем считать равным удвоенной глубине.

В плоской модели исправного подшипника качения на наружной дорожке качения введем дефект в виде  $v$ -образной выемки (рис. 5). Ширину и глубину дефекта округлим и примем равными 0,5 мм.

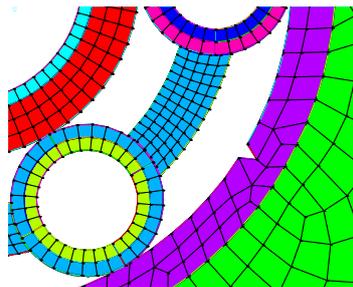


Рис. 5. Модель дефекта наружного кольца подшипника

<sup>3</sup> ГОСТ 801–79. Шарикоподшипниковая сталь.

Такое изменение в модели исправного подшипника может описывать единичную ямку выкрашивания. Причём для единичной ямки выкрашивания получить экспериментальный вибросигнал практически невозможно из-за большой длительности и трудоёмкости эксперимента. Рассмотрен также локальный дефект удвоенной ширины, соответствующий «двойной» ямке выкрашивания — двум близко расположенным ямкам, слившимся в одну. С использованием данных моделей в программе LS-DYNA были рассчитаны сигналы виброускорения в вертикальном направлении верхней точки опоры, лежащей на оси симметрии.

Расчет проводился для следующих параметров:

- размеры конечных элементов в зонах контакта  $a_{эл} \approx 0,8$  мм;
- величина демпфирования в материале  $b = 0,25$ ;
- параметр радиальной нагрузки  $q_0 = 2160$  кН/м;
- время реализации процесса  $T = 1,2$  с;
- шаг записи сигнала по времени  $\Delta t = 1$  мкс.

#### 4. Обработка набора сигналов

В результате описанных выше методов измерения и симуляции был сформирован набор вибросигналов, включающий три сигнала, измеренных на лабораторной установке, и два сигнала, полученных путём смещения смоделированных импульсов дефекта с реальным сигналом исправного подшипника. Комбинированные сигналы предназначены для заполнения пробелов в выборке и компенсации отсутствия экспериментальных данных по подшипникам с дефектом на ранней стадии.

Для анализа временных и частотных характеристик вибросигналов применялось быстрое преобразование Фурье, позволившее получить амплитудные спектры в частотной области. Анализ спектров проводился в широком частотном диапазоне (0–8 кГц).

Для выделения импульсов, вызванных локальными дефектами, сигналы фильтровались в октавной полосе частот 5,4 кГц. Полученные узкополосные сигналы использовались для идентификации импульсов дефекта и расчёта их максимальных амплитуд.

Среднее значение максимальных амплитуд импульсов рассчитывалось как среднее арифметическое по всем выделенным импульсам в узкополосном сигнале. Этот параметр использовался для количественной оценки выраженности дефекта.

Для количественной оценки и сравнения сигналов были рассчитаны следующие статистические параметры: среднеквадратичное значение (СКЗ) виброускорения, пик-фактор и коэффициент эксцесса. Выбор этих параметров обоснован их эффективностью в выявлении локальных дефектов подшипников [11, 12].

СКЗ рассчитывалось по следующей формуле [13]:

$$\text{СКЗ} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}, \quad (7)$$

где  $x_i$  —  $i$ -тое значение виброускорения,  $N$  — число отсчетов сигнала.

Пик-фактор определялся как отношение пикового значения сигнала к СКЗ [14]:

$$Pf = \frac{\max(x)}{\text{СКЗ}}, \quad (8)$$

где  $x$  — значения виброускорения.

Коэффициент эксцесса рассчитывался по формуле для большой выборки ( $N > 100$ ) [15, 16]:

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^4, \quad (9)$$

где  $\bar{x}$  обозначает среднее арифметическое значение виброускорения,  $s$  — стандартное отклонение.

Рассчитанные параметры были использованы для построения таблицы соответствия степени развития дефекта наружного кольца подшипника, что позволило оценить правдоподобие смоделированных сигналов и их пригодность для тестирования методов вибродиагностики.

### Результаты исследования

#### 1. Измеренные сигналы

Были получены три сигнала, соответствующие различным состояниям подшипника: исправное состояние, развитый дефект (множественные ямки), аварийное состояние (трещина кольца). На рис. 6 представлены формы вибросигналов в временной области (1 — исправный подшипник качения; 2 — неисправный подшипник с развитым выкрашиванием дорожек качения; 3 — подшипник в аварийном состоянии с трещиной наружного кольца).

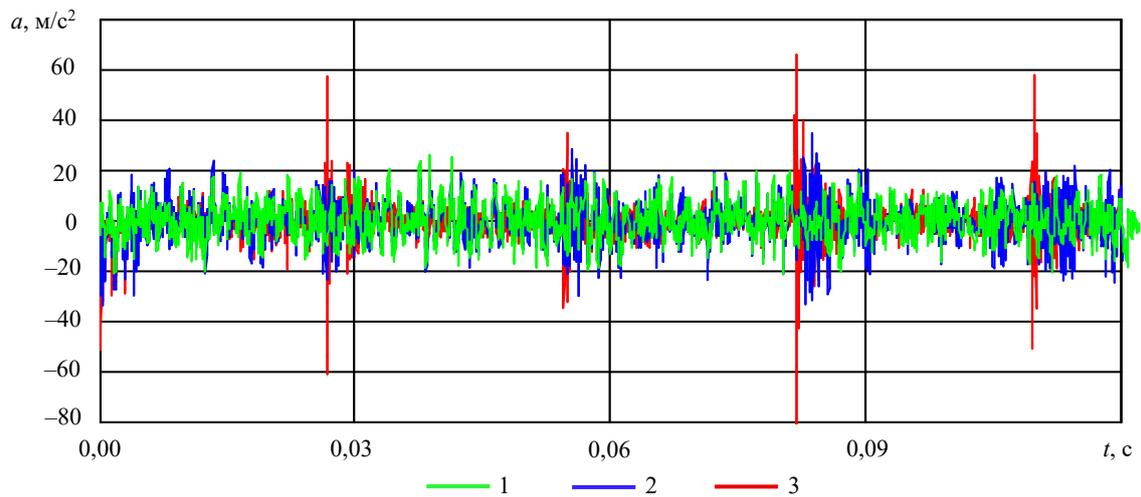


Рис. 6. Измеренные сигналы виброускорения

На рис. 7 показаны амплитудные спектры сигналов в частотной области (1 — исправный подшипник качения; 2 — неисправный подшипник с развитым выкрашиванием дорожек качения; 3 — подшипник в аварийном состоянии с трещиной наружного кольца). При развитии дефекта наблюдается рост амплитуд в высокочастотной области (около 5,4 кГц), а в сигналах появляются последовательности кратковременных импульсов.

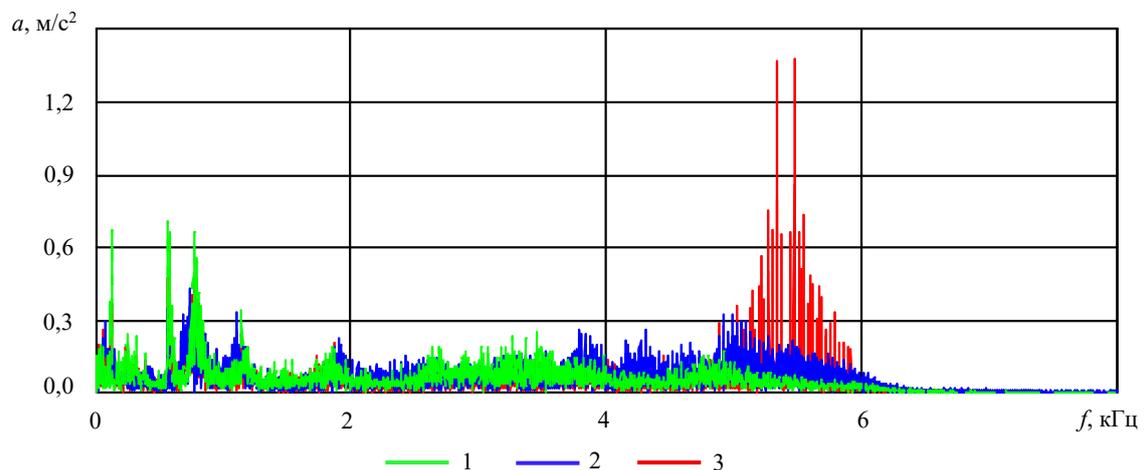


Рис. 7. Амплитудные спектры измеренных вибросигналов

После фильтрации в октавной полосе 5,4 кГц были выделены импульсы дефекта. Узкополосные сигналы представлены на рис. 8 и 9.

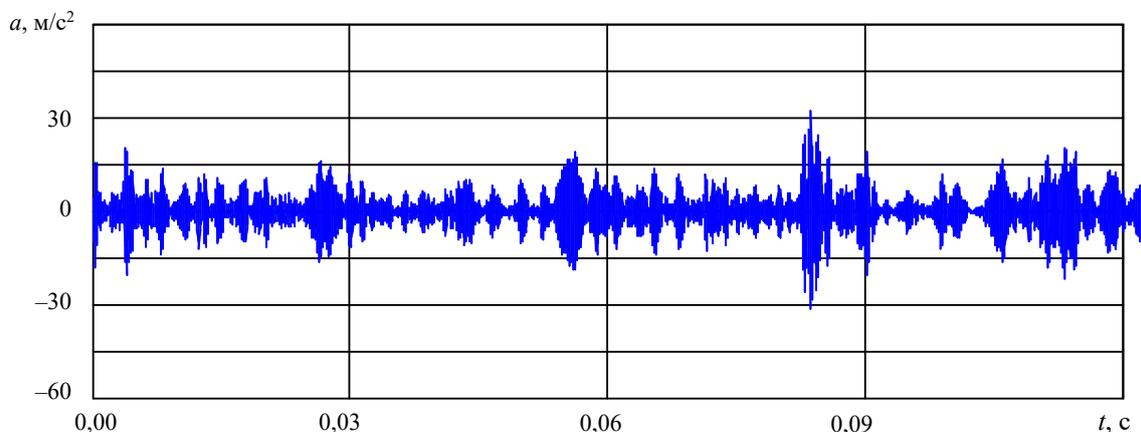


Рис. 8. Узкополосный вибросигнал подшипника качения с развитым выкрашиванием дорожек качения

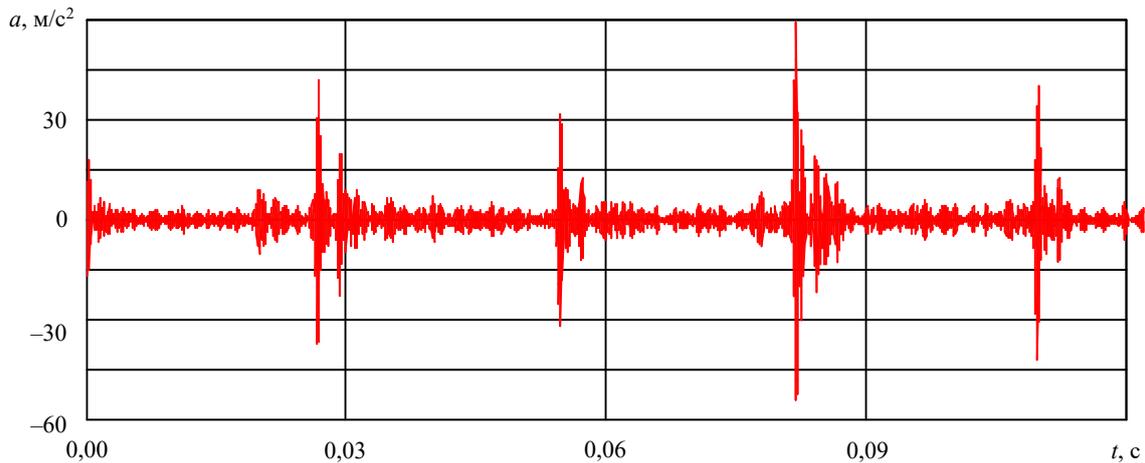


Рис. 9. Узкополосный вибросигнал подшипника качения с трещиной наружного кольца

Среднее значение максимальных амплитуд импульсов составило:  $24,3 \text{ м/с}^2$  — для крупной множественной ямки (последовательность самых сильных импульсов в сигнале подшипника с выкрашиванием);  $39,8 \text{ м/с}^2$  — для трещины кольца.

## 2. Комбинированные сигналы

Импульсы, полученные динамическим моделированием модели МКЭ, изображены на рис. 10. Исправный сигнал с установки, с которым смешивались полученные импульсы, приведен на рис. 11.

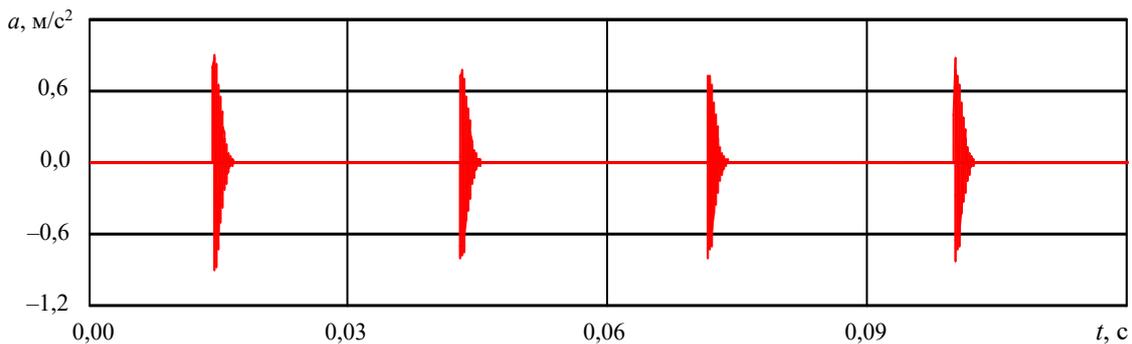


Рис. 10. Последовательность полученных импульсов

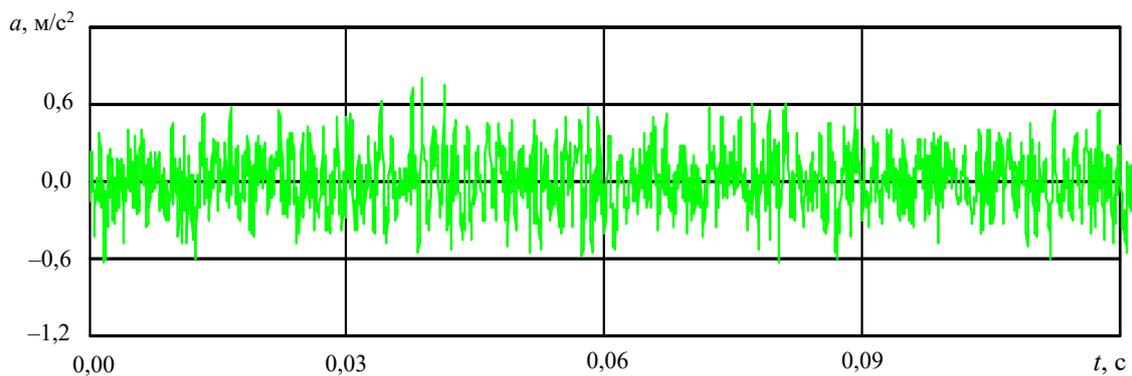


Рис. 11. Измеренный вибросигнал исправного подшипника

Были сформированы два комбинированных сигнала, соответствующие ранним стадиям дефекта: с единичной и двойной ямкой выкрашивания. На рис. 12 показаны временные представления полученных сигналов (1 (зелёная линия) — вибросигнал исправного подшипника; 2 (синяя линия) — комбинированный вибросигнал неисправного подшипника с единичной ямкой выкрашивания; 3 (красная линия) — комбинированный вибросигнал неисправного подшипника с двойной ямкой выкрашивания).

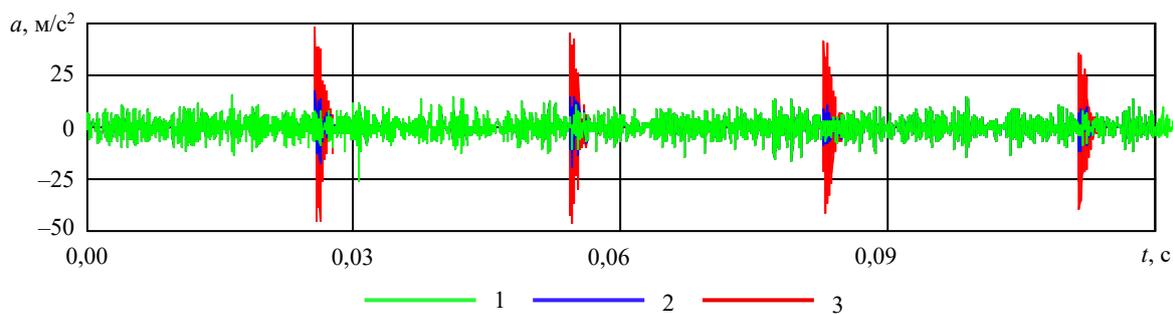


Рис. 12. Комбинированные вибросигналы подшипника качения для разных степеней развития дефекта

Сигнал с единичной ямкой визуально мало отличается от исправного вследствие относительной малости импульсов.

После фильтрации в полосе 5,4 кГц были выделены импульсы дефекта. На рис. 13 представлен узкополосный сигнал для единичной ямки.

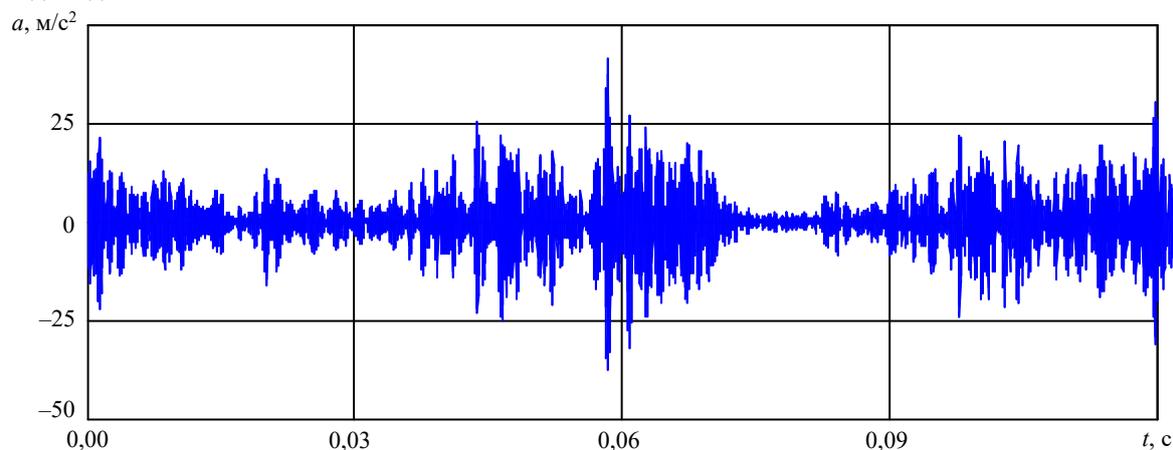


Рис. 13. Узкополосный сигнал подшипника с единичной ямкой выкрашивания

Среднее значение максимальных амплитуд импульсов составило:

– 9,6 м/с<sup>2</sup> — для единичной ямки;

– 14,7 м/с<sup>2</sup> — для двойной ямки.

### 3. Сравнение статистических параметров измеренных и расчетных сигналов

Для всех сигналов были рассчитаны статистические параметры:

– среднее значение максимальной амплитуды импульсов дефекта  $A$ ;

– среднее квадратическое значение СКЗ, рассчитанное по формуле (7);

– пик-фактор  $Pf$ , рассчитанный по формуле (8);

– коэффициент эксцесса  $E$ , рассчитанный по формуле (9).

Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты статистического анализа расчетных вибросигналов  
для исправного и дефектных подшипников качения

Сигнал	Техническое состояние	$A$ , м/с <sup>2</sup>	СКЗ	$Pf$	$E$
Измеренный	Исправное, нет дефекта	0	6,81	3,04	3,03
Комбинированный	Неисправное, ранняя степень развития — единичная ямка	10	6,86	3,86	3,10
Комбинированный	Неисправное, развитый дефект — двойная ямка	15	6,93	4,49	3,27
Измеренный	Неисправное, развитый дефект — множественная ямка	25	7,15	5,64	4,30
Измеренный	Аварийное, трещина кольца	40	7,67	6,96	8,09

На рис. 14 показано изменение нормированных значений статистических параметров в зависимости от степени развития дефекта.

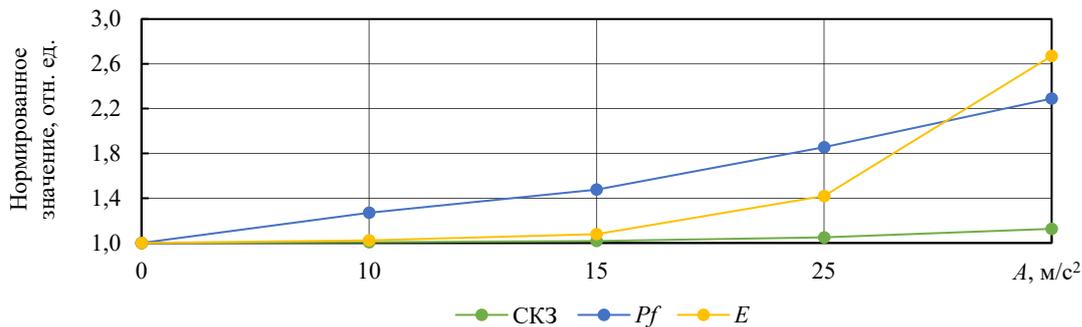


Рис. 14. Рост статистических параметров в зависимости от развития дефекта

**Обсуждение.** Основной целью данного исследования была разработка методики формирования набора вибрационных сигналов подшипника на различных стадиях развития локального дефекта наружного кольца. Предложенный подход, сочетающий экспериментальные данные и численное моделирование, позволил восполнить пробелы в экспериментальной базе, особенно на ранних стадиях дефекта, получение которых в лабораторных условиях затруднено из-за отсутствия соответствующих образцов.

Анализ полученных сигналов показал, что по мере развития дефекта наблюдаются характерные изменения как во временной, так и в частотной областях. В сигналах появляются последовательности кратковременных импульсов, а в спектрах — рост амплитуд в окрестности собственной частоты подшипникового узла —  $\sim 5,4$  кГц. Эти изменения обусловлены ударным характером взаимодействия тел качения с дефектной поверхностью. При попадании дефекта в зону контакта возникает удар, возбуждающий собственные колебания узла. Амплитуда этих колебаний модулируется частотой мелькания дефекта, что проявляется в виде затухающих импульсов в узкополосном сигнале.

Статистический анализ выявил устойчивый рост ключевых диагностических параметров — СКЗ, пик-фактора и коэффициента эксцесса — по мере увеличения степени повреждения, что согласуется с ожидаемым поведением вибрационного сигнала при развитии локального дефекта. Однако ключевым аспектом анализа была проверка правдоподобия смоделированных сигналов, включённых в набор для компенсации отсутствия экспериментальных данных на ранних стадиях дефекта.

Анализ показал, что значения параметров для комбинированных сигналов логично вписываются в общую тенденцию, наблюдаемую на измеренных сигналах. Так, для сигнала с единичной ямкой (ранняя стадия) СКЗ составило  $6,86$  м/с², пик-фактор —  $3,86$ , эксцесс —  $3,10$ ; для сигнала с двойной ямкой —  $6,93$  м/с²,  $4,49$  и  $3,27$  соответственно. Эти значения находятся между исправным состоянием и развитым дефектом, что указывает на последовательное и физически обоснованное изменение сигнала при увеличении степени повреждения.

Таким образом, смоделированные сигналы не только восполняют пробелы в наборе, но и сохраняют корректную динамику изменения диагностических параметров, что подтверждает их валидность и пригодность для использования в качестве эталонных сигналов при разработке и тестировании методов вибродиагностики. Однако анализ трендовой характеристики показал, что рост параметров не соответствует пороговым значениям, указанным в стандарте ГОСТ Р ИСО 20816-1-2021<sup>4</sup> (увеличение в 2,5 раза для неисправного состояния и в 10 раз — для аварийного). Это позволяет предположить, что унифицированные пороги могут быть недостаточно точными для конкретных типов оборудования и требуется индивидуальная калибровка диагностических моделей на основе экспериментальных или смоделированных данных. Предложенная методика позволяет проводить такую калибровку без необходимости длительного сбора статистики отказов или намеренного повреждения оборудования.

Важным преимуществом подхода является возможность моделирования развития дефекта для конкретного подшипника и условий эксплуатации. Тем не менее, метод имеет ограничения. В частности, создание конечно-элементной модели требует значительных временных и квалификационных ресурсов. Для снижения трудоёмкости были проанализированы основные характеристики импульсов, генерируемых дефектом:

- несущая частота импульса равна собственной частоте подшипникового узла —  $5,4$  кГц;
- наибольшие амплитуды импульсов — случайные со средним значением  $1$  м/с²;
- частота следования импульсов совпадает с частотой дефекта (мелькания тел качения по наружному кольцу);
- начальная фаза — случайная;
- форма импульса — затухающая по экспоненте.

<sup>4</sup> ГОСТ Р ИСО 20816-1-2021. Вибрация. Измерения вибрации и оценка вибрационного состояния машин. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200182677> (дата обращения: 20.05.2025).

Распределение амплитуд и характер затухания соответствуют тем, что наблюдаются в реальных сигналах с трещиной кольца. Это указывает на то, что импульс, порождаемый дефектом, поддается аналитическому описанию, что позволяет заменить ресурсоёмкое МКЭ-моделирование моделированием заранее заданных форм импульсов и тем самым значительно упростить и ускорить процедуру генерации сигналов.

Таким образом, предложенная методика не только решает задачу формирования полного набора сигналов для вибродиагностики, но и открывает перспективу создания индивидуализированных диагностических моделей, адаптированных под конкретное оборудование. В будущем планируется разработка упрощённого алгоритма генерации импульсов на основе полученных характеристик, что сделает методику более доступной для практического применения.

**Заключение.** В ходе исследования была разработана методика формирования тестового набора вибросигналов подшипников качения, сочетающая экспериментальные данные и численное моделирование. Предложенный подход позволяет воспроизводить различные стадии развития локального дефекта наружного кольца, включая ранние, для которых отсутствуют экспериментальные образцы, без необходимости длительного накопления данных или повреждения оборудования.

Анализ показал, что смоделированные сигналы корректно вписываются в общую тенденцию изменения диагностических параметров (СКЗ, пик-фактор, эксцесс), что подтверждает их валидность и пригодность для тестирования методов вибродиагностики. Полученный набор сигналов может служить стандартизированной основой для сравнительной оценки алгоритмов диагностики.

Практическая значимость работы заключается в сокращении затрат на экспериментальные исследования, ускорении верификации диагностических моделей и повышении надёжности оценки технического состояния оборудования.

В дальнейшем планируется упрощение генерации импульсов на основе выявленных математических характеристик, расширение методики на другие типы подшипников и дефектов, а также её интеграция с методами анализа данных для создания решений в области предиктивного обслуживания.

#### Список литературы / References

1. Nguyen Duc Thuan, Hoang Si Hong. HUST Bearing: A Practical Dataset for Ball Bearing Fault Diagnosis. *arXiv*. 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.12533>
2. Jing Liu, Yimin Shao. A New Dynamic Model for Vibration Analysis of a Ball Bearing due to a Localized Surface Defect Considering Edge Topographies. *Nonlinear Dynamics*. 2015;79:1329–1351. <https://doi.org/10.1007/s11071-014-1745-y>
3. Halmos F, Wartzack S, Bartz M. Investigation of Failure Mechanisms in Oil-Lubricated Rolling Bearings under Small Oscillating Movements: Experimental Results, Analysis and Comparison with Theoretical Models. *Lubricants*. 2024;12(8):271. <https://doi.org/10.3390/lubricants12080271>
4. Jain PH, Bhosle SP. Mathematical Modeling, Simulation and Analysis of Non-Linear Vibrations of a Ball Bearing due to Radial Clearance and Number of Balls. *Materials Today: Proceedings*. 2023;72(3):927–936. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.093>
5. Menck O. The Finite Segment Method—A Numerical Rolling Contact Fatigue Life Model for Bearings Subjected to Stochastic Operating Conditions. *ASME Journal of Tribology*. 2023;145(3):031201. <https://doi.org/10.1115/1.4055916>
6. Wrzochal M, Adamczak S. The Problems of Mathematical Modelling of Rolling Bearing Vibrations. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. 2020;68(6):1363–1372. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2020.135398>
7. Lihai Chen, Ao Tan, Lixiu Yang, Xiaoxu Pang, Ming Qiu. Defect Size Evaluation of Cylindrical Roller Bearings with Compound Faults on the Inner and Outer Races. *Mathematical Problems in Engineering*. 2022;2022(2):1–12. <https://doi.org/10.1155/2022/6070822>
8. Malanchuk Y, Moshynskiy V, Korniienko V, Malanchuk Z. Modeling the Process of Hydromechanical Amber Extraction. *E3S Web of Conferences*. 2018;60:00005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000005>
9. Ali Safian, Hongsheng Zhang, Xihui Liang, Nan Wu. Dynamic Simulation of a Cylindrical Roller Bearing with a Local Defect by Combining Finite Element and Lumped Parameter Models. *Measurement Science and Technology*. 2021;32(12):125111. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac2317>
10. Tianhe Wang, Lei Chen, Hong Lu, Shaojun Wang, Zhangjie Li, Wei Zhang, et al. Finite Element Dynamic Model and Vibration Signal Simulation of Rolling Bearing with Local Faults. In: *Proc. 18th International Manufacturing Science and Engineering Conference*. New York NY: ASME. 2023;2:105504. <https://doi.org/10.1115/MSEC2023-105504>
11. Gururaj Upadhyaya, Kumar HS. A Comparative Study of Statistical Features Used in Rolling Element Bearing Health Diagnosis Using Six Sigma Approach. In: *Proc. 2nd Indian International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. Southfield, MI: IEOM Society International; 2022. <https://doi.org/10.46254/IN02.20220244>
12. Jain PH, Bhosle SP. Study of Effects of Radial Load on Vibration of Bearing Using Time-Domain Statistical Parameters. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1070:012130. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1070/1/012130>

13. Trufanov NN, Churikov DV, Kravchenko OV. Application of Spectral Analysis Methods for Data Pre-processing of Anomaly Detection Problem of Vibration Diagnostics in Non-destructive Testing. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2127:012028. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2127/1/012028>

14. Garad A, Sutar KB, Shinde VJ, Pawar AC. Analysis of Vibration Signals of Rolling Element Bearing with Localized Defects. *International Journal of Current Engineering and Technology*. 2017;7:37–42.

15. Tetter V, Tetter A, Denisova I. Researching the Possibility of Determining the Technical Condition of Rolling Bearings by the Kurtosis Factor. In: *Proc. International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. New York City: IEEE; 2023. P. 149–153. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272799>

16. Puzyr V, Mykhalkiv S. Classification of the Technical Condition of Rolling Bearing by the Scalar Indicators and Support Vector Machines. *Progresivna tehnika, tehnologija ta inzenerna osvita*. 2023.

**Об авторах:**

**Зоя Александровна Колосова**, аспирант кафедры «Автоматика и управление» Южно-Уральского государственного университета (454080, Российская Федерация, г. Челябинск, пр. Ленина, д. 76), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearchGate](#), [kolosovaza@susu.ru](mailto:kolosovaza@susu.ru)

**Ольга Петровна Колосова**, кандидат технических наук, профессор кафедры «Техническая механика» Южно-Уральского государственного университета (454080, Российская Федерация, г. Челябинск, пр. Ленина, д. 76), [ORCID](#), [kolosovaop@susu.ru](mailto:kolosovaop@susu.ru)

**Дмитрий Александрович Шнайдер**, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и управление» Южно-Уральского государственного университета (454080, Российская Федерация, Челябинская область, г. Челябинск, пр. Ленина, д. 76), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), [shnaiderda@susu.ru](mailto:shnaiderda@susu.ru)

**Заявленный вклад авторов:**

З.А. Колосова: формальный анализ, написание черновика рукописи.

О.П. Колосова: разработка методологии, визуализация.

Д.А. Шнайдер: разработка концепции, внесение замечаний и исправлений в текст рукописи.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

**About the Authors:**

**Zoya A. Kolosova**, Postgraduate student of the Automation and Control Department, South Ural State University (76, Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation), [ORCID](#), [SPIN-code](#), [ScopusID](#), [ResearchGate](#), [kolosovaza@susu.ru](mailto:kolosovaza@susu.ru)

**Olga P. Kolosova**, Cand.Sci. (Eng.), Professor of the Technical Mechanics Department, South Ural State University (76, Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation), [ORCID](#), [kolosovaop@susu.ru](mailto:kolosovaop@susu.ru)

**Dmitry A. Shnayder**, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Automation and Control Department, South Ural State University (76, Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation), [ORCID](#), [SPIN-code](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), [shnaiderda@susu.ru](mailto:shnaiderda@susu.ru)

**Claimed Contributorship:**

**ZA Kolosova:** formal analysis, writing – original draft preparation.

**OP Kolosova:** methodology, visualization.

**DA Shnayder:** conceptualization, writing – review & editing.

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

**All authors have read and approved the final manuscript.**

Поступила в редакцию / Received 16.06.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 02.07.2025

Принята к публикации / Accepted 21.07.2025

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



УДК 004.94; 303.732

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-256-268>

## Усовершенствование диаграмм Business Process Model and Notation с помощью подхода «узел – функция – объект»

 А.Г. Жихарев , Е.В. Малкуш, С.И. Маторин  

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,

г. Белгород, Российская Федерация

✉ [matorin@bsuedu.ru](mailto:matorin@bsuedu.ru)

EDN: PWKCXM

### Аннотация

**Введение.** При моделировании бизнес-процессов широко используется нормативная система (нотация) BPMN. Однако она недостаточно выразительна для представления технических и производственных механизмов. BPMN плохо описывает параллельные потоки с жесткими ресурсными ограничениями, слабо поддерживает моделирование физических параметров и технологических условий. Эти и другие недочеты ухудшают анализ производительности и надежности, снижают применимость моделей для оптимизации и верификации. Цель представленной работы — создать метод, который задействует альтернативную нотацию и таким образом ограничит влияние перечисленных недостатков BPMN при моделировании производственных процессов.

**Материалы и методы.** Базой нового решения было сопоставление BPMN и нотации для системы «узел – функция – объект» (УФО). Элементы диаграмм — это перекрестки некоторых связей (узлы). В них расположены функциональные элементы (функции, процессы), имеющие в некоторых случаях и характеристики субстанции (объекты). Сравнительный анализ нормативных систем BPMN и УФО показал возможность взаимного преобразования диаграмм. Процессы визуализировали с помощью CASE-инструмента (от англ. computer aided software engineering) NFO-toolkit (от англ. набор инструментов УФО) и программы Stormbpmn по правилам BPMN. УФО-диаграмму описали на языке XPD<sup>1</sup>.

**Результаты исследования.** Разработаны шесть последовательных операций для преобразования УФО-диаграммы в BPMN и четыре — для обратной трансформации. В контексте и декомпозиции показана схема выпуска комплектующих — от требования на разработку технологического процесса до выдачи изделий. Представлены декомпозиции УФО-элементов «Термопластавтомат», «Мастер» и «Отдел разработки», каждому из которых соответствует декомпозиция одноименной дорожки пула BPMN-нотации. Доказано, что преобразование диаграммы BPMN в УФО улучшает описание процесса в целом и с любой степенью подробности. УФО-подход не обращается к графической системе обозначений BPMN, из-за которой возрастают трудозатраты и риски ошибок моделирования. На языке XPD описаны процессы, соединители, разветвители, связи, внешняя сущность и другие элементы УФО-диаграмм.

**Обсуждение.** Основные преимущества УФО-нотации перед BPMN-подходом: более легкая процедура создания моделей и лучшая их наглядность. Простой графический набор УФО сокращает время моделирования и повышает его точность. УФО-подход ориентирован на учет информационных и материальных связей. Значит, можно проводить функционально-стоимостной CASE-анализ, что невыполнимо методом BPMN. Язык XPD подходит для описания элементов УФО-диаграмм, причем решение можно русифицировать.

<sup>1</sup> XPD Support and Resources. URL: <https://wfmc.org/xpd/> (дата обращения: 08.06.2025).

**Заключение.** Содержательная избыточность и другие недостатки нотации BPMN исключаются при использовании более универсальной и удобной нотации — УФО. Итоги исследования будут способствовать развитию теории и практики графоаналитического моделирования производственных процессов, позволят упростить процедуру их разработки и автоматизации.

**Ключевые слова:** графоаналитическое моделирование производственных процессов, модель автоматизации процесса, нотация BPMN, нотация УФО, система «узел – функция – объект», CASE-инструмент NFO-toolkit, язык XPDЛ

**Благодарности.** Авторы выражают признательность коллегам по кафедре информационных и робототехнических систем Белгородского государственного национального исследовательского университета за помощь в подборе материалов по BPMN. Благодарим редакционную команду журнала и рецензента за компетентную экспертизу и ценные рекомендации по улучшению статьи.

**Для цитирования.** Жихарев А.Г., Малкуш Е.В., Маторин С.И. Усовершенствование диаграмм business process model and notation с помощью подхода «узел – функция – объект». *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(3):256–268. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-256-268>

*Original Theoretical Research*

## Improving Business Process Model and Notation Diagrams with the Node-Function-Object Approach

Alexander G. Zhikharev , Elena V. Malkush, Sergey I. Matorin  

Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation

 [matorin@bsuedu.ru](mailto:matorin@bsuedu.ru)

### Abstract

**Introduction.** The BPMN standard system (notation) is widely used in business process modeling. However, it is not expressive enough to represent technical and production mechanisms. BPMN poorly describes parallel flows with strict resource constraints, insufficiently supports modeling of physical parameters and technological conditions. These and other shortcomings worsen the analysis of performance and reliability, reduce the applicability of models for optimization and verification. The objective of the presented work is to create a method that uses an alternative notation and thus limits the impact of the listed shortcomings of BPMN in modeling production processes.

**Materials and Methods.** The basis of the new solution was a comparison of BPMN and the notation for the system “node – function – object” (NFO). The elements of the diagrams were the intersections of some connections (nodes). They contained functional elements (functions, processes), which in some cases also had the characteristics of a substance (objects). A comparative analysis of the normative systems of BPMN and NFO showed the possibility of mutual transformation of diagrams. The processes were visualized using the CASE (Computer Aided Software Engineering) tool NFO-toolkit and the Stormbpmn program according to the BPMN rules. The NFO diagram was described in the XPDЛ<sup>2</sup> language.

**Results.** Six sequential operations have been developed for converting a NFO diagram into BPMN, and four — for the reverse transformation. The scheme of component production is shown in the context and decomposition, from the requirement for the development of the workflow to the issuance of products. Decompositions of the NFO elements “Injection Molding Machine”, “Master” and “Development Department” are presented, each of which corresponds to a decomposition of the same-name track of the BPMN notation pool. It has been proven that converting a BPMN diagram to a NFO improves the description of the process as a whole and to any degree of detail. The NFO approach does not refer to the graphical notation system of BPMN, which increases labor costs and the risk of simulation errors. The XPDЛ language describes processes, connectors, splitters, relationships, external entities, and other elements of NFO diagrams.

**Discussion.** The main advantages of NFO notation over the BPMN approach are: easier procedure for creating models and their better visualization. A simple graphic set of NFO reduces simulation time and increases its accuracy. The NFO approach is focused on taking into account information and material connections. This means that it is possible to conduct functional cost CASE analysis, which is impossible using the BPMN method. The XPDЛ language is suitable for describing elements of NFO diagrams, and the solution can be Russified.

**Conclusion.** Content redundancy and other shortcomings of the BPMN notation are eliminated through using a more universal and convenient notation — NFO. The research results will contribute to the development of the theory and practice of graph-analytic modeling of production processes, and simplify the procedure for their development and automation.

<sup>2</sup> XPDЛ Support and Resources. URL: <https://wfmc.org/xpdl/> (accessed: 08.06.2025).

**Keywords:** graph-analytic modeling of production processes, process automation model, BPMN notation, NFO notation, “node — function — object” system, CASE tool NFO-toolkit, XPD language

**Acknowledgements.** The authors would like to thank their colleagues of the Department of Information and Robotic Systems of Belgorod State National Research University for their assistance in selecting materials on BPMN. In addition, they appreciate the Editorial team of the Journal and the reviewer for their competent expertise and valuable recommendations for improving the article.

**For citation.** Zhikharev AG, Malkush EV, Matorin SI. Improving Business Process Model and Notation Diagrams with the Node-Function-Object Approach. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(3):256–268. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-256-268>

**Введение.** Информационные системы и технологии обеспечивают обязательную для современной экономики автоматизацию технологических процессов и производств [1]. Так, в 2024 году аналитический портал IaaSaaSaaS сообщил, что BPM-системами (от англ. business process management system) в России пользуются около 12 тыс. организаций, внедрением занимаются сотни ИТ-компаний<sup>3</sup>.

Неотъемлемая часть процедуры создания таких решений — формулирование требований к ним. Это важный элемент проектирования [2], который базируется на моделировании и анализе автоматизируемых процессов [3]. Анализ выполняется как с помощью математического инструментария, так и графических нотаций (семейства IDEF, DFD, EPC, BPMN и т. д. [4]). У каждой из перечисленных групп есть особенности [5], которые по-разному оцениваются исследователями и пользователями [6].

Одна из самых популярных нотаций — BPMN (от англ. BPMN specification — business process model and notation)<sup>4</sup>. По данным статистического отчета компании «Логика бизнеса», BPMN широко применяется для описания бизнес-процессов и занимает более половины рынка — 54 % [7]. Именно ее рекомендуют использовать, например, в работе [8]. При этом у BPMN есть существенные недостатки<sup>5</sup>, и они неоднократно обсуждались в литературе. Ниже перечислены некоторые из них:

- сложная семантика и методы моделирования [8];
- трудночитаемые линейные схемы при использовании нескольких дорожек [9];
- невозможность указать стоимость исполнения действий в денежном эквиваленте [10];
- соединяющие элементы не отображают материальные и информационные потоки [10];
- сложно моделировать большие иерархические системы, к которым относятся крупные организации [11].

Специалисты по моделированию бизнес-процессов признают, что из-за таких недостатков при построении диаграмм в нотации BPMN часто возникают ошибки. Диаграммы бывают непонятными. Это усложняет взаимодействие между разработчиками и может стать причиной нарушения сроков проектирования<sup>6, 7</sup>. Были даже предложения отказаться от BPMN. Автор одной такой работы<sup>8</sup> утверждает, что у рассматриваемой нотации нет особых преимуществ. Он сравнивает BPMN с карго-культу, т. е. механическим копированием действий без понимания сути процессов. Отмечается, что систему предложили не практики бизнеса, а специалисты по созданию программного обеспечения.

В BPMN интегрированы средства перевода диаграмм на языки исполнения бизнес-процессов (например, XPDDEL) [12], и в литературе есть рекомендации по преобразованию других нотаций в BPMN. Так, в [13] с этой точки зрения рассматривается IDEF0.

Таким образом, недостатки BPMN известны и широко обсуждаются, однако в открытом доступе нет конструктивных предложений по их преодолению. Представленное исследование призвано восполнить этот пробел. Цель данной работы — создать альтернативные, более универсальные нотации, которые позволят снизить влияние перечисленных выше недостатков BPMN при моделировании производственных и технологических процессов. В первую очередь следует решить задачи, связанные со сложностями моделирования и чтения диаграмм.

**Материалы и методы.** Авторы [14] исследовали графоаналитические нотации как нормативные системы. В этом смысле нотация системно-объектного подхода «узел – функция – объект» (УФО-подход) оказалась более универсальной в сравнении с другими графическими нотациями. В данном случае универсальность обеспечивается представлением любой системы в виде элемента «узел – функция – объект» [10], для которого верны приведенные ниже утверждения.

<sup>3</sup> Рынок BPM-систем 2024: аналитический обзор. URL: <https://iaaaspaas.ru/rating/bpm-sistemy> (дата обращения: 12.06.2025).

<sup>4</sup> Топ-8 методов анализа бизнес-процессов для 2025 года. URL: <https://listohod.ru/blog/top-8-metodov-analiza-biznes-processov> (дата обращения: 12.06.2025).

<sup>5</sup> Нотация BPMN: плюсы, минусы и область применения URL: [https://www.directum.ru/blog-post/notacija\\_bpmn\\_pljusy\\_minusy\\_i\\_oblast\\_primeneniya](https://www.directum.ru/blog-post/notacija_bpmn_pljusy_minusy_i_oblast_primeneniya) (дата обращения: 12.06.2025).

<sup>6</sup> Типичные ошибки при моделировании бизнес-процессов в нотации BPMN. URL: [https://www.artofba.com/post/common\\_mistakes\\_bpmn\\_diagrams\\_part1\\_ru](https://www.artofba.com/post/common_mistakes_bpmn_diagrams_part1_ru) (дата обращения: 12.06.2025).

<sup>7</sup> Топ-25 ошибок в BPMN. URL: <https://bpmn2.ru/blog/top-25-oshibok-bpmn> (дата обращения: 12.06.2025).

<sup>8</sup> Почему следует отказаться от BPMN URL: <https://habr.com/ru/articles/681262/> (дата обращения: 12.06.2025).

**Узел** — *структурный элемент* надсистемы. Он представляет собой перекресток связей (потоков передаваемых элементов) системы с другими системами в этой надсистеме.

**Функция** — *функциональный элемент*. Выполняет определенную роль для поддержания надсистемы путем балансирования данного узла (преобразования входных потоков в выходные).

**Объект** — *субстанциальный элемент*. Данная функция реализуется в виде некоторого материального образования, обладающего конструктивными, эксплуатационными и другими характеристиками.

Содержательная классификация связей как потоков элементов предполагает два уровня. В материальных связях выделяют вещественные (S) и энергетические (E). В информационных — связи по данным (D) и по управлению (C).

Анализ существующих графических нотаций показывает, что их алфавит и, соответственно, диаграммы — это перекрестки связей, в которых расположены функциональные элементы, имеющие в некоторых случаях характеристики субстанции. Таким образом, все алфавитные элементы всех графических нотаций представляют собой узлы с функциями и зачастую с объектными характеристиками. Это позволяет рассматривать нотацию УФО-подхода, т. е. УФО-нотацию как универсальную [14].

Ниже перечислены соответствия нотаций BPMN и УФО. Они обнаруживаются при сравнительном анализе и будут базовыми для решения задач преобразований диаграмм и их оценки.

1. Activity (от англ. активность), BPMN соответствует УФО-элемент, у которого определены и узел, и функция, а также присвоено имя «Подпроцесс». На диаграмме декомпозиции такого элемента располагаются УФО-элементы с названием «Задачи». Пулу или дорожке BPMN как контексту подпроцессов соответствует УФО-элемент, у которого определены и узел, и функция, и объект.

2. Gateway (от англ. шлюз) BPMN соответствует УФО-элемент, у которого определены и узел, и одна из логических функций: «И», «ИЛИ», «Исключительное ИЛИ», «Комплекс» и т. п.

3. Sequence Flow (от англ. последовательность потока) BPMN соответствует связи УФО-нотации с именем «Передача управления».

4. Message Flow (от англ. поток сообщений) BPMN соответствует связи УФО-нотации с именем «Сообщение».

5. Event (от англ. событие) BPMN соответствует связи УФО-нотации с именем соответствующего события.

Для визуализации задействовали CASE-инструмент (от англ. computer aided software engineering) UFO-toolkit (от англ. набор инструментов УФО) и программу Stormbpmn в соответствии с правилами BPMN.

Итак, согласно заявленной цели исследования задействуем перечисленные материалы и методы, чтобы оценить потенциал преобразований диаграмм УФО в диаграммы BPMN и обратно. Рассмотрим возможность полноценного замещения диаграмм BPMN УФО-диаграммами. Выясним, во-первых, насколько УФО-подход способен устранить недостатки диаграмм BPMN. Во-вторых, изучим задачу описания УФО-диаграмм на языке XPD<sup>9</sup>.

**Результаты исследования.** Для реализации задач и цели работы смоделируем производственную ситуацию: покажем схему взаимодействия подразделений, связанных с выпуском комплектующих.

**Преобразование диаграммы УФО в BPMN.** Преобразование диаграмм в системно-структурных нотациях (в частности, в DFD и IDEF0) в УФО-диаграммы не требует разработки специальной процедуры. УФО-диаграмма, в которой УФО-элементы — это функциональные узлы (без определения объектов), эквивалентна DFD-диаграмме. УФО-диаграмма, в которой УФО-элементы определены до уровня объектов и отсутствует связь «механизм», эквивалентна IDEF0-диаграмме. Таким образом, для рассматриваемой ситуации вместо разработки рекомендаций по преобразованию различных нотаций в BPMN нужен способ преобразования УФО-диаграмм в BPMN. Данная трансформация обеспечивается выполнением шести операций, которые описаны ниже. Соответствие элементов BPMN и УФО приводится в разделе «Материалы и методы». Знак логической операции «→» (импликация) означает замену объекта, находящегося слева от знака, на объект, находящийся справа от него.

### **1. Контекстная УФО-диаграмма преобразуется в пул BPMN.**

1.1. Контекстный УФО-элемент как процесс или объект → открытый пул BPMN-диаграммы.

1.2. Внешние сущности контекстной УФО-диаграммы → закрытые пулы BPMN-диаграммы.

1.3. Функциональные (внешние) связи контекстного УФО-элемента как процесса или объекта, не связанные с внешними сущностями (или показывать эти сущности не целесообразно), → начальные или конечные события в открытом пуле BPMN.

### **2. Процессы на декомпозиции контекстного объекта УФО-диаграммы преобразуются в подпроцессы BPMN или в дорожки пула.**

2.1. Процессы на декомпозиции контекстного УФО-элемента как процесса или объекта → подпроцессы BPMN, если у открытого пула одна дорожка.

2.2. Процессы на декомпозиции контекстного УФО-элемента как процесса или объекта → дорожки открытого пула BPMN, если у открытого пула несколько дорожек.

<sup>9</sup> XPD Support and Resources. URL: <https://wfmc.org/xpd/> (дата обращения: 08.06.2025).

**3. Связи УФО-диаграммы преобразуются в связи на диаграмме BPMN.**

3.1. Информационные связи (потоки) по данным УФО-диаграммы → потоки сообщений или объекты данных BPMN.

3.2. Информационные связи (потоки) по управлению УФО-диаграммы → потоки операций BPMN.

3.3. Материальные связи (потоки) УФО-диаграммы → потоки операций BPMN с соответствующими наименованиями.

**4. Множественные входные и выходные связи УФО-элементов как процессов присоединяются к подпроцессам BPMN через шлюзы.**

4.1. Если у УФО-элемента несколько входных стрелок, то они подсоединяются через шлюз, логическая функция которого определяется значением входных связей.

4.2. Если у УФО-элемента несколько выходных стрелок, то они выходят через шлюз, логическая функция которого определяется значением выходных связей.

**5. Если УФО-элементы, соответствующие подпроцессам, декомпозированы, то процессы в этих декомпозициях → задачи BPMN.**

**6. На связях устанавливаются соответствующие наименования связей маркеры, если в этом есть смысл.**

На рис. 1–3 показан пример преобразования УФО-диаграммы в диаграмму BPMN с использованием представленной выше процедуры. УФО-диаграммы (рис. 1 и 2) выполнены с помощью CASE-инструмента UFO-toolkit, диаграмма BPMN (рис. 3) — с помощью программы Stormbpmn в соответствии с правилами BPMN.

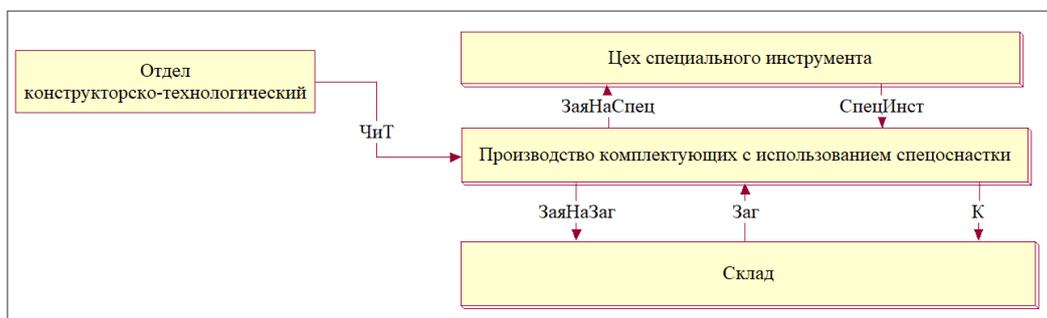


Рис. 1. Контекстная УФО-диаграмма

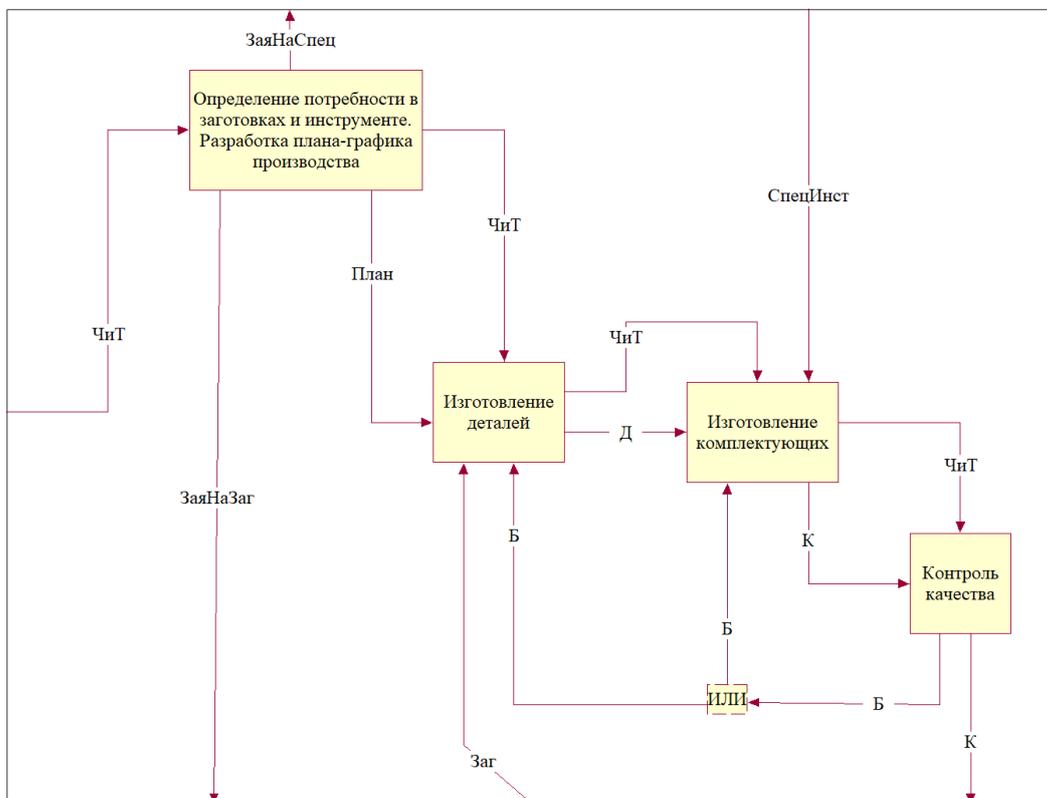


Рис. 2. Декомпозиция контекстной УФО-диаграммы



**3. Подпроцессы на дорожке BPMN преобразуются в диаграмму декомпозиции УФО-элемента, соответствующего дорожке BPMN.**

- 3.1. Подпроцессы на дорожке BPMN → элементы декомпозиции УФО-элемента, соответствующего дорожке BPMN.
- 3.2. Каждый подпроцесс BPMN → УФО-элемент, определенный до уровня функции.
- 3.3. Связи подпроцессов → связи из классификации связей УФО-подхода с учетом триггеров событий BPMN.
- 3.4. Шлюзы дорожки BPMN → УФО-элементы с определенными логическими функциями.
- 3.5. Связи шлюзов → связи из классификации связей УФО-подхода с учетом триггеров событий BPMN.

**4. Задачи подпроцесса BPMN преобразуются в диаграмму декомпозиции УФО-элемента, соответствующего подпроцессу BPMN.**

- 4.1. Задачи подпроцесса BPMN → элементы декомпозиции УФО-элемента, соответствующего подпроцессу BPMN.
- 4.2. Каждая задача BPMN → УФО-элемент, определенный до уровня функции.
- 4.3. Связи задач → связи из классификации связей УФО-подхода с учетом триггеров событий BPMN.
- 4.4. Шлюзы подпроцесса BPMN → УФО-элементы с определенными логическими функциями.

На рис. 4–9 — пример преобразования диаграммы BPMN в УФО с использованием представленной выше процедуры. Здесь диаграмма BPMN (рис. 4) тоже выполнена с помощью программы Stormbpmn в соответствии с правилами BPMN. Для построения УФО-диаграммы (рис. 5–9) использовали CASE-инструмент UFO-toolkit.

Показана схема производства пластмассовых комплектующих от требования на разработку технологического процесса до выдачи изделий. В данном случае учтены:

- разработка, анализ и доработка техпроцесса изготовления детали на термопластавтомате;
- параметры настройки термопластавтомата;
- получение пластмассы;
- загрузка автомата;
- нагрев пластмассы до заданной температуры;
- формирование и выдача изделий.

Создано в Stormbpmn **Термопласт автомат**

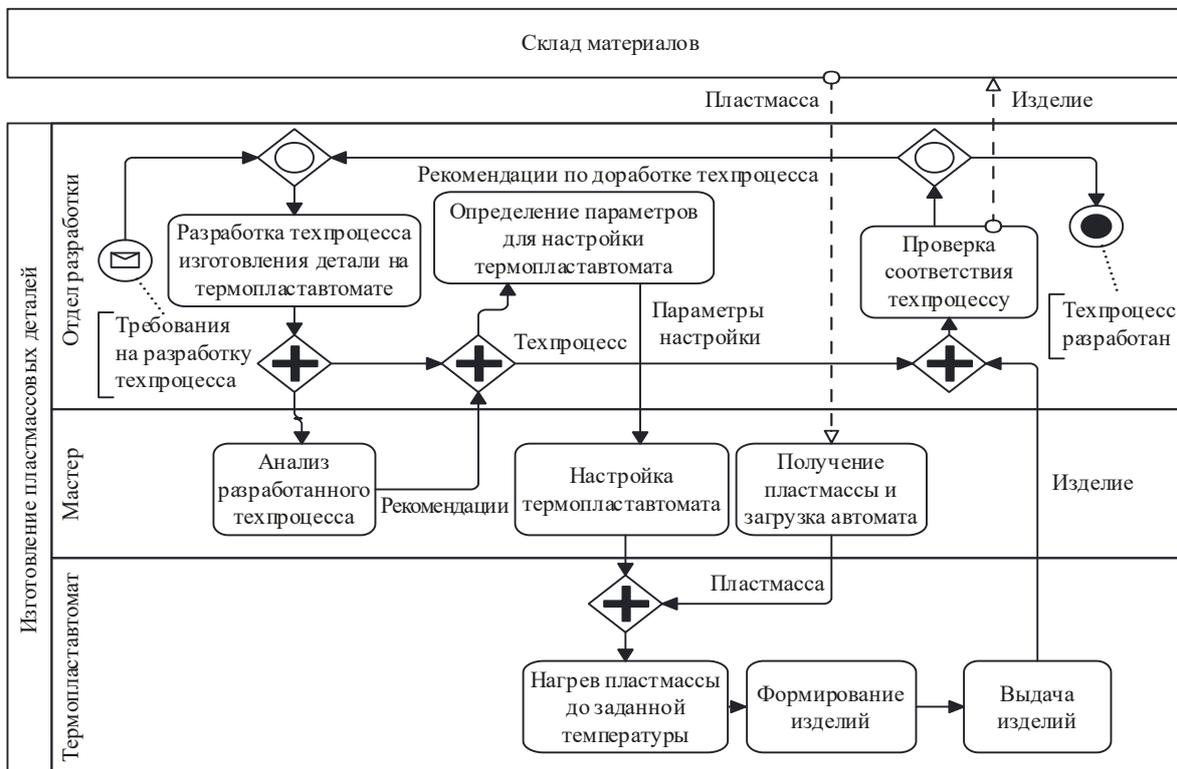


Рис. 4. Диаграмма BPMN

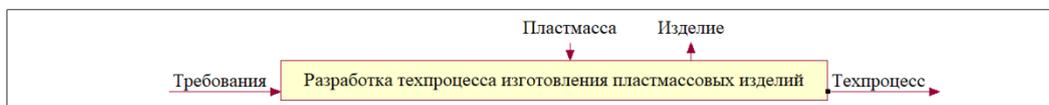


Рис. 5. Контекстная УФО-диаграмма с функциональными связями диаграммы BPMN

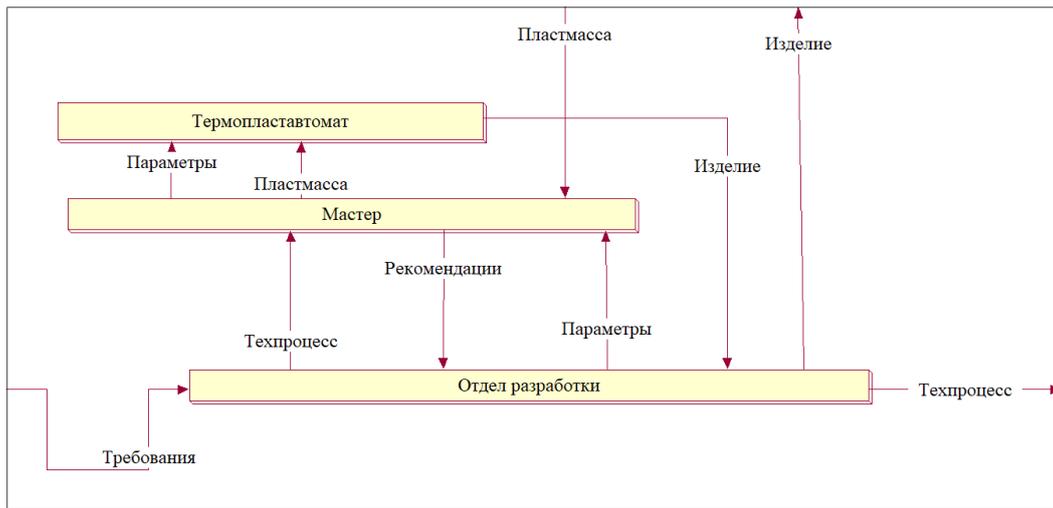


Рис. 6. Декомпозиция контекстной UFO-диаграммы, соответствующая дорожкам пула диаграммы BPMN



Рис. 7. Декомпозиция UFO-элемента «Термопластавтомат», соответствующая декомпозиции дорожки пула «Термопластавтомат» диаграммы BPMN

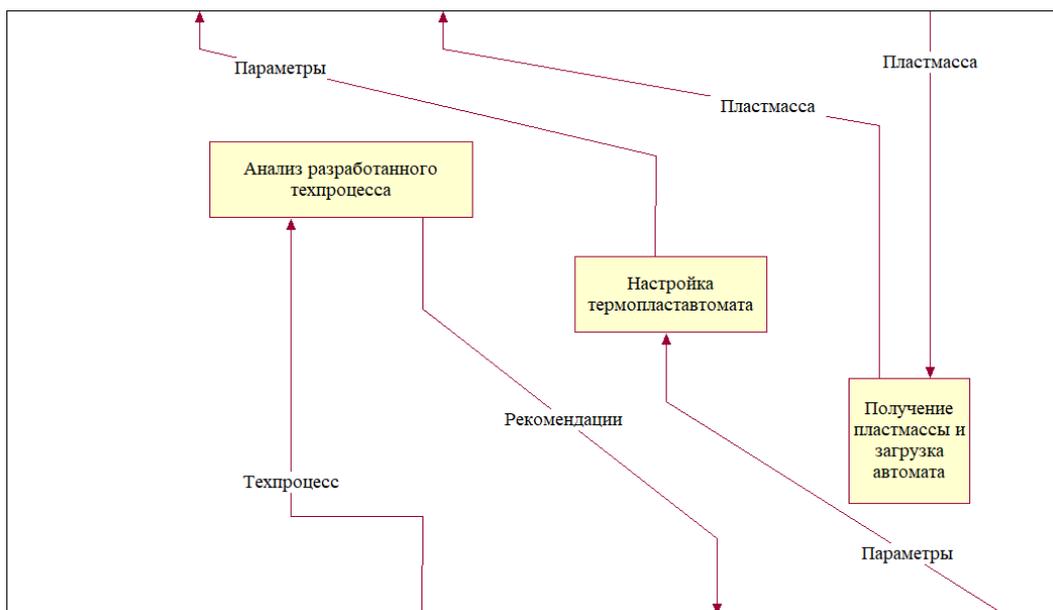


Рис. 8. Декомпозиция UFO-элемента «Мастер», соответствующая декомпозиции дорожки пула «Мастер» диаграммы BPMN

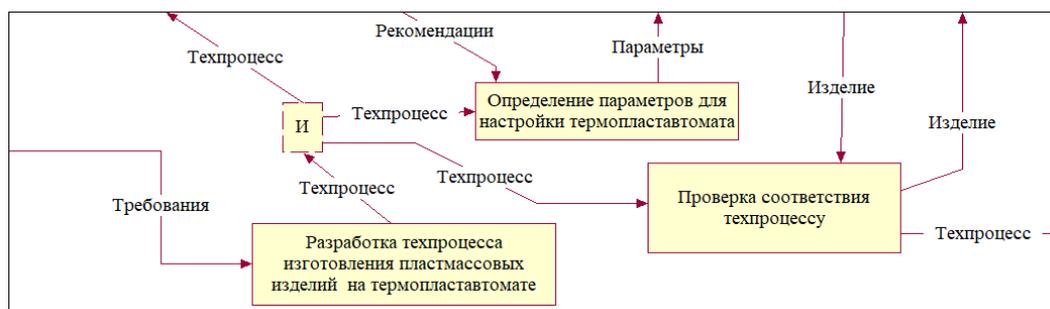


Рис. 9. Декомпозиция UFO-элемента «Отдел разработки», соответствующая декомпозиции дорожки пула «Отдел разработки» диаграммы BPMN

Анализ рис. 4–9 позволяет утверждать, что преобразование диаграммы BPMN в диаграммы в UFO-нотации делает описание процесса более понятным, так как позволяет увидеть его не только в целом (в контексте), но и с любой степенью подробности. В данном случае используется меньше значков, и это более удобный вариант, т.к. он не требует запоминания значения графических элементов и правил их размещения.

**Описание UFO-диаграмм на языке XPDЛ.** Во «Введении» отмечалось преимущество BPMN по сравнению с другими нотациями: средства перевода диаграмм BPMN на языки исполнения бизнес-процессов (например, XPDEL<sup>10</sup>) позволяют автоматизировать организационно-деловые и производственно-технологические процессы. Однако эта особенность легко переносится на UFO-нотацию. Основные элементы способа описания UFO-диаграмм на языке XPDЛ представлены в таблице 1 по аналогии с работой А.В. Клименко и соавторов [15].

Таблица 1

Описание UFO-диаграмм на языке XPDЛ

Элемент UFO-диаграммы	Конструкция XPDЛ
Процесс (контекстный)	<Activity id = «Имя»> <BlockActivity /> ... </Activity>
Процесс (на декомпозиции)	<Activity id = «Имя»> <Implementation> <SubFlow /> ... </Implementation> </Activity>
Соединитель «И»	<Activity> <Route/> <TransitionRestriction> <Join Type = «AND»/> </TransitionRestriction> </Activities>
Разветвитель «И»	<Activity> <Route/> <TransitionRestriction> <Split Type = «AND»/> </TransitionRestriction> </Activities>
Соединитель «ИЛИ»	<Activity> <Route/> <TransitionRestriction> <Join Type = «OR»/> </TransitionRestriction> </Activities>
Разветвитель «ИЛИ»	<Activity> <Route/> <TransitionRestriction>

<sup>10</sup> XPDL Support and Resources. URL: <https://wfmc.org/xpdl/> (дата обращения: 08.06.2025).

	<pre>&lt;Split Type = «AND»/&gt; &lt;/TransitionRestriction&gt; &lt;/Activities&gt;</pre>
Соединитель «Исключительное ИЛИ»	<pre>&lt;Activity&gt; &lt;Route/&gt; &lt;TransitionRestriction&gt; &lt;Join Type = «XOR»/&gt; &lt;/TransitionRestriction&gt; &lt;/Activities&gt;</pre>
Разветвитель «Исключительное ИЛИ»	<pre>&lt;Activity&gt; &lt;Route/&gt; &lt;TransitionRestriction&gt; &lt;Split Type = «XOR»/&gt; &lt;/TransitionRestriction&gt; &lt;/Activities&gt;</pre>
Функциональная связь без источника (входная) или без потребителя (выходная)	<pre>&lt;Transition/&gt; id = «Имя» /&gt;</pre>
Поддерживающая связь между подпроцессами	<pre>&lt;Transition id = «L» from = «Имя!» to = «Имя?» /&gt;</pre>
Внешняя сущность	<pre>&lt;Activity&gt; &lt;Route type = «in» /&gt; &lt;/Activity&gt; или &lt;Activity&gt; &lt;Route type = «out» /&gt; &lt;/Activity&gt;</pre>
Исполнитель процесса	<pre>&lt;Participant type = « ____ »/&gt; 1. Role 2. OrganisationUnit 3. Human 4. System 5. Resource 6. RecourceSet</pre>
Взаимодействие двух процессов с помощью двух связей	<pre>&lt;Activities&gt; &lt;Activity id = « Имя!»&gt; &lt;Implementation&gt; &lt;SubFlow /&gt; &lt;TransitionRamification&gt; &lt;Split Type = «AND» /&gt; &lt;Transition id = «M» from = «Имя!» to = «Имя?» /&gt; &lt;Transition id = «I» from = «Имя!» to = «Имя?» /&gt; &lt;/TransitionRamification&gt; &lt;/Implementation&gt; &lt;/Activity&gt; &lt;Activity id = « Имя?»&gt; &lt;Implementation&gt; &lt;SubFlow /&gt; &lt;TransitionMerger &gt; &lt; Join Type = «AND» /&gt; &lt;Transition id = «M» from = «Имя!» to = «Имя?» /&gt; &lt;Transition id = «I» from = «Имя!» to = «Имя?» /&gt; &lt;/TransitionMerger&gt; &lt;/Implementation&gt; &lt;/Activity&gt; &lt;/Activities&gt;</pre>

Таблица показывает, что при преобразовании диаграмм BPMN в УФО сохраняется возможность их трансляции на язык исполнения процессов.

**Обсуждение.** Итак, в BPM-системах для построения моделей процессов с целью их автоматизации может использоваться не только нотация BPMN, но и УФО-нотация, обеспечивающая более простую процедуру создания моделей и большую их наглядность.

Об адекватности и прикладной ценности такого подхода позволяют судить составленные авторами:

- диаграмма BPMN;
- контекстная УФО-диаграмма с функциональными связями диаграммы BPMN;
- декомпозиция контекстной УФО-диаграммы, соответствующая дорожкам пула диаграммы BPMN;
- декомпозиция УФО-элемента «Термопластавтомат», соответствующая декомпозиции дорожки пула «Термопластавтомат» диаграммы BPMN;
- декомпозиция УФО-элемента «Мастер», соответствующая декомпозиции дорожки.

Иллюстративный материал доказывает плюсы УФО-нотации. Преобразование из BPMN-диаграммы в УФО выявило два преимущества такого подхода. Первое: описание в УФО-нотации открывает возможность анализа процесса в целом (то есть в контексте) и с любой степенью детализации (декомпозиции). Второе: УФО-нотация задействует меньше специальных значков. Это более удобный вариант, т.к.:

- сокращается время, необходимое для запоминания значения графических элементов и правил их размещения;
- снижается риск неверного использования в схемах графических элементов.

Все это хорошо видно на рис. 4–9. К тому же, чтобы показать поступление и отправку материальных ресурсов во внешнюю сущность в рамках BPMN, приходится использовать пунктирную стрелку, предназначенную для обозначения потока сообщений, а не материального потока. Это создает проблемы как на этапе построения модели аналитиком, так и на этапе ее чтения проектировщиком или менеджером. У диаграмм в УФО-нотации нет этого недостатка.

Далее. По УФО-диаграмме лучше видно, из каких ресурсов получается требуемый результат. Это объясняется тем, что УФО-подход изначально ориентирован на учет как материальных, так и информационных потоков (связей). Отсюда еще одно преимущество. Можно проводить функционально-стоимостной анализ с помощью CASE-средства, обеспечивающего построение УФО-диаграмм. Для диаграмм в нотации BPMN это невозможно, потому что в данном стандарте в принципе отсутствует трактовка связи как потока элементов.

Обсуждая данные таблицы 1, целесообразно отметить перспективы русификации материала. Здесь конструкции языка XPD, естественно, представлены на английском языке. Однако планируется автоматизация исполнения моделей, созданных авторами статьи. И в новых решениях названия процессов будут на русском языке. Как видим, в данном случае кириллицей написан атрибут «Имя».

**Заключение.** Исследования нормативных систем нотации системно-объектного подхода «узел – функция – объект» (УФО) и BPMN показывают, что УФО-нотация является более универсальной и позволяет устранить ряд недостатков BPMN-диаграмм путем их воспроизведения с помощью УФО-нотации. Итоги представленной работы будут способствовать развитию теории и практики графоаналитического моделирования процессов.

В результате проведенного исследования созданы процедуры взаимного преобразования диаграмм BPMN и УФО. Кроме того, показано описание элементов нотации УФО-подхода на языке исполнения бизнес-процессов XPD, что уравнивает прикладные возможности УФО-нотации с BPMN. В перспективе конструкции XPD русифицируются. Предполагается, что модели, созданные авторами данной статьи, будут исполняться программными методами, и названия процессов будут на русском языке.

В целом, применение полученных результатов позволит упростить процедуру построения графических моделей процессов и их автоматизацию.

### Список литературы / References

1. Пантелеев А.С., Шматин А.К. Проблемы цифровизации и роботизации в современных российских реалиях. *Автоматизация производственных процессов в машиностроении*. 2022;(13):155–158. <https://doi.org/10.26160/2309-8864-2022-13-155-158>
2. Пантелеев А.С., Шматин А.К. Problems of Digitalization and Robotization in Modern Russian Realities. *Avtomatizirovannoe Proektirovanie v Mashinostroenii*. 2022;(13):155–158. (In Russ.) <https://doi.org/10.26160/2309-8864-2022-13-155-158>
3. Бочкарев П.Ю., Королев Р.Д., Бокова Л.Г. Комплексная оценка производственной технологичности изделий. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(2):155–168. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-2-155-168>
4. Бочкарьов Р.Ю., Королев Р.Д., Бокова Л.Г. 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. Короткий А.А., Масленников А.А., Яковлева Д.А., Головки И.В. Моделирование информационного обеспечения для оптимизации логистических задач в сфере транспорта с использованием программируемого имитатора контейнера-трансформера. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2020;20(3):311–316. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-311-316>

Korotkii AA, Yakovleva DA, Maslennikov AA, Golovko IV. Modeling of Information Support to Optimize Logistics Tasks in Transport Sector Using a Programmable Container Transformer Simulator. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2020;20(3):311–316. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-311-316>

4. Алеников А.С., Мамонова И.В., Колосеева К.И. Вариативные подходы к выбору нотации при моделировании бизнес-процессов на предприятии. *Вестник Академии знаний*. 2020;39(4):33–41.

Alenikov AS, Mamonova IV, Kololeeva KI. Variant Approaches to the Choice of Notation When Modeling Business Processes in the Enterprise. *Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2020;39(4):33–41.

5. Аксенова О.П., Аксенов К.А., Антонова А.С., Смолий Е.Ф. Анализ графических нотаций для имитационного моделирования бизнес-процессов предприятия. *Научное обозрение. Технические науки*. 2014;(1):45–54. URL: <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=17> (дата обращения: 17.06.2025).

Aksenova OP, Aksenov KA, Antonova AS, Smoliiy EF. The Analysis of Graphic Notations for Simulation Modeling of Enterprise Business Processes. *Scientific Review. Technical Science*. 2014;(1):45–54. URL: <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=17> (accessed: 17.06.2025).

6. Удальцова Н.Л. Современные методы анализа и моделирования бизнес-процессов. *Лидерство и менеджмент*. 2021;8(2):185–200. <https://doi.org/10.18334/lim.8.2.112126>

Udaltsova NL. Modern Methods of Business Process Analysis and Modeling. *Leadership and Management*. 2021;8(2):185–200. <https://doi.org/10.18334/lim.8.2.112126>

7. Вакорин М.П., Константинов Д.С., Мыльникова А.П. Оценка применимости нотации описания бизнес-процессов для моделирования процесса управления рисками информационной безопасности в организации. *Молодой ученый*. 2022;445(50):6–8. URL: <https://moluch.ru/archive/445/97853/> (дата обращения: 15.06.2025).

Vakorin MP, Konstantinov DS, Mylnikova AP. Assessment of the Applicability of Business Process Description Notation for Modeling the Information Security Risk Management Process in an Organization. *Young Scientist*. 2022;445(50):6–8. (In Russ.) URL: <https://moluch.ru/archive/445/97853/> (accessed: 15.06.2025).

8. Репин В. *Моделирование бизнес-процессов в нотации BPMN в Business Studio 5: Практическое руководство*. Москва: Издательские решения; 2020. 106 с.

Repin V. *Modeling Business Processes in BPMN Notation in Business Studio 5: Field Guide*. Moscow: Izdatel'skie resheniya; 2020. 106 p. (In Russ.)

9. Потрясаев С.А. Комплексное моделирование сложных процессов на основе нотации BPMN. *Известия Высших учебных заведений. Приборостроение*. 2016;59(11):913–920. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2016-59-11-913-920>

Potrysaev SA. Integrated Modeling of Complex Processes Based on BPMN Notation. *Journal of Instrument Engineering*. 2016;59(11):913–920. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2016-59-11-913-920>

10. Жихарев А.Г., Зимовец О.А., Тубольцев М.Ф., Кондратенко А.А. *Теория систем и системный анализ*. Маторин С.И. (ред.). Москва: Директмедиа Паблишинг; 2021. 456 с. URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=574641> (дата обращения: 05.06.2025).

Zhikharev AG, Zimovets OA, Tuboltsev MF, Kondratenko AA. *Systems Theory and Systems Analysis*. SI. Matorin (ed). Moscow: Direktmedia Publishing; 2021. 456 p. (In Russ). URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=574641> (accessed: 05.06.2025).

11. Белайчук А.А., Братченко С.А. Необходимые и избыточные развилки в нотации BPMN 2.0. *Стратегии бизнеса*. 2017;(4):3–7. <https://doi.org/10.17747/2311-7184-2017-4-03-07>

Belaychuk AA, Bratchenko SA. Essential and Redundant Gateways in BPMN 2.0. *Business Strategies*. 2017;(4):3–7. <https://doi.org/10.17747/2311-7184-2017-4-03-07>

12. Ivanov S, Kalenkova A. Comparing Process Models in the BPMN 2.0 XML Format. *Proceedings of ISP RAS*. 2015;27(3):255–266. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2015-27\(3\)-17](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2015-27(3)-17)

13. Матвеев А.С., Руденко А.Ю., Прочухан В.В. Разработка рекомендаций перехода от нотации моделирования бизнес-процессов IDEF0 к нотации BPMN. *Бизнес. Образование. Право. Вестник Волгоградского института бизнеса*. 2016;36(3):176–182. URL: <https://vestnik.volbi.ru/upload/numbers/336/article-336-1688.pdf> (дата обращения: 17.06.2025).

Matveev AS, Rudenko AYU, Prochukhan VV. Development of Recommendations for Transition from IDEF0 Notation of Business Processes Modeling to BPMN Notation. *Business. Education. Law. Bulletin of Volgograd Business Institute*. 2016;36(3):176–182. URL: <https://vestnik.volbi.ru/upload/numbers/336/article-336-1688.pdf> (accessed: 17.06.2025).

14. Зимовец О.А., Малкуш Е.В., Маторин С.И., Корсунов Н.И. Сравнение нотаций DFD, IDEF0, IDEF3, EPC и BPMN с нотацией УФО-анализа. *Экономика. Информатика*. 2024;51(4):936–945. <https://doi.org/10.52575/2687-0932-2024-51-4-936-945>

Zimovets OA, Malkush EV, Matorin SI, Korsunov NI. Comparison of DFD, IDEF0, IDEF3, EPC and BPMN Notations with UFO-analysis Notation. *Economics. Information Technologies*. 2024;51(4):936–945. <https://doi.org/10.52575/2687-0932-2024-51-4-936-945>

15. Клименко А.В., Жулин А.Б., Плаксин С.М., Головшинский К.И., Сивашева Н.М., Суворова И.К. и др. *Разработка методических рекомендаций по описанию и оптимизации процессов в органах исполнительной власти в рамках подготовки внедрения ЭАР*. Москва: Высшая школа экономики; 2004. 193 с. URL: <https://textarchive.ru/c-1946975.html> (дата обращения: 08.06.2025).

Klimentko AV, Zhulin AB, Plaksin SM, Golovshchinsky KI, Sivasheva NM, Suvorova IK, et al. *Development of Methodological Recommendations for the Description and Optimization of Processes in Executive Authorities in the Context of Preparation for the Implementation of the EAR: Research Report*. Moscow: Higher School of Economics; 2010. 193 p. (In Russ). URL: <https://textarchive.ru/c-1946975.html> (accessed: 08.06.2025).

**Об авторах:**

**Александр Геннадиевич Жихарев**, доктор технических наук, доцент, директор Института инженерных и цифровых технологий Белгородского государственного национального исследовательского университета (308015, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Победы, 85), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [zhikharev@bsuedu.ru](mailto:zhikharev@bsuedu.ru)

**Елена Викторовна Малкуш**, аспирант кафедры «Информационных и робототехнических систем» Белгородского государственного национального исследовательского университета (308015, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Победы, 85), [SPIN-код](#), [malkush@bsuedu.ru](mailto:malkush@bsuedu.ru)

**Сергей Игоревич Маторин**, доктор технических наук, профессор кафедры «Информационных и робототехнических систем» Белгородского государственного национального исследовательского университета (308015, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Победы, 85), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [matorin@bsuedu.ru](mailto:matorin@bsuedu.ru)

**Заявленный вклад авторов:**

**А.Г. Жихарев:** административное руководство исследовательским проектом, разработка концепции, проведение исследования, написание рукописи, внесение замечаний и исправлений.

**Е.В. Малкуш:** проведение исследования, визуализация, разработка методологии.

**С.И. Маторин:** разработка методологии, проведение исследования, написание черновика рукописи.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

**About the Authors:**

**Alexander G. Zhikharev**, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Director of the Institute of Engineering and Digital Technologies, Belgorod State National Research University (85, Pobedy Str., Belgorod, 308015, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [zhikharev@bsuedu.ru](mailto:zhikharev@bsuedu.ru)

**Elena V. Malkush**, Postgraduate student of the Department of Information and Robotic Systems, Belgorod State National Research University (85, Pobedy Str., Belgorod, 308015, Russian Federation), [SPIN-code](#), [malkush@bsuedu.ru](mailto:malkush@bsuedu.ru)

**Sergey I. Matorin**, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Information and Robotic Systems, Belgorod State National Research University (85, Pobedy St, Belgorod, 308015, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [matorin@bsuedu.ru](mailto:matorin@bsuedu.ru)

**Claimed Contributorship:**

**AG Zhikharev:** project administration, conceptualization, investigation, writing – review & editing.

**EV Malkush:** investigation, visualization, methodology.

**SI Matorin:** methodology, 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.**

**Поступила в редакцию / Received** 23.06.2025

**Поступила после рецензирования / Reviewed** 24.07.2025

**Принята к публикации / Accepted** 11.08.2025