

ТОМ 10, №3, 2026

eISSN 2541-9129

РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Безопасность техногенных и природных систем

Техносферная
безопасность /
Technosphere Safety

Машиностроение /
Machine Building

Химические технологии,
науки о материалах,
металлургия / Chemical
Technologies, Materials
Sciences, Metallurgy



www.bps-journal.ru
DOI 10.23947/2541-9129



Безопасность техногенных и природных систем

Safety of Technogenic and Natural Systems

Рецензируемый научно-практический журнал

eISSN 2541-9129

Издается с 2017 года

Периодичность – 4 выпуска в год

DOI: 10.23947/2541-9129

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

Создан в целях освещения результатов исследований и реальных достижений по актуальным вопросам машиностроения, техносферной безопасности, современной металлургии и материаловедения. В журнале освещаются проблемы развития фундаментальных исследований и инженерных разработок в ряде важнейших областей технических наук. Одним из главных направлений деятельности журнала является интеграция в международное информационное пространство.

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, 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:

- 2.1.16 – Охрана труда в строительстве (технические науки)
- 2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки)
- 2.5.21 – Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки)
- 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)
- 2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы (технические науки)
- 2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
- 2.10.1 – Пожарная безопасность (технические науки)
- 2.10.2 – Экологическая безопасность (технические науки)
- 2.10.3 – Безопасность труда (технические науки)

Регистрация:

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 66531 от 21 июля 2016 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

*Индексация
и архивация:*

РИНЦ, CyberLeninka, CrossRef, DOAJ, Index Copernicus, Internet Archive

Сайт:

<https://bps-journal.ru>

Адрес редакции:

344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

E-mail:

vestnik@donstu.ru

Телефон:

+7 (863) 2–738–372

Дата выхода

№3, 2026 в свет:

30.08.2026





Safety of Technogenic and Natural Systems Bezopasnost' Tekhnogennykh i Prirodnykh Sistem

Peer-Reviewed Scientific and Practical Journal

eISSN 2541-9129

Published Since 2017

Periodicity – 4 issues per year

DOI: 10.23947/2541-9129

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

The journal is created in order to highlight the results of research and real achievements on topical issues of Mechanical Engineering, Technosphere Safety, Modern Metallurgy and Materials Science. The journal highlights the problems of the development of fundamental research and engineering developments in a number of important areas of technical sciences. One of the main activities of the journal is integration into the international 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:

- Labor protection in construction (Engineering Sciences)
- Ground Transport and Technological Means and Complexes (Engineering Sciences)
- Machines, Aggregates and Technological Processes (Engineering Sciences)
- Metallurgical Science and Heat Treatment of Metals and Alloys (Engineering Sciences)
- Powder Metallurgy and Composite Materials (Engineering Sciences)
- Materials Science (Engineering Sciences)
- Fire Safety (Engineering Sciences)
- Environmental Safety (Engineering Sciences)
- Occupational Safety (Engineering Sciences)

Registration: Mass Media Registration Certificate ЭЛ № ФС 77 – 66531 Dated July, 21, 2016, Issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media

Indexing and Archiving: RISC, CyberLeninka, CrossRef, DOAJ, Index Copernicus, Internet Archive

Website: <https://bps-journal.ru>

Address of the Editorial Office: 1, Gagarin Sq. Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation

E-mail: vestnik@donstu.ru

Telephone: +7 (863) 2–738–372

Date of Publication No.3,2026: 30.08.2026



Редакционная коллегия

Главный редактор

Месхи Бесарион Чохоевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Заместители главного редактора

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

Азаров Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет (Волгоград, Российская Федерация)

Выпускающий редактор

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

Ответственные секретари

Хазанович Григорий Шнеерович, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

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

Абдрахманов Наиль Хадитович, доктор технических наук, профессор, Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа, Российская Федерация)

Агеева Екатерина Владимировна, доктор технических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (Курск, Российская Федерация)

Агеев Евгений Викторович, доктор технических наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (Курск, Российская Федерация)

Амосов Александр Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, Самарский государственный технический университет (Самара, Российская Федерация)

Баурова Наталья Ивановна, доктор технических наук, профессор, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (Москва, Российская Федерация)

Беспалов Вадим Игоревич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

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

Воронова Элеонора Юрьевна, доктор технических наук, доцент, Шахтинский автодорожный институт (филиал) ЮРГПУ (НПИ) (Шахты, Российская Федерация)

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

Гурова Оксана Сергеевна, доктор технических наук, доцент, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Гутаревич Виктор Олегович, доктор технических наук, доцент, Донецкий национальный технический университет (Донецк, Донецкая Народная Республика)

Деев Владислав Борисович, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Москва, Российская Федерация)

Дорофеев Владимир Юрьевич, доктор технических наук, профессор, Южно-Российский государственный технический университет (НПИ) имени М. И. Платова (Новочеркасск, Российская Федерация)

Егоров Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор, Южно-Российский государственный технический университет (НПИ) имени М. И. Платова (Новочеркасск, Российская Федерация)

Еремеева Жанна Владимировна, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Москва, Российская Федерация)

Копчиков Вячеслав Григорьевич, доктор технических наук, профессор, Северо-Кавказский федеральный университет (Ставрополь, Российская Федерация)

Лагерева Александр Валерьевич, доктор технических наук, профессор, Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Российская Федерация)

Лагерева Игорь Александрович, доктор технических наук, доцент, Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Российская Федерация)

Манжула Константин Павлович, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербургский, Российская Федерация)

Мензелинцева Надежда Васильевна, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет (Волгоград, Российская Федерация)

Минко Всеволод Афанасьевич, доктор технических наук, профессор, Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова (Белгород, Российская Федерация)

Москвичев Владимир Викторович, доктор технических наук, профессор, Красноярский филиал Федерального исследовательского центра «Информационных и вычислительных технологий» (Красноярск, Российская Федерация)

Носенко Алексей Станиславович, доктор технических наук, профессор, Шахтинский автодорожный институт (филиал) ЮРГПУ (НПИ) (Шахты, Российская Федерация)

Плешко Михаил Степанович, доктор технических наук, доцент, Национальный исследовательский технологический университет МИСиС (Москва, Российская Федерация)

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

Пушенко Сергей Леонардович, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Порошин Александр Алексеевич, доктор технических наук, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России (Балашиха, Российская Федерация)

Севастьянов Борис Владимирович, доктор технических наук, кандидат педагогических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова (Ижевск, Российская Федерация)

Тюрин Александр Павлович, доктор технических наук, доцент, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова (Ижевск, Российская Федерация)

Федок Роман Сергеевич, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация)

Хазанович Григорий Шнеерович, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Хафизов Ильдар Фанисевич, доктор технических наук, доцент, Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа, Российская Федерация)

Хафизов Фаниль Шамильевич, доктор технических наук, профессор, Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа, Российская Федерация)

Чукарин Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, Ростовский государственный университет путей сообщения (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Editorial Board

Editor-in-Chief

Besarion Ch. Meskhi, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Deputy Chief Editors

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

Valery N. Azarov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russian Federation)

Executive Editor

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

Executive Secretaries

Grigoriy Sh. Khazanovich, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

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

Aleksandr A. Poroshin, Dr.Sci. (Eng.), All-Russian Research Institute for Fire Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (Balashikha, Russian Federation)

Aleksandr N. Chukarin, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Rostov State Transport University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Aleksandr P. Amosov, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Samara State Technical University (Samara, Russian Federation)

Aleksandr P. Tyurin, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russian Federation)

Aleksandr V. Lagerev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Ivan Petrovsky Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

Aleksey S. Nosenko, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Shakhty Road Institute (branch) SRSPU (NPI) named after. M.I. Platova (Shakhty, Russian Federation)

Boris V. Sevastyanov, Dr.Sci. (Eng.), Cand. Sci. (Pedagog.), Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russian Federation)

Ekaterina V. Ageeva, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russian Federation)

Eleonora Yu. Voronova, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Shakhty Road Institute (branch) SRSPU (NPI) named after. M.I. Platov (Shakhty, Russian Federation)

Evgeniy V. Ageev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Southwest State University (Kursk, Russian Federation)

Fanil Sh. Hafizov, Dr.Sci. (Eng.) Professor, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russian Federation)

Grigoriy Sh. Khazanovich, Dr.Sci. (Eng.), professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Igor A. Lagerev, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Ivan Petrovsky Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

Ildar F. Hafizov, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russian Federation)

Konstantin P. Manzhula, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, Russian Federation)

Mikhail S. Pleshko, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, National University of Science and Technology (MISiS) (Moscow, Russian Federation)

Nadezhda V. Menzelintseva, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russian Federation)

Nail Kh. Abdrakhmanov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russian Federation)

Natalya I. Baurova, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (Moscow, Russian Federation)

Oksana S. Gurova, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Roman S. Fediuk, Dr.Sci. (Eng.), professor, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation)

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

Sergey N. Egorov, Dr.Sci. (Eng.), South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after MI Platov (Novocherkassk, Russian Federation)

Vadim I. Bepalov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

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

Viktor O. Gutarevich, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Donetsk National Technical University (Donetsk, Donetsk People's Republic)

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

Vladimir V. Moskvichev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Krasnoyarsk Branch of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies (Krasnoyarsk, Russian Federation)

Vladimir Yu. Dorofeev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after MI Platov (Novocherkassk, Russian Federation)

Vladislav B. Deev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, National University of Science and Technology (MISiS) (Moscow, Russian Federation)

Vsevolod A. Minko, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Belgorod, Russian Federation)

Vyacheslav G. Kopchenkov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, North-Caucasus Federal University (Stavropol, Russian Federation)

Yuriy I. Bulygin, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Zhanna V. Ereemeva, Dr.Sci. (Eng.), Professor, National University of Science and Technology (MISiS) (Moscow, Russian Federation)

Содержание

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

- Влияние оценки коэффициентов потерь колебательной энергии многоцелевых станков на безопасность труда** 193
М.В. Гричишин, Б.Ч. Месхи
- Формирование кластерных групп ключевых стран-эмитентов парниковых газов в разрезе экономико-демографических и энергетических показателей** 206
О.А. Локтионов, Д.О. Максимов, М.А. Забелин, И.А. Белошицкая
- Система идентификации состояния рельсовых путей грузоподъемных кранов** 219
В.В. Егельский, Н.Н. Николаев, Е.В. Егельская, А.А. Короткий, Л.А. Терновской
- Применение малой архитектурной формы типа «Беседка» в качестве шумозащитной конструкции для площадок благоустройства жилых зон** 232
А.В. Артёмов, Е.С. Куркин, П.С. Захаров, Т.В. Штеба
- Интеграция методов компьютерного зрения и гидродинамического моделирования для повышения экологической безопасности за счет идентификации источников негативного воздействия на водные объекты** 247
А.В. Гусев
- Оценка интенсивности электромагнитных излучений от смартфонов в режиме видеосвязи** 256
Т.А. Будыкина, А.А. Блохин
- Мобильный технический модуль для производства композитного сорбента нефтепродуктов** 266
В.В. Гаевский, И.В. Одинокова, И.Ю. Исаева, Г.Ю. Остаева

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

- Геометрические параметры структуры стали 14Г2 как материала с высокой баллистической стойкостью** 277
В.Н. Пустовойт, Ю.В. Долгачев, И.В. Иванков

Contents

TECHNOSPHERE SAFETY

The Impact of Assessing the Vibrational Energy Loss Coefficients of Multi-Purpose Machines on Occupational Safety	193
<i>Maksim V. Grichishin, Besarion Ch. Meskhi</i>	
Clustering of Groups of Key Greenhouse Gas-Emitting Countries Based on Economic, Demographic, and Energy Indicators.....	206
<i>Oleg A. Loktionov, Daniil O. Maksimov, Mikhail A. Zabelin, Irina A. Beloshitskaya</i>	
System for Identifying the Condition of Hoisting Crane Runways	219
<i>Vladislav V. Egelsky, Nikolai N. Nikolaev, Elena V. Egelskaya, Anatoly A. Korotkiy, Leonid A. Ternovskoi</i>	
Gazebo-Type Small Architectural Form as a Noise Protection Structure for Residential Area Improvement Sites	232
<i>Artyem V. Artyemov, Evgenii S. Kurkin, Pavel S. Zakharov, Tat'yana V. Shteba</i>	
Integration of Computer Vision and Hydrodynamic Modeling Methods to Improve Environmental Safety by Identifying Sources of Negative Impact on Water Bodies.....	247
<i>Andrey V. Gusev</i>	
Assessment of Electromagnetic Radiation Intensity from Smartphones in Video Communication Mode	256
<i>Tatyana A. Budykina, Andrey A. Blokhin</i>	
A Mobile Technical Module for the Production of Composite Sorbents for Petroleum Products	266
<i>Vitaly V. Gaevskiy, Irina V. Irina V. Odinokova, Irina Yu. Isaeva, Galina Yu. Ostaeva</i>	

CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY

Geometrical Parameters of 14G2 Steel Structure as a Material with High Ballistic Resistance	277
<i>Viktor N. Pustovoi, Yuri V. Dolgachev, Ivan V. Ivankov</i>	

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 658.345 + 06

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-3-193-205>

Влияние оценки коэффициентов потерь колебательной энергии многоцелевых станков на безопасность труда

М.В. Гричишин¹✉, Б.Ч. Месхи² ¹ Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация² Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация✉ grichishinmv@rostcsm.ru

EDN: TEIWAE

Аннотация

Введение. Вибрация сверлильно-фрезерно-расточных станков снижает надёжность оборудования, повышает уровень производственного шума и влияет на безопасность операторов. В литературе широко представлены источники колебаний, механизмы демпфирования и методы измерения вибрационных характеристик, а нормативными документами установлены допустимые уровни виброускорения и виброскорости. Вместе с тем недостаточно изучены частотные зависимости коэффициентов потерь колебательной энергии отдельных узлов станка, необходимые для инженерного прогнозирования вибрации. Цель настоящей работы — оценка коэффициентов потерь колебательной энергии в элементах многоцелевых сверлильно-фрезерно-расточных станков и анализ их влияния на уровень вибрации, воздействующей на оператора, для обоснования мероприятий по повышению безопасности труда. Для достижения этой цели были проведены измерения в октавных полосах, применен регрессионный анализ данных и выбраны зависимости с наименьшим среднеквадратическим отклонением.

Материалы и методы. В ходе работы был применен комплексный подход, сочетающий экспериментальные измерения и методы математической обработки данных. Эксперименты проводились на специальном стенде и непосредственно на станке с использованием динамометрического молоточка для возбуждения колебаний. Регистрация виброускорения осуществлялась в октавных полосах частот современной измерительной аппаратурой. Коэффициенты потерь колебательной энергии (η) рассчитывались по модифицированной формуле, учитывающей уровни виброускорения. Для обобщения экспериментальных данных и построения прогнозных моделей использовался регрессионный анализ на основе аппроксимации нелинейными функциями и полиномами разных степеней. Качество аппроксимации оценивалось по критерию минимального среднеквадратического отклонения.

Результаты исследования. Экспериментально установлено, что коэффициенты потерь для корпусных деталей из чугуна в диапазоне частот от 125 до 8000 Гц варьируются в пределах $(7,8-8,8) \cdot 10^{-3}$, демонстрируя слабую частотную зависимость. Для инженерных расчетов может быть принято постоянное значение $\eta \approx 8 \cdot 10^{-3}$. Регрессионный анализ показал, что наилучшей аппроксимирующей зависимостью для корпуса редуктора является полином шестого порядка. Для узлов резания получены частные зависимости: при растачивании и сверлении наилучшее соответствие обеспечивает полином седьмого порядка, а для узла фрезерования — полином пятого порядка. Разработанные математические модели с высокой точностью описывают поведение коэффициентов потерь в исследуемом частотном диапазоне.

Обсуждение. Анализ результатов подтверждает, что диссипативные свойства конструктивных элементов станка не являются постоянными и существенно зависят от типа технологической операции и частотного диапазона. Выявленные аналитические зависимости позволяют перейти от точечных оценок на фиксированных частотах к непрерывному прогнозированию потерь энергии, что критически важно для анализа динамического поведения станка на собственных частотах колебаний. Это открывает возможности для целенаправленного проектирования: зная частотный спектр наиболее опасных с точки зрения вибрации режимов, можно оптимизировать демпфирование именно в этих областях, например, за счет выбора материалов с повышенным внутренним трением или за счет применения композитных вибропоглощающих покрытий в определенных зонах конструкции.

Заключение. Проведенное исследование позволило получить инструментарий для количественной оценки коэффициентов потерь колебательной энергии основных источников вибрации многоцелевых станков. Практическая значимость работы заключается в возможности использования выведенных регрессионных зависимостей при разработке алгоритмов активного и пассивного контроля вибрации, проектировании демпфирующих систем и выборе материалов. Внедрение в практику данных наработок позволит снизить уровни шума и вибрации в рабочих зонах, минимизировать риск профессиональных заболеваний операторов и повысить общую безопасность труда, одновременно способствуя увеличению ресурса оборудования за счет снижения вибрационных нагрузок на его элементы. Результаты могут быть полезны при создании алгоритмов контроля вибрации, что позволит значительно снизить уровень шума и вибрации на рабочих местах.

Ключевые слова: безопасность труда, коэффициент потерь колебательной энергии, узлы резания при растачивании, сверлении и фрезеровании, диссипативные свойства распределенных конструкций

Для цитирования. Гричишин М.В., Месхи Б.Ч. Влияние оценки коэффициентов потерь колебательной энергии многоцелевых станков на безопасность труда. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2026;10(3):193–205. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-3-193-205>

Original Empirical Research

The Impact of Assessing the Vibrational Energy Loss Coefficients of Multi-Purpose Machines on Occupational Safety

Maksim V. Grichishin¹✉, Besarion Ch. Meskhi² 

¹ Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

² Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ grichishinmv@rostcsu.ru

Abstract

Introduction. Vibration in multi-purpose drilling-milling-boring machines affects equipment reliability, production noise levels, and operator safety. Literature discusses sources of vibration, damping mechanisms, and methods for measuring vibration characteristics, while regulatory documents establish permissible levels of vibration acceleration and vibration velocity. However, the frequency dependencies of vibration energy loss factors for individual machine components, which are necessary for engineering vibration forecasting, remain insufficiently studied. The aim of this research is to evaluate vibration energy loss factors in the components of multi-purpose drilling-milling-boring machines and analyze their effect on the level of vibration affecting the operator, thereby substantiating measures to improve occupational safety. The objectives included conducting octave-band measurements, performing regression analysis of the data, and selecting relationships with the lowest standard deviation.

Materials and Methods. This study utilized an integrated approach combining experimental measurements and mathematical data processing methods. Experiments were conducted on a dedicated test bench and directly on the machine using a torque hammer to excite vibrations. Vibration acceleration was recorded in octave frequency bands using modern measuring equipment. Vibrational energy loss coefficients (η) were calculated using a modified formula that took into account vibration acceleration levels. To summarize the experimental data and construct predictive models, regression analysis was used, including approximation by nonlinear functions and polynomials of varying degrees. The quality of the approximation was assessed using the minimum standard deviation criterion.

Results. It was experimentally established that the loss coefficients for cast iron housing parts in the frequency range from 125 to 8000 Hz varied within the range of $(7.8\text{--}8.8) \cdot 10^{-3}$, demonstrating a weak frequency dependence. For engineering calculations, constant value of $\eta \approx 8 \cdot 10^{-3}$ could be adopted. Regression analysis revealed that the best approximating relationship for the gearbox housing was a sixth-order polynomial. Specific relationships were obtained for the cutting units: for boring and drilling, the best fit was provided by a seventh-order polynomial, and for the milling unit, by a fifth-order polynomial. The resulting mathematical models accurately described the behavior of loss coefficients within the studied frequency range.

Discussion. The analysis of the results confirmed that the dissipative properties of machine structural elements were not constant and depended significantly on the type of technological operation and frequency range. The identified analytical relationships allowed us to move from point estimates at fixed frequencies to continuous energy loss prediction, which was critical for analyzing the dynamic behavior of the machine at its natural frequencies. This opens up opportunities for targeted design. Knowing the frequency spectrum of the most hazardous vibration modes, we can optimize damping specifically in these areas. For example, we can select materials with increased internal friction, or use composite vibration-absorbing coatings in specific structural areas.

Conclusion. This study provides tools for quantitative assessment of vibrational energy loss coefficients for the main vibration sources in multi-purpose machine tools. The potential practical significance of this work lies in the possibility of using the derived regression relationships to develop active and passive vibration control algorithms, design damping systems, and select materials. Implementation of these findings will reduce noise and vibration levels in work areas, minimize the risk of occupational illnesses for operators, and improve overall occupational safety. Additionally, it will extend equipment life by reducing the vibration loads on components. The practical significance of this work lies in its potential for use in developing vibration control algorithms, which will significantly reduce noise levels in work areas.

Keywords: occupational safety, vibrational energy loss coefficient, cutting units during boring, drilling and milling, dissipative properties of distributed structures

For Citation. Grichishin MV, Meskhi BCh. The Impact of Assessing the Vibrational Energy Loss Coefficients of Multi-Purpose Machines on Occupational Safety. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(3):193–205. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-3-193-205>

Введение. Вибрация сверлильно-фрезерно-расточных станков комплексно влияет на надёжность оборудования, точность обработки, уровень шума и безопасность условий труда операторов [1]. Анализ отказов металлорежущего оборудования с ЧПУ показал, что до 30–40 % его внеплановых остановок связано с деградацией шпиндельных узлов и подшипниковых опор, развивающейся при повышенных вибрационных нагрузках, а расходы на ремонт шпиндельного узла составляют значительную долю стоимости оборудования [2]. Рост амплитуды колебаний в зоне резания на десятки процентов приводит к ухудшению шероховатости обработанной поверхности на один-два класса и к сокращению стойкости инструмента в 1,5–2 раза, что напрямую отражается на себестоимости продукции. В структуре профессиональной патологии в машиностроении вибрационная болезнь стабильно занимает одно из ведущих мест, её доля в структуре впервые выявленных профессиональных заболеваний в отрасли составляет, по разным оценкам, от 15 до 25 %.

Особенностью многоцелевых станков является широкий диапазон рабочих частот вращения, режимов резания и типов операций, что обуславливает сложный, изменяющийся по спектру характер формирования и распространения колебательной энергии в конструкции и затрудняет применение универсальных систем виброзащиты.

Интенсивность вибрации определяется процессами передачи, преобразования и рассеивания энергии в системе «станок — приспособление — инструмент — заготовка». Часть энергии, вводимой в технологическую систему, расходуется на полезную работу резания, тогда как её избыток переходит в колебательные процессы и рассеивается из-за внутреннего трения в материалах, в направляющих и подшипниках, демпфирования в стыках и болтовых соединениях, а также из-за взаимодействия элементов конструкции между собой. Основными источниками возбуждения являются динамические силы и ударные нагрузки при резании, дисбаланс вращающихся деталей, работа гидро- и пневмосистем, а также аэродинамические процессы в контурах охлаждения и удаления стружки. Указанные факторы вызывают колебания шпиндельного узла, стола, станины и корпусных деталей, причём распределение колебательной энергии между ними зависит не только от их массы и жёсткости, но и от диссипативных свойств, динамически меняющихся при изменении частоты возбуждения и режимов обработки.

Количественной характеристикой диссипативных свойств служит коэффициент потерь колебательной энергии η , связанный с относительным демпфированием соотношением $\eta=2\xi$ и с добротностью резонанса $Q=1/\eta$. Он позволяет определять способность различных узлов рассеивать колебательную энергию и выявлять слабые звенья конструкции, наиболее подверженные повышенной вибрации и риску разрушения [3].

Исследования вибрации металлорежущих станков развиваются в нескольких самостоятельных направлениях. Первое связано с динамической устойчивостью процесса резания: на основе теории регенеративных автоколебаний построены диаграммы устойчивости («лепестковые» диаграммы), позволяющие подбирать частоту вращения и глубину резания, при которых автоколебания не развиваются. Эти модели описывают условия возникновения колебаний, однако уровень демпфирования входит в них как интегральный параметр, отнесённый к системе в целом, без разделения вклада отдельных узлов. Второе направление представляют работы по экспериментальной модальной идентификации станочных систем, в которых определяются собственные частоты, формы колебаний и коэффициенты демпфирования по методу половинной мощности, логарифмического декремента затухания или по скорости спада уровня колебаний. Показано, что до 80–90 % рассеивания энергии в станинах и корпусных деталях приходится на стыки и подвижные сопряжения, а не на внутреннее трение в материале. В третье направление входят исследования по вибродиагностике и нормированию технического состояния оборудования, ориентированные на измерение виброскорости и виброускорения в контрольных точках и сопоставление их с допустимыми уровнями [4].

Общим ограничением в перечисленных направлениях исследований является то, что результатом оценки в них выступают преимущественно результирующие вибрационные параметры (амплитуда, виброскорость, виброускорение, спектр и собственные частоты), тогда как коэффициент потерь η остаётся либо усреднённой по системе величиной, либо определяется в узких частотных интервалах вблизи отдельных резонансов. Это обусловлено методическими причинами: измерение η в широком диапазоне частот требует отдельного возбуждения и регистрации колебаний конкретных узлов в условиях, приближенных к рабочим, а на работающем станке спектр возбуждения нестационарен и включает в себя наложение нескольких источников. Как следствие, в литературе практически отсутствуют систематизированные данные о частотных зависимостях η для корпусных деталей и узлов резания многоцелевых станков применительно к различным видам обработки — растачиванию, сверлению и фрезерованию. Это, в свою очередь, не позволяет строить инженерные модели, прогнозирующие уровень вибрации в рабочей зоне оператора с учётом диссипативных свойств отдельных элементов конструкции. Указанное обстоятельство и составляет пробел в научном знании, который приобретает практическое значение при обращении к нормативной базе. Действующие требования и правила регламентируют не диссипативные характеристики конструкции, а конечное следствие их действия — уровни вибрации, передаваемой на оператора: предельно допустимые значения виброскорости и виброускорения установлены СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»¹ и соответствующими стандартами. Нормативы таким образом косвенно предъявляют требования к минимально необходимому демпфированию именно в тех частотных диапазонах, которые наиболее опасны для работника. Однако перейти от нормируемых уровней вибрации к обоснованным требованиям демпфирования узлов невозможно без знания частотных зависимостей η — то есть без восполнения выявленного пробела знаний. Именно эта логическая связка «диссипативные свойства узла — уровень вибрации на рабочем месте — требования охраны труда» определяет постановку цели и задач данной работы. Таким образом, целью представленного исследования является оценка коэффициентов потерь колебательной энергии в элементах сверлильно-фрезерно-расточных станков и анализ их влияния на уровни вибрации, действующей на оператора, для обоснования мероприятий по снижению профессионального риска и повышению безопасности труда.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать основные источники возбуждения колебаний и механизмы рассеивания колебательной энергии в многоцелевых сверлильно-фрезерно-расточных станках, а также действующие требования к ограничению вибрационного воздействия на оператора. Установить, в каких частотных диапазонах нормативные ограничения являются наиболее жёсткими.
2. Выполнить экспериментальную оценку коэффициентов потерь колебательной энергии η для основных элементов станков — корпусных деталей и узлов резания — при растачивании, сверлении и фрезеровании в диапазоне частот, охватывающем нормируемые октавные полосы.
3. Провести регрессионный анализ полученных данных с применением набора аппроксимирующих функций (линейных, степенных, логарифмических, экспоненциальных и дробно-рациональных) и выбрать по статистическим критериям адекватности аналитические зависимости $\eta(f)$, пригодные для инженерных расчётов.
4. На основе полученных зависимостей оценить вклад диссипативных свойств отдельных узлов в формирование уровней вибрации в рабочей зоне оператора, выявить частотные диапазоны и узлы, критичные с точки зрения превышения допустимых уровней, и определить меры по снижению вибрационного воздействия и профессионального риска, повышению демпфирования стыков, корректировке режимов обработки и организационным мерам.

Практическая значимость работы состоит в том, что установленные частотные зависимости η позволят переходить от диагностической констатации уровней вибрации к прогнозированию вибрационной обстановки на рабочем месте и к адресному выбору виброзащитных решений, снижающих риск развития вибрационной патологии у операторов и одновременно повышающих ресурс оборудования.

Материалы и методы. При инженерных расчётах учитывались коэффициенты потерь колебательной энергии по результатам тематической обработки экспериментальных данных на специальном стенде, подробно описанном в работе [5]. Возбуждение вибраций создавалось специальным динамометрическим молоточком [6]. При измерениях фиксировались уровни виброускорения в третьей-девятой октавах в момент ударного воздействия и по истечении трех секунд [7].

¹ СанПиН 1.2.3685-21. «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_375839/e66874e0ad1f04c3a48e95cd16355056937feded/ (дата обращения 10.08.2026).

При расчётах для корпусных деталей из чугуна экспериментальные исследования проводились для пластин толщиной 10–25 мм, которые показали, что разница в численных значениях не превышает 10–12 %, что при пересчёте в уровни вибраций составляет $10\lg 1,2 = 0,8$ дБ. Расчёт коэффициента потерь колебательной энергии выполнялся по формуле [8]:

$$\eta = \frac{\ln \frac{A_k}{A_i}}{f_i \pi t}. \quad (1)$$

Поскольку время (t) составило две секунды, то зависимость (1) приняла вид:

$$\eta = 0,16 \frac{\ln \frac{L_{ak}}{L_{ai}}}{f_i}, \quad (2)$$

где A_k и A_i — амплитуды колебаний в начале и конце измерений; f_i — частоты колебаний, Гц; t — время от включения до отключения электромагнита, с; L_{ak} и L_{ai} — уровни виброускорения (дБ) в конце и начале цикла измерений [9].

На практике измеряются не амплитуды колебаний, а уровни виброускорения. Учитывая характеристики современной измерительной аппаратуры («Экофизика», «Ассистент» и «Октава»), целесообразно измерять октавные уровни виброускорения [10]. Регистрация виброускорения осуществлялась в октавных полосах частот современной измерительной аппаратурой, при этом уровни виброускорения определялись по формуле:

$$L_a = 20 \lg \frac{\alpha}{3 \cdot 10^{-4}},$$

где амплитуда ускорения определяется как $\alpha = 3 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{0,05 L_a}$.

В свою очередь, $\alpha = A \cdot f_i^2$, тогда зависимость (2) принимает вид:

$$\eta = 0,1 \frac{\ln 10^{0,05(L_{ak} - L_{ai})}}{f_i} = 0,1 \cdot 2,3 \frac{\lg 10^{0,05 L_{ak}}}{f_i} = 10^{-2} \frac{L_{ak}}{f_i}. \quad (3)$$

Таким образом, коэффициенты потерь колебательной энергии (η) рассчитывались по модифицированной формуле, учитывающей уровни виброускорения. Для октавных полос коэффициенты потерь рассчитывались следующим образом:

$$\eta_{31,5} = 3,17 \cdot 10^{-4} \cdot L_{a31,5}$$

$$\eta_{63} = 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot L_{a63}$$

$$\eta_{125} = 8 \cdot 10^{-5} \cdot L_{a125}$$

$$\eta_{250} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot L_{a250}$$

$$\eta_{500} = 2,1 \cdot 10^{-5} \cdot L_{a500}$$

$$\eta_{1000} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot L_{a1000}$$

$$\eta_{2000} = 5 \cdot 10^{-6} \cdot L_{a2000}$$

$$\eta_{4000} = 2,5 \cdot 10^{-6} \cdot L_{a4000}$$

$$\eta_{8000} = 1,25 \cdot 10^{-6} \cdot L_{a8000}$$

Для обобщения экспериментальных данных и построения прогнозных моделей был применён регрессионный анализ, включающий в себя аппроксимацию нелинейными функциями и полиномами различной степени. С помощью алгебраических приёмов и замены переменных нелинейные функции достаточно легко приобретают линейный вид, что позволяет, используя метод наименьших квадратов, получить коэффициенты регрессии и для нелинейных функций. Однако для некоторых функций необходимо помнить и об обратном преобразовании для получения истинных значений коэффициентов регрессии [11].

Таким образом, существует возможность получить достаточно много различных аналитических зависимостей для одного и того же набора данных. При использовании вычислительной техники несложно рассчитать коэффициенты регрессии для всех возможных функций, провести анализ их точности относительно исходных данных и выбрать наиболее адекватную. В качестве оценки точности аналитических зависимостей было предложено использовать такой параметр, как среднеквадратическое отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{(n-m)-1} \sum_{i=1}^n (y_{\text{э}i} - y_i)^2}, \quad (4)$$

где n — количество данных эксперимента; m — степень полинома; y_{ε_i} — значение функции в эксперименте; y_i — рассчитанное значение по полученной зависимости. Этот параметр учитывает не только суммарные отклонения, но и степень полинома, то есть уточняет полиномиальное влияние. Рассчитывая среднеквадратическое отклонение для всех полученных аналитических зависимостей, можно по минимальному значению параметра определить наиболее адекватную функцию. Если расчёты коэффициентов регрессии и среднеквадратического отклонения сопровождать построением графиков, то анализ точности можно подтвердить и визуально [12].

Результаты исследования. Результаты измерений для условий, когда корпус редуктора устанавливался на стенде и на столе станка, приведены в таблице 1 и на рис. 1. Следует отметить, что при установке на столе станка из-за различной приведённой жёсткости численное значение коэффициентов потерь на 7–8 % выше, чем при установке на стенде. Причём разница в численных значениях вышеуказанных октав не превышает 6 %. Это обстоятельство для удобства инженерных расчётов виброакустических характеристик позволяет использовать постоянное значение коэффициента потерь колебательной энергии $\eta = 8,5 \cdot 10^{-3}$.

Таблица 1

Экспериментальные данные коэффициентов потерь колебательной энергии (η) корпуса редуктора

Условия проведения измерений	Численные значения коэффициентов потерь ($\eta \cdot 10^{-3}$) в октавных интервалах частот (Гц)						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
На специальном стенде	7,8	7,8	8,1	7,9	7,8	8,0	8,0
На столе станка	8,1	8,2	8,8	8,6	8,4	8,7	8,6

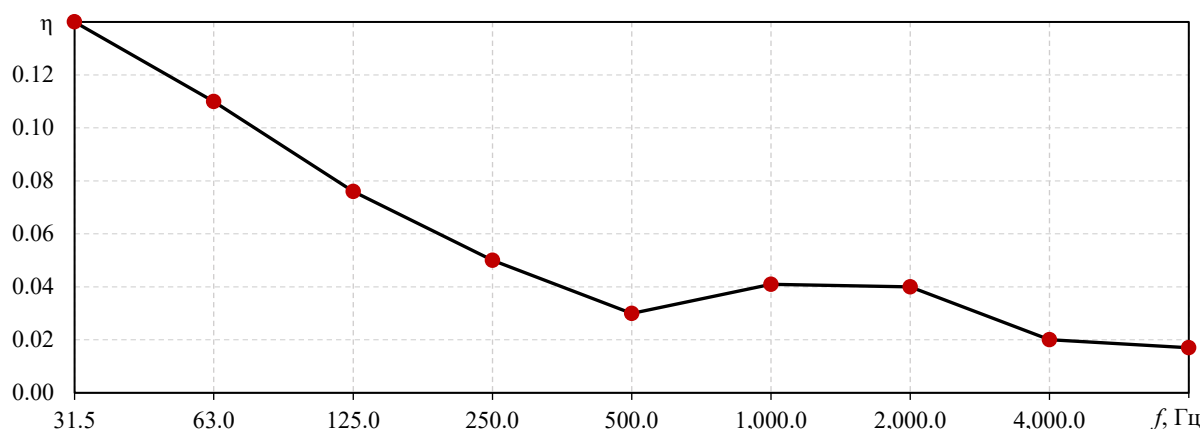


Рис. 1. Коэффициенты потерь колебательной энергии корпуса редуктора

Коэффициенты потерь колебательной энергии (η) рассчитывались по модифицированной формуле, учитывающей уровни виброускорения. Для обобщения экспериментальных данных и построения прогнозных моделей был применен регрессионный анализ, включающий в себя аппроксимацию нелинейными функциями и полиномами различной степени. Визуальное подтверждение анализа точности возможно, если расчеты коэффициентов регрессии и среднеквадратического отклонения сопровождать построением соответствующих графиков [13].

Результаты расчета коэффициентов регрессии корпуса редуктора для различных аналитических зависимостей приведены в таблицах 2 и 3, а также на рис. 2 и 3.

Таблица 2

Результаты регрессионного анализа нелинейными функциями

Название кривой	Уравнение	Среднеквадратическое отклонение (СКО)
Экспонента	$\eta = 0,068e^{2,2\pi \cdot 10^{-4} f}$	$2,11 \cdot 10^{-2}$
Степенная	$\eta = 0,504 f^{-0,41}$	$8,42 \cdot 10^{-3}$
Гиперболическая I типа	$\eta = 0,034 + \frac{4,2}{1,1f}$	$6,51 \cdot 10^{-3}$

Гиперболическая II типа	$\eta = \frac{1}{40,22 + 0,022f}$	$4,2 \cdot 10^{-2}$
Гиперболическая III типа	$\eta = \frac{1}{-4722 + 90,316f}$	$0,14 \cdot 10^{-2}$
Логарифмическая	$\eta = 0,21 - 0,024 \cdot \ln f$	$1,82 \cdot 10^{-2}$
S-образная	$\eta = e^{-4,173 + \frac{62,235}{f}}$	$2,04 \cdot 10^{-2}$
Обратнологарифмическая	$\eta = \frac{1}{-6,0 + 18,19 \cdot \ln f}$	$7,5 \cdot 10^{-2}$

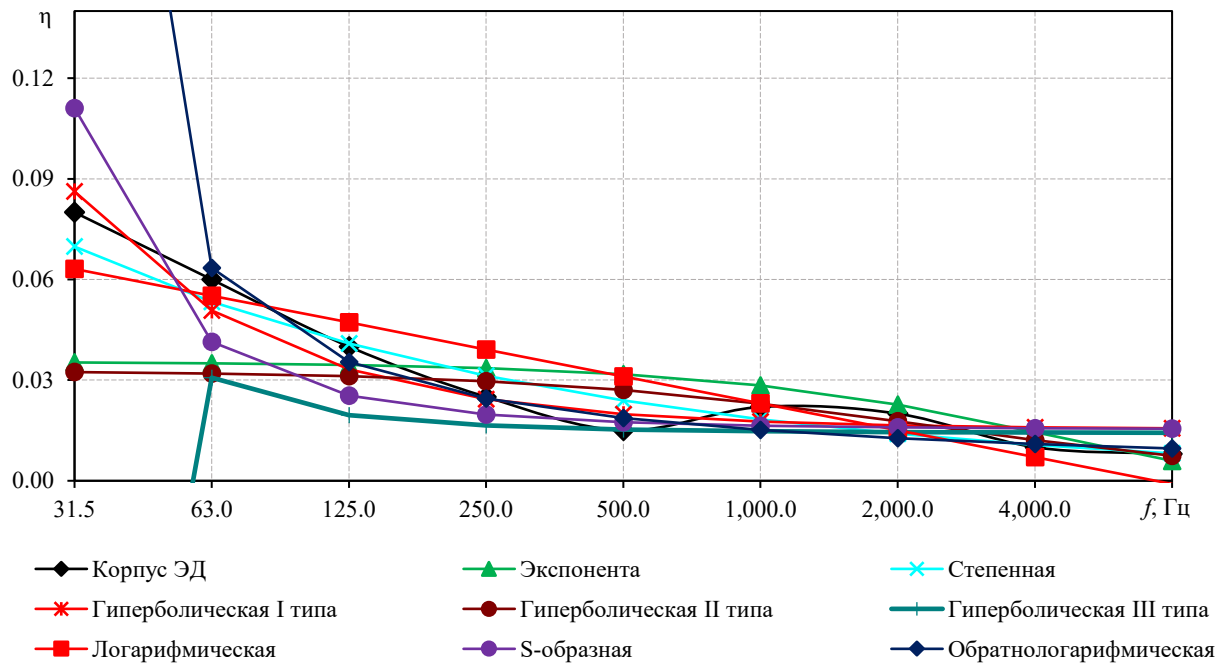


Рис. 2. Аппроксимация нелинейными функциями

Таблица 3

Результаты регрессионного анализа полиномами

Степень	Уравнение	СКО
1	$\eta = 0,012 - 0,032(\lg f)$	$2,4 \cdot 10^{-2}$
2	$\eta = 0,4 - 0,12(\lg f) + 0,02(\lg f)^2$	$7,13 \cdot 10^{-3}$
3	$\eta = 0,4 - 0,4(\lg f) + 0,15(\lg f)^2 - 0,01(\lg f)^3$	$5,4 \cdot 10^{-3}$
4	$\eta = 0,1 - 0,21(\lg f) + 0,24(\lg f)^2 - 0,811(\lg f)^3 - 0,0078(\lg f)^4$	$5,6 \cdot 10^{-3}$
5	$\eta = -2,2 + 4,5(\lg f) - 4,1(\lg f)^2 + 1,8(\lg f)^3 - 0,285(\lg f)^4 - 0,0205(\lg f)^5$	$4,13 \cdot 10^{-3}$
6	$\eta = 6,2 - 15,4(\lg f) + 16,8(\lg f)^2 + 9,1(\lg f)^3 + 3,12(\lg f)^4 - 0,51(\lg f)^5 + 0,032(\lg f)^6$	$7,8 \cdot 10^{-3}$
7	$\eta = 9,11 - 125,1(\lg f) + 27,3(\lg f)^2 - 16,07(\lg f)^3 + 6,2(\lg f)^4 - 1,8(\lg f)^5 + 0,24(\lg f)^6 - 0,0051(\lg f)^7$	$3,3 \cdot 10^{-3}$

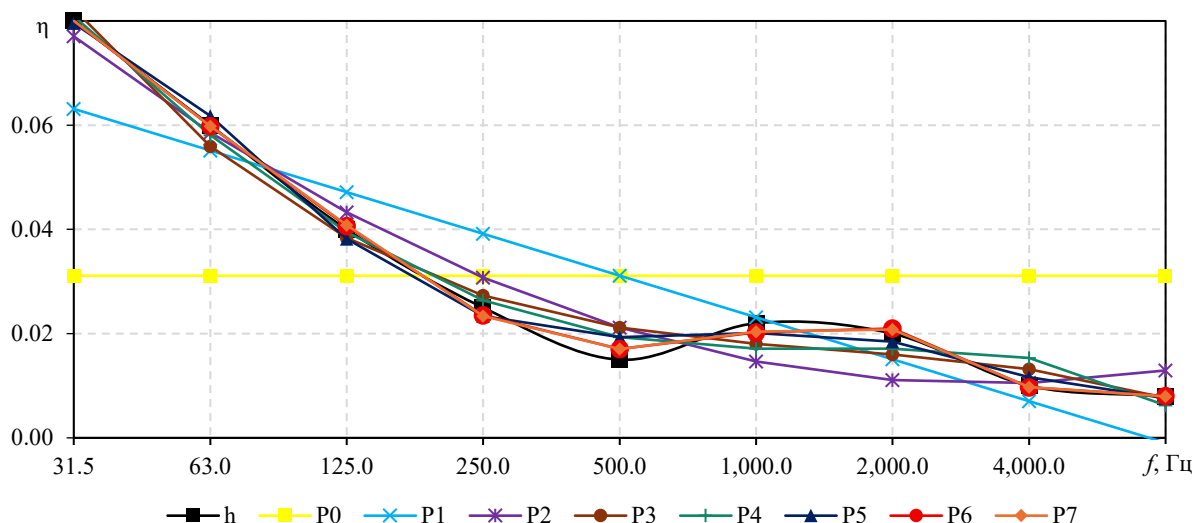


Рис. 3. Аппроксимация полиномами

Экспериментально установлено, что коэффициенты потерь для корпусных деталей из чугуна в диапазоне частот от 125 до 8000 Гц варьируются в пределах $(7,8-8,8) \cdot 10^{-3}$, демонстрируя слабую частотную зависимость. Для инженерных расчетов может быть принято постоянное значение $\eta \approx 8 \cdot 10^{-3}$. Регрессионный анализ показал, что наилучшей аппроксимирующей зависимостью для корпуса редуктора является полином шестого порядка.

Проанализировав полученные результаты, можно прийти к выводу, что наилучшей аналитической зависимостью будет полином шестого порядка:

$$\eta = 6,1 - 15,21(\lg f) + 16,1(\lg f)^2 + 9,33(\lg f)^3 + 3,25(\lg f)^4 - 0,54(\lg f)^5 + 0,036(\lg f)^6. \quad (5)$$

Узлы резания при растачивании и сверлении. Результаты расчета коэффициентов потерь узлов резания при растачивании и сверлении представлены на рис. 4.

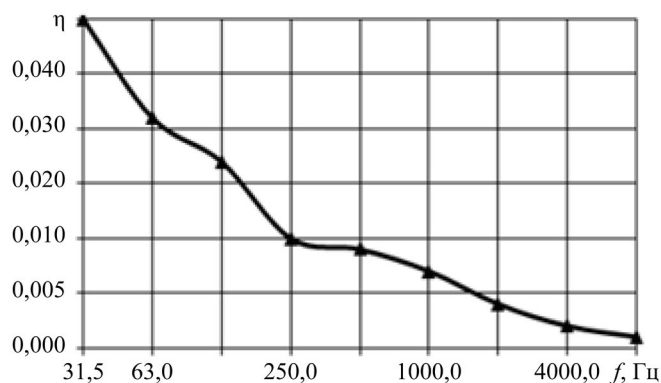


Рис. 4. Коэффициенты потерь узла резания при растачивании и сверлении

Результаты расчета коэффициентов регрессии приведены в таблицах 4 и 5, а также на рис. 5 и 6.

Таблица 4

Результаты регрессионного анализа нелинейными функциями

Название кривой	Уравнение	СКО
Экспонента	$\eta = 0,016e^{3,82 \cdot 10^{-4} f}$	$7,12 \cdot 10^{-3}$
Степенная	$\eta = 0,34 f^{-0,676}$	$3,14 \cdot 10^{-3}$
Гиперболическая I типа	$\eta = 0,062 + \frac{0,866}{f}$	$3,57 \cdot 10^{-3}$
Гиперболическая II типа	$\eta = \frac{1}{41 + 0,14 f}$	$3,34 \cdot 10^{-3}$
Гиперболическая III типа	$\eta = \frac{1}{-14,5 + 350,7 f}$	$1,97 \cdot 10^{-2}$

Логарифмическая	$\eta = 0,052 - 0,00057 \cdot \ln f$	$3,42 \cdot 10^{-3}$
S-образная	$\eta = e^{-5,478 + \frac{77,777}{f}}$	$9,12 \cdot 10^{-3}$
Обратнологарифмическая	$\eta = \frac{1}{-602,7 + 133,1 \cdot \ln f}$	$2,87 \cdot 10^{-2}$

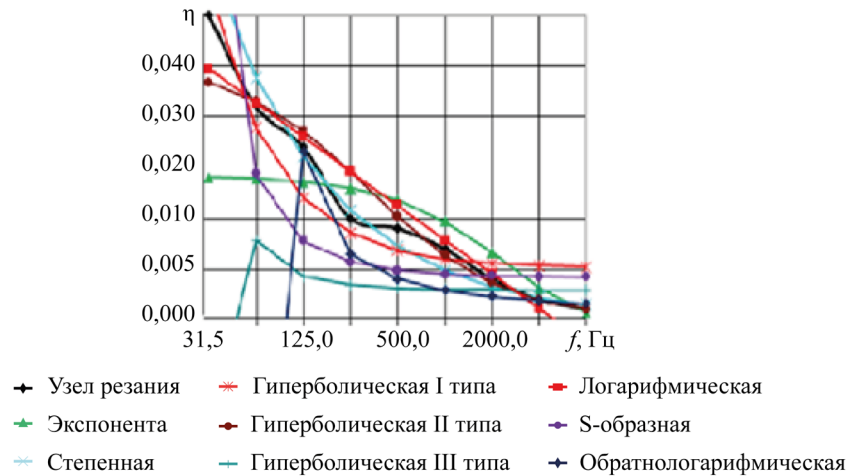


Рис. 5. Аппроксимация нелинейными функциями

Таблица 5

Результаты регрессионного анализа полиномами

Степень	Уравнение	СКО
1	$\eta = 0,041 - 0,015(\lg f)$	$4,55 \cdot 10^{-2}$
2	$\eta = 0,11 - 0,061(\lg f) + 0,0072(\lg f)^2$	$2,52 \cdot 10^{-3}$
3	$\eta = 0,419 - 0,158(\lg f) + 0,571(\lg f)^2 - 0,0051(\lg f)^3$	$1,71 \cdot 10^{-3}$
4	$\eta = 0,44 - 0,59(\lg f) + 0,37(\lg f)^2 - 0,091(\lg f)^3 - 0,0064(\lg f)^4$	$1,02 \cdot 10^{-3}$
5	$\eta = 0,88 - 1,41(\lg f) + 1,1(\lg f)^2 - 0,41(\lg f)^3 + 0,062(\lg f)^4 - 0,0036(\lg f)^5$	$9,06 \cdot 10^{-4}$
6	$\eta = -1,57 + 4,91(\lg f) - 5,12(\lg f)^2 + 3,21(\lg f)^3 - 0,98(\lg f)^4 - 0,16(\lg f)^5 + 0,0091(\lg f)^6$	$4,94 \cdot 10^{-4}$
7	$\eta = -8,2 + 23,5(\lg f) - 27,8(\lg f)^2 + 17,9(\lg f)^3 - 6,96(\lg f)^4 + 1,51(\lg f)^5 + 0,198(\lg f)^6 + 0,0092(\lg f)^7$	$2,12 \cdot 10^{-4}$

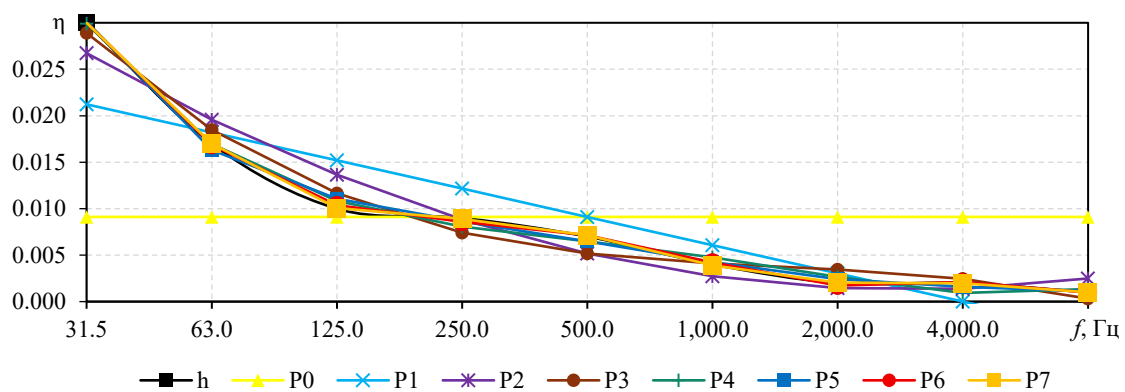


Рис. 6. Аппроксимация полиномами

После анализа полученных результатов для узлов резания стало очевидным, что наилучшей аналитической зависимостью будет полином седьмого порядка:

$$\eta = -8,21 + 23,2(\lg f) - 27,8(\lg f)^2 + 18,12(\lg f)^3 - 7,07(\lg f)^4 + 1,54(\lg f)^5 - 0,19(\lg f)^6 + 0,0079(\lg f)^7. \quad (6)$$

Узел резания при фрезеровании. Результаты расчета коэффициентов потерь узла фрезерования представлены на рис. 7.

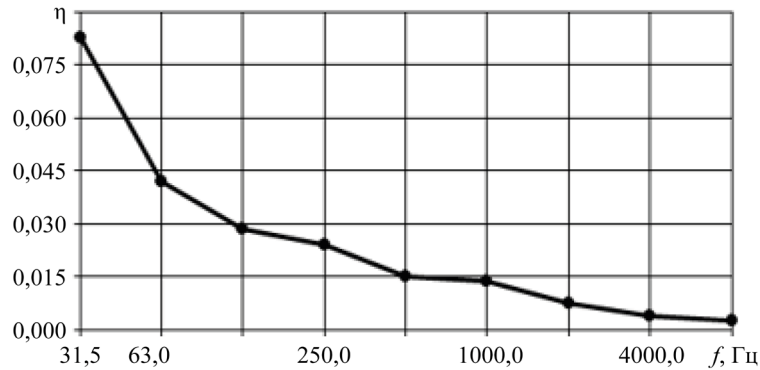


Рис. 7. Коэффициенты потерь узла фрезерования

Результаты расчета коэффициентов регрессии узла фрезерования приведены в таблицах 6 и 7, а также на рис. 8 и 9.

Таблица 6

Результаты регрессионного анализа нелинейными функциями

Название кривой	Уравнение	СКО
Экспонента	$\eta = 0,03e^{-3,153 f}$	$1,98 \cdot 10^{-2}$
Степенная	$\eta = 0,62 f^{-0,6}$	$3,05 \cdot 10^{-3}$
Гиперболическая I типа	$\eta = 0,007 + \frac{1,57}{f}$	$3,01 \cdot 10^{-3}$
Гиперболическая II типа	$\eta = \frac{1}{41,2 + 0,11 f}$	$1,24 \cdot 10^{-2}$
Гиперболическая III типа	$\eta = \frac{1}{-10400 + 261 f}$	$2,98 \cdot 10^{-2}$
Логарифмическая	$\eta = 0,088 - 0,0091 \cdot \ln f$	$8,5 \cdot 10^{-3}$
S-образная	$\eta = e^{-6,01 + \frac{90,2}{f}}$	$1,22 \cdot 10^{-2}$
Обратнологарифмическая	$\eta = \frac{1}{-420,5 + 97,08 \cdot \ln f}$	$4,07 \cdot 10^{-2}$

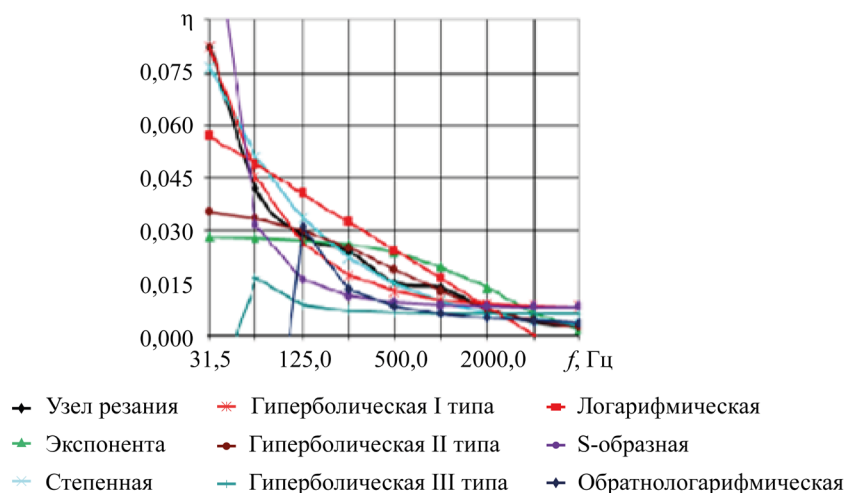


Рис. 8. Аппроксимация нелинейными функциями

Результаты регрессионного анализа полиномами

Степень	Уравнение	СКО
1	$\eta = 0,089 - 0,022(\lg f)$	$9,1 \cdot 10^{-3}$
2	$\eta = 0,16 - 0,1(\lg f) + 0,03(\lg f)^2$	$5,78 \cdot 10^{-3}$
3	$\eta = 0,52 - 0,34(\lg f) + 0,11(\lg f)^2 - 0,016(\lg f)^3$	$3,68 \cdot 10^{-3}$
4	$\eta = 1,01 - 1,08(\lg f) + 0,64(\lg f)^2 - 0,15(\lg f)^3 + 0,018(\lg f)^4$	$1,97 \cdot 10^{-3}$
5	$\eta = 1,72 - 2,91(\lg f) + 1,98(\lg f)^2 - 0,81(\lg f)^3 + 0,18(\lg f)^4 - 0,0087(\lg f)^5$	$1,65 \cdot 10^{-3}$
6	$\eta = 3,94 - 8,07(\lg f) + 7,61(\lg f)^2 + 3,85(\lg f)^3 + 1,1(\lg f)^4 - 0,17(\lg f)^5 + 0,0075(\lg f)^6$	$1,71 \cdot 10^{-4}$
7	$\eta = 0,74 - 7,12(\lg f) + 5,88(\lg f)^2 - 2,35(\lg f)^3 + 0,41(\lg f)^4 - 0,021(\lg f)^5 - 0,011(\lg f)^6 + 0,001(\lg f)^7$	$2,15 \cdot 10^{-4}$

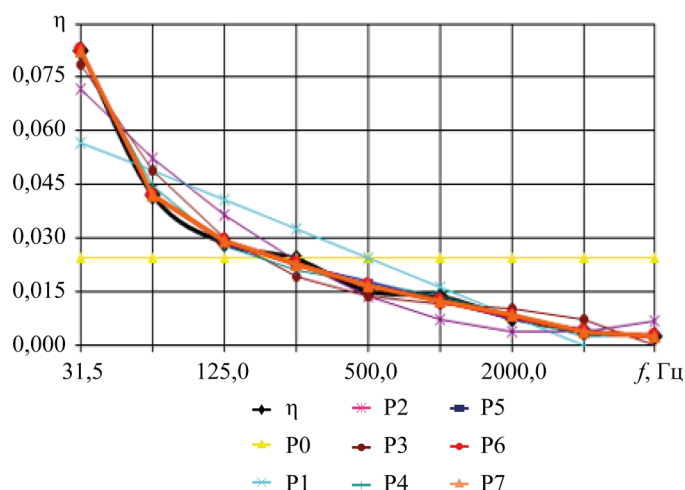


Рис. 9. Аппроксимация полиномами

Для узла фрезерования наилучшее соответствие обеспечивает полином пятого порядка:

$$\eta = 1,81 - 2,95(\lg f) + 1,98(\lg f)^2 - 0,71(\lg f)^3 + 0,18(\lg f)^4 - 0,0081(\lg f)^5. \quad (6)$$

Обсуждение. Анализ результатов, полученных в ходе исследования, подтверждает, что диссипативные свойства конструктивных элементов станка не являются постоянными и существенно зависят от типа технологической операции и частотного диапазона. Выявленные аналитические зависимости позволяют перейти от точечных оценок на фиксированных частотах к непрерывному прогнозированию потерь энергии, что критически важно для анализа динамического поведения станка на собственных частотах колебаний. Это открывает возможности для целенаправленного проектирования: зная частотный спектр наиболее опасных с точки зрения вибрации режимов, можно оптимизировать демпфирование именно в этих областях, например, за счёт выбора материалов с повышенным внутренним трением или применения композитных вибропоглощающих покрытий в определённых зонах конструкции.

Заключение. Выполненный регрессионный анализ позволил определить аналитические зависимости коэффициентов потерь колебательной энергии источников шума и вибрации при работе сверлильно-фрезерно-расточных станков. Эти зависимости дают возможность определить значение коэффициента потерь не только на среднегеометрических частотах октавного спектра, но и на собственных частотах колебаний. Используя представленные в работе уравнения, можно с высокой точностью оценить величину потерь колебательной энергии на различных частотах, что позволит целенаправленно применять методы виброизоляции и виброгашения. В частности, возможно более эффективное проектирование демпфирующих элементов и выбор оптимальных материалов для изготовления станин и других несущих конструкций станков [11]. Результаты могут быть полезны при создании алгоритмов контроля вибрации, что позволит значительно снизить уровень шума и вибрации на рабочих местах.

Список литературы / References

1. Алексеев М.В., Смычок И.А., Чукарин А.Н., Финоченко Т.А. Анализ условий труда работника на предприятиях транспортного машиностроения. *Труды Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2024;3(68):6–12. https://doi.org/10.46973/1818-5509_2024_3_6
- Alekseev MV, Smychok IA, Chukarin AN, Finochenko TA. Analysis of Working Conditions of Employees at Transport Engineering Enterprises. *Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobseniya*. 2024;3(68):6–12. (In Russ.) https://doi.org/10.46973/1818-5509_2024_3_6
2. Месхи Б.Ч. Улучшение условий труда операторов металлорежущих и деревообрабатывающих станков за счет снижения шума в рабочей зоне (теория и практика). Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ; 2003. 130 с.
- Mekhi BCh. *Improving the Working Conditions of Operators of Metal-Cutting and Woodworking Machines by Reducing Noise in the Working Area (Theory and Practice)*. Rostov-on-Don: DSTU Publishing center; 2003. 131 p. (In Russ.)
3. Гричишин М.В., Чукарин А.Н. Экспериментальные исследования спектрального состава шума при растачивании на сверлильно-фрезерно-расточных станках. *Труды Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2025;3(72):24–32. https://doi.org/10.46973/1818-5509_2025_3_24
- Grichishin MV, Chukarin AN. Experimental Studies of the Spectral Composition of Noise during Boring of Drilling-Milling-Boring Machine. *Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobseniya*. 2025;(3):24–32. (In Russ.) https://doi.org/10.46973/1818-5509_2025_3_24
4. Разаков Ж.П., Гричишин М.В., Финоченко Т.А., Чукарин А.Н. Виброакустическая динамика коробок скоростей сверлильно-фрезерно-расточных станков с многоскоростными электродвигателями. *Noise Theory and Practice*. 2022;8,2(29):56–62. URL: <https://clck.ru/3VL4HH> (дата обращения 10.08.2026)
- Razakov ZhP, Grichishin MV, Finochenko TA, Chukarin AN. Vibroacoustic Dynamics of Gearboxes of Drilling-Milling Boring Machines with Multi-Speed Electric Motors. *Noise Theory and Practice*. 2022;8,2(29):56–62. (In Russ.) URL: <https://clck.ru/3VL4HH> (accessed 10.08.2026)
5. Рыжов С.П., Новиков В.В., Хозяев И.А., Чукарин А.Н. Регрессивные зависимости коэффициента потерь колебательной энергии основных источников зубострогальных станков. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023;(8):398–401.
- Ryzhov SP, Novikov VV, Khozyaev IA, Chukarin AN. Regressive Dependencies of the Coefficient of Loss of Vibrational Energy of the Main Sources of Goothing Machines. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2023;(8):398–401. (In Russ.)
6. Чукарина Н.А., Русяков Д.В., Шамшура С.А. Регрессионные зависимости коэффициентов потерь колебательной энергии многослойных материалов из древесины. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2020;(3):65–71.
- Chukarina NA, Ruslanov DV, Shamshur SA. Regression Dependences of Vibrational Energy Loss Coefficients of Multilayer Wood Materials. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2020;(3):65–71. (In Russ.)
7. Чукарина Н.А., Мотренко Д.В. О коэффициенте потерь колебательной энергии различных пород древесины. *Мониторинг. Наука и Технология*. 2019;2(40):66–71. <https://doi.org/10.25714/MNT.2019.40.010>
- Chukarina NA, Motrenko DV. Loss Factor of Vibrational Energy for Different Wood Species. *Monitoring. Science and Technologies*. 2019;2(40):66–71. (In Russ.) <https://doi.org/10.25714/MNT.2019.40.010>
8. Шония Д.П., Бескопыльный А.Н., Чукарин А.Н. Определение коэффициентов потерь колебательной энергии для строгального станка. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2024;8:263–268.
- Shonia DP, Beskopylny AN, Chukarin AN. Determination of Loss Ratio Vibrational Energy for Planing Machine. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2024;8:263–268. (In Russ.)
9. Чукарин А.Н., Феденко А.А., Шашурин А.Е., Васильева В. Регрессионный анализ коэффициентов потерь энергии колебаний в газоразрядных системах электростанций. *Акустика*. 2021;(41):115–118. <https://doi.org/10.36336/akustika202141115>
10. Ключев В.И., Костин А.В., Смирнов А.А. *Практикум по вибродиагностике машин*. Москва: Машиностроение; 2018. 240 с.
- Klyuchev VI, Kostin AV, Smirnov AA. *Practical Training in Vibration Diagnostics of Machines*. Moscow: Mashinostroyeniye; 2018. 240 p. (In Russ.)
11. Коробов С.М., Лукашенок В.Б., Сазонова С.А., Финоченко Т.А. Регрессионные зависимости диссипативной функции системы «стол — заготовка» металлорежущих станков различного функционального назначения. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2026;(2):202–208.
- Korobov SM, Lukashonok VB, Sazonova SA, Finochenko TA. Regression Dependencies of the Dissipative Function of the “Table — Workpiece” System of Metal-Cutting Machines of Various Functional Purpose. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2026;(2):202–208. (In Russ.)

12. Стуженко Н.И., Сазонова С.А., Чукарин А.Н., Финоченко В.А. Оценка потерь колебательной энергии шпиндельных бабок алмазно-расточных и шлифовальных станков. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2026;2:244–251.

Stuzhenko NI, Sazonova SA, Chukarin AN, Finochenko VA. Assessment of Oscillatory Energy Losses of Spindle Headstocks of Diamond Boring and Grinding Machines. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2026;2:244–251. (In Russ.)

13. Рыжов С. П., Солдатов А. Г., Харламов О. Г., Финоченко Т. А. Экспериментальные исследования спектрального состава вибраций зубообрабатывающих станков. *Труды Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2024;(4):31–36. https://doi.org/10.46973/1818-5509_2024_4_31

Ryzhov SP, Soldatov AG, Kharlamov OG, Finochenko TA. Experimental Studies of the Spectral Composition of Vibrations of Goothing Machines. *Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobseniya*. 2024;(4):31–36. (In Russ.) https://doi.org/10.46973/1818-5509_2024_4_31

Об авторах:

Максим Владимирович Гричишин, аспирант Ростовского государственного университета путей сообщения, старший преподаватель кафедры «Стандартизация, сертификация и управление качеством» Ростовского филиала Академии стандартизации, метрологии и сертификации (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, просп. Соколова, 58/173), [SPIN-код, grichishinmv@rostcsm.ru](mailto:grichishinmv@rostcsm.ru)

Бесарион Чохосевич Месхи, доктор технических наук, профессор, ректор Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код, ORCID, ScopusID, ResearcherID, reception@donstu.ru](mailto:reception@donstu.ru)

Заявленный вклад авторов:

Б.Ч. Месхи: научное руководство, анализ результатов исследований, корректировка выводов.

М.В. Гричишин: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Maksim V. Grichishin, Postgraduate Student, Rostov State Transport University, Senior Lecturer of the Department of Standardization, Certification and Quality Management, Rostov Branch of the Academy for Standardization, Metrology and Certification (58/173, Sokolova Ave., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code, grichishinmv@rostcsm.ru](mailto:grichishinmv@rostcsm.ru)

Besarion Ch. Meskhi, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code, ORCID, ScopusID, ResearcherID, reception@donstu.ru](mailto:reception@donstu.ru)

Claimed Contributorship:

BCh Meskhi: supervision, writing – review & editing.

MV Grichishin: conceptualization, calculations, 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 10.06.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 11.07.2026

Принята к публикации / Accepted 23.07.2026

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 504.3:620.9

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-3-206-218>

Формирование кластерных групп ключевых стран-эмитентов парниковых газов в разрезе экономико-демографических и энергетических показателей

О.А. Локтионов[✉] , Д.О. Максимов^{id} , М.А. Забелин^{id} ,И.А. Белошицкая^{id} Национальный исследовательский университет «МЭИ»¹, г. Москва, Российская Федерация✉ maximovdo@mpei.ru

EDN: IRNGWU

Аннотация

Введение. Актуальность работы связана с необходимостью перехода от общих схем декарбонизации к дифференцированным климатическим стратегиям, поскольку страны-эмитенты парниковых газов (ПГ) различаются по энергобалансу, индустриализации, демографии, углеродоемкости экономики, экспорту топливно-энергетических ресурсов. Одинаковые цели по снижению выбросов могут требовать разных технологических, инвестиционных и регуляторных решений, поэтому унификация неэффективна. В литературе преимущественно анализируются углеродоемкость, сценарии низкоуглеродного развития, отдельные энергетические индикаторы. Фрагментарность известных подходов препятствует созданию типологизации эмитентов по совокупности экономико-демографических, энергетических и климатических признаков. Представленная научная работа восполняет этот пробел. Цель исследования — формирование и интерпретация типологии ключевых страны-эмитентов ПГ на основе комплексного анализа экономико-демографических, энергетических и климатических показателей. По этой типологии определяются условия декарбонизации и переходные климатические риски в рамках кластеров.

Материалы и методы. Исследование основано на статистической базе по более чем 40 странам-эмитентам ПГ. Для обеспечения сопоставимости выполнены предобработка данных, нормализация признаков методом z -преобразования, кластеризация иерархическим методом Уорда и комбинированным подходом $t\text{-SNE}^2 + k\text{-means}^3$. Оптимальное число кластеров определено по методу локтя и коэффициенту силуэта, а качество кластеризации — по индексу Дэвиса-Болдина.

Результаты исследования. Определены существенные межстрановые различия по удельным выбросам парниковых газов на душу населения, углеродоемкости ВВП по ППС⁴, структуре установленной мощности генерации, удельным выбросам на единицу произведенной электроэнергии. По итогам иерархической кластеризации и $t\text{-SNE} + k\text{-means}$ выделены четыре группы государств:

- два крупнейших эмитента с масштабной и диверсифицированной энергетикой;
- четыре экспортера топливно-энергетических ресурсов;
- восемь углеродоемких индустриальных и развивающихся стран;
- 31 относительно энергоэффективная и низкоуглеродная экономика.

Обсуждение. Анализ кластеров позволяет утверждать, что абсолютный объем выбросов ПГ не является достаточным основанием для выбора климатической стратегии. Страны с близкой углеродной нагрузкой могут существенно различаться по масштабу экономики, доле угольной генерации, экспортной ориентации энергетического комплекса, уровню индустриализации, энергоэффективности и структуре конечного энергопотребления. Для каждого сформированного кластера требуются разные приоритеты и направления адаптации стратегий декарбонизации, а именно: сокращение угольной генерации и модернизация сетей для крупнейших эмитентов;

¹ Ранее — Московский энергетический институт.

² От англ. distributed stochastic neighbor embedding — распределенное стохастическое встраивание соседей. Это алгоритм машинного обучения для снижения размерности и визуализации многомерных данных.

³ Метод k -средних (англ.).

⁴ Валовой внутренний продукт по паритету покупательной способности.

снижение выбросов в добыче и переработке; CCUS⁵ и диверсификация экспорта для ресурсных экономик; повышение промышленной энергоэффективности и модернизация генерации для индустриальных стран; устранение остаточных выбросов и учет импортированного углеродного следа для низкоуглеродных экономик. Ограничения исследования связаны с различиями национальной статистической отчетности, неполнотой некоторых показателей и чувствительностью кластеризации к выбору переменных.

Заключение. Предложенный кластерный подход позволяет перейти от ранжирования стран по объему выбросов к выделению групп со схожим профилем экономико-демографических, энергетических и климатических показателей. Результаты кластеризации можно применить в дальнейшем анализе ключевых стран-эмитентов для выявления наиболее подходящих технологий и законодательных мер снижения выбросов парниковых газов. Кроме того, итоги работы подходят для оценки эффективности реализации и адаптации климатических стратегий декарбонизации.

Ключевые слова: сценарий декарбонизации, адаптация стратегии декарбонизации, структура углеродной нагрузки, углеродоемкость экономики, углеродозагрязненность страны

Финансирование. Исследование проводилось в рамках проекта «Разработка цифрового инструмента оценки переходных климатических рисков и потенциала декарбонизации энергетической отрасли» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024–2026 гг.»

Для цитирования. Локтионов О.А., Максимов Д.О., Забелин М.А., Белошицкая И.А. Формирование кластерных групп ключевых стран-эмитентов парниковых газов в разрезе экономико-демографических и энергетических показателей. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2026;10(3):206–218. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-3-206-218>

Original Empirical Research

Clustering of Groups of Key Greenhouse Gas-Emitting Countries Based on Economic, Demographic, and Energy Indicators

Oleg A. Loktionov[✉]^{ID}, Daniil O. Maksimov^{ID}, Mikhail A. Zabelin^{ID}, Irina A. Beloshitskaya^{ID}

National Research University “MPEI”, Moscow, Russian Federation

✉ maximovdo@mpei.ru

Abstract

Introduction. The relevance of this work stems from the need to move away from general decarbonization plans and towards differentiated climate strategies, since countries that emit greenhouse gases (GHGs) differ in terms of their energy balance, level of industrialization, population size, carbon intensity of their economy, and the export of fuel and energy resources. The same emission reduction goals may require different technological, investment, and regulatory solutions. Unification approaches are not effective in this context. The literature mainly focuses on analyzing carbon intensity, low-carbon development scenarios, and individual energy indicators. The fragmentary nature of the known approaches prevents the creation of a typology of GHG-emitting countries based on a combination of economic, demographic, energy, and climatic characteristics. The presented scientific work fills this gap. The aim of this study was to form and interpret the typology of key GHG-emitting countries based on a comprehensive analysis of economic, demographic, energy, and climatic indicators. According to this typology, decarbonization conditions and transitional climate risks within clusters were identified.

Materials and Methods. The research was based on a statistical database for more than 40 GHG-emitting countries. To ensure comparability, data preprocessing, z-score normalization of features, clustering by Ward’s hierarchical method, and the combined *t-SNE* + *k-means* approach were used. The optimal number of clusters was determined using the elbow method and the silhouette coefficient, and the clustering quality was determined by the Davies–Bouldin index.

Results. Significant cross-country differences in specific greenhouse gas emissions per capita, the carbon intensity of GDP at PPP, the structure of generation capacity, and specific emissions per unit of electricity produced have been identified. Based on the results of hierarchical clustering and *t-SNE* + *k-means*, four groups of states were identified:

- two largest emitters with large-scale and diversified energy production;
- four exporters of fuel and energy resources;
- eight carbon-intensive industrial and developing countries;
- 31 relatively energy-efficient and low-carbon economies.

⁵ От англ. carbon capture, utilization, and storage — улавливание, использование и хранение углерода.

Discussion. Cluster analysis suggested that the absolute amount of GHGs emissions was not the only factor to consider when choosing a climate strategy. Countries with similar carbon footprints could differ significantly in terms of economic scale, the proportion of coal generation, export orientation of the energy complex, industrialization level, energy efficiency, and final energy consumption structure. Each formed cluster required different priorities and approaches for adapting decarbonization strategies, namely: reduction of coal generation and modernization of networks for the largest emitters; reduction of emissions in mining and processing; CCUS and export diversification for resource economies; improvement of industrial energy efficiency and modernization of generation for industrial countries; elimination of residual emissions and accounting for imported carbon footprint for low-carbon economies. The limitations of the study were related to differences in national statistical reporting, incompleteness of some indicators, and sensitivity of clustering to the choice of variables.

Conclusion. The proposed cluster approach makes it possible to move from ranking countries based on emissions to identifying groups with similar profiles of economic, demographic, energy, and climate indicators. The results of clustering can be used in further analysis of key emitting countries to identify the most suitable technologies and legislative measures for reducing greenhouse gas emissions. Additionally, the results can be used to assess the effectiveness of implementing and adapting decarbonization strategies.

Keywords: decarbonization scenario, adaptation of decarbonization strategy, carbon load structure, carbon intensity of the economy, carbon pollution of the country

Funding Information. The research was conducted as part of the project “Development of a Digital Tool for Assessing Transitional Climate Risks and the Potential for Decarbonization of the Energy Industry”, which was supported by a grant from the National Research University “MPEI” for the scientific research program “Priority 2030: Technologies of the Future” in 2024–2026.

For Citation. Loktionov OA, Maksimov DO, Zabelin MA, Beloshitskaya IA. Clustering of Groups of Key Greenhouse Gas-Emitting Countries Based on Economic, Demographic, and Energy Indicators. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(3):206–218. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-3-206-218>

Введение. Центральная проблема исследования состоит в том, что глобальные цели декарбонизации формулируются как общие, универсальные, однако фактические условия их достижения существенно различаются между странами. Где-то углеродная нагрузка определяется масштабом экономики и численностью населения, где-то — высокой долей угольной генерации, экспортной ориентацией топливно-энергетического комплекса, энергоёмкой промышленностью или недостаточной технологической модернизацией. Поэтому простое ранжирование стран по объёму выбросов ПГ не позволяет обоснованно определить приоритеты климатической политики и направления адаптации стратегий декарбонизации. Фокус глобальной дискуссии о сокращении выбросов парниковых газов смещается от постановки общих целей к выбору траекторий декарбонизации для стран с принципиально различными структурами энергетики. Долгосрочный ориентир Парижского соглашения — ограничение роста средней мировой температуры. Точка отсчёта в данном случае — доиндустриальный уровень. Целевой показатель формулируется так: «значительно ниже 2 °C». Решение этой задачи требует серьёзной трансформации мировой энергетической системы [1].

Более 130 стран заявили о намерении прийти к полной углеродной нейтральности к 2050 году. Эти государства либо уже взяли на себя обязательства по обеспечению нулевого баланса выбросов парниковых газов, либо рассматривают достижение нулевых выбросов к середине текущего столетия [2].

Практическая реализация принятых стратегий зависит не только от политических обязательств, но и от энергобаланса, уровня индустриализации, структуры конечного энергопотребления, экспортной роли топливно-энергетического комплекса, демографии и исходной углеродоемкости экономики [3].

Современные исследования показывают, что энергетический сектор остается главным источником антропогенных выбросов ПГ, а сценарии декарбонизации существенно различаются по глубине технологической трансформации, стоимости перехода и степени вовлечения низкоуглеродных источников энергии [4]. Материалы о проблеме публиковали РЭА^{6, 7}, РАНХиГС⁸, ИНП РАН⁹, ЦЭНЭФ¹⁰, Energy Institute^{11, 12}, IEA^{13, 14}.

⁶ Российское энергетическое агентство.

⁷ РЭА Минэнерго России. Сценарии развития мировой энергетики до 2050 года. 2024. 130 с.

⁸ Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации.

⁹ Институт народнохозяйственного прогнозирования Российской академии наук.

¹⁰ Центр по эффективному использованию энергии.

¹¹ Институт энергетики (англ.).

¹² Energy Institute. Statistical Review of World Energy (73rd edition). 2024. 76 p. ISSN 2976-7857.

¹³ От англ. International energy agency — Международное энергетическое агентство.

¹⁴ IEA. World Energy Outlook 2024. Paris: IEA. 2024. 398 p.

В российской и зарубежной литературе достаточно подробно рассмотрены сценарии достижения углеродной нейтральности, макроэкономические последствия энергоперехода, перспективы водородной энергетики, роль атомной генерации, возобновляемых источников энергии (ВИЭ), энергоэффективности и технологий улавливания углерода. Сравнительный анализ сценариев, основанных на макроэкономическом моделировании, позволил выделить три ключевые траектории.

К первой относятся инерционные подходы. Специалисты РЭА, РАНХиГС и ЦЭНЭФ указывали на необоснованное следование сложившимся моделям и факторы, тормозящие развитие в сфере декарбонизации. Авторы отметили, что модернизация инфраструктуры фокусируется на ископаемом топливе. Это ведет к умеренному изменению структуры первичных энергоресурсов, а также стагнации или росту выбросов ПГ (к 2050 году — до 6,5 гигатонн эквивалента диоксида углерода).

Вторая траектория объединяет умеренно оптимистичные сценарии. Авторы ИНП РАН называют их, например, «разумным» выбором [5], РЭА — «рациональным технологическим». В ЦЭНЭФ полагают, что значимым результатом будет достижение так называемого «углеродного плато». То есть в данном случае речь идет о постепенном внедрении низкоуглеродных технологий. Возможность плавного повышения энергоэффективности и частичная диверсификация энергобаланса стали обоснованием задачи: к 2050 году выбросы нужно снизить до 1,5–3,5 гигатонн эквивалента диоксида углерода или стабилизировать на этом уровне.

Наконец, третья группа объединяет радикальные подходы к проблеме. Предлагается добиваться низких [6] или нулевых показателей углеродного следа, действовать в этом направлении активно или даже «агрессивно» [5]. Реализация таких решений требует глубокой структурной перестройки экономики, масштабного внедрения возобновляемых источников энергии, атомной генерации, водородных технологий, систем улавливания и хранения углерода. Таким образом к 2050 году нужно сократить выбросы до 0,54–2 гигатонн эквивалента диоксида углерода. Прогноз снижения общего потребления первичных энергетических ресурсов — до 12,4 млрд тонн нефтяного эквивалента. Во всяком случае такие показатели заложены в сценарии «Чистый ноль» РЭА Минэнерго России.

Во всех рассмотренных схемах прогнозируется достижение пика спроса на уголь, нефть и природный газ до 2030 года с последующим снижением, особенно для угля. Критические факторы реализации описанных сценариев: сбалансированная модернизация энергоемких отраслей, развитие регуляторных механизмов (включая ценообразование на углерод), обеспечение экономической доступности низкоуглеродных решений [7].

Опубликованные исследования можно условно разделить на три группы. В первую входят работы по сценарному моделированию низкоуглеродного развития с оценками возможных траекторий изменения энергобаланса, выбросов и структуры потребления первичных энергоресурсов. В источниках второй группы сопоставляются страны и регионы по отдельным индикаторам: абсолютным выбросам ПГ, выбросам на душу населения, углеродоемкости ВВП, доле ископаемого топлива, энергоемкости экономики или темпам внедрения ВИЭ. Авторы исследований третьей группы используют методы многомерного анализа и кластеризации, однако такие работы часто ограничиваются отдельными группами стран, узким набором энергетических или эмиссионных признаков либо не связывают результаты с переходными климатическими рисками и практическими направлениями декарбонизации.

Решение в данном случае — типологизация стран по совокупности признаков, отражающих структурные изменения углеродной нагрузки [8]. Кластерный анализ позволит преодолеть недостатки стандартного ранжирования и выделить группы стран, схожих по профилю углеродной нагрузки, а также по экономико-демографическим, энергетическим и климатическим особенностям.

Анализ научной литературы показал недостаточную разработанность комплексной типологизации стран-эмитентов ПГ, и этот пробел призвана восполнить представленная научная работа. Предложенный подход позволит определить, какие меры декарбонизации можно тиражировать внутри группы стран, а какие требуют точечной адаптации с учетом национальной структуры энергобаланса и переходных климатических рисков. В этом отличие данной концепции от других, ограничивающихся анализом отдельных энергетических или эмиссионных индикаторов.

Таким образом, цель исследования — формирование и интерпретация типологии ключевых стран-эмитентов парниковых газов на основе комплексного анализа экономико-демографических, энергетических и климатических показателей. Полученная типология используется для определения различий в предпосылках декарбонизации и переходных климатических рисках для стран со схожими профилями.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

– формирование, преобразование и нормализация экономико-демографических, энергетических и климатических показателей по ключевым странам-эмитентам ПГ для обеспечения межстрановой сопоставимости;

- установление наиболее информативных групп признаков и выполнение кластеризации стран с оценкой устойчивости полученных групп;
- интерпретация профилей сформированных кластеров и определение приоритетных направлений адаптации стратегий декарбонизации.

Материалы и методы. Схема исследования включала 10 пунктов.

1. Сбор статистических данных для более чем 40 ключевых стран-эмитентов парниковых газов в период с 2010 по 2022 годы [9].
2. Отбор стран по критерию вклада в глобальные выбросы и представительности энергетической модели.
3. Формирование системы экономико-демографических, энергетических, ресурсных и климатических признаков.
4. Унификация наименований стран, единиц измерения и временного среза данных.
5. Очистка массива данных и исключение показателей, не обеспечивающих межстрановую сопоставимость.
6. Стандартизация количественных признаков методом z -преобразования.
7. Предварительная визуальная проверка структуры данных со снижением размерности методом главных компонент (англ. *principal component analysis*, PCA).
8. Кластеризация данных методом Уорда и комбинированным подходом $t\text{-SNE} + k\text{-means}$.
9. Выбор оптимального числа кластеров по методу локтя и коэффициенту силуэта. Оценка качества кластеризации по индексу Дэвиса — Болдина.
10. Интерпретация кластеров с учетом энергетического профиля, углеродной нагрузки и переходных климатических рисков.

В исследуемую совокупность включались страны, отвечающие одному из двух или двум критериям. Первый — значение для глобального объема выбросов ПГ. Второй — представительность с точки зрения энергетической модели. То есть принимались во внимание не только большие абсолютные объемы выбросов, но и высокая доля ископаемого топлива, экспортная ориентация топливно-энергетического комплекса, развитая низкоуглеродная генерация либо существенная трансформация энергетического баланса.

Для обеспечения сопоставимости использовались показатели за 2022 год. Такой подход дал наиболее полный срез по странам. Временные ряды за 2010–2022 гг. задействовали для интерпретации динамики и проверки устойчивости выявленных различий.

Оценка строилась на системе показателей по двум группам, или блокам, данных.

В первый (экономико-демографический) вошли ВВП, численность населения, доля городского и сельского населения.

Второй (энергетический и ресурсный) включал:

- установленную мощность генерации по типам источников;
- производство и импорт первичной энергии;
- производство тепло- и электроэнергии по видам генерации;
- энергопотребление по секторам экономики;
- извлекаемые запасы угля, природного газа и нефти;
- суммарные запасы энергоносителей.

Третий (климатический) блок объединил выбросы ПГ — общие и по секторам экономики (энергетика, промышленные процессы, сельское хозяйство, отходы).

Итоговая матрица формировалась только по количественным показателям, обеспечивающим сопоставимость между странами. Для каждого признака выполнялась проверка единиц измерения, диапазонов значений и наличия пропусков. Показатели, по которым отсутствовали сопоставимые данные для значительной части стран, использовались только на этапе описательного анализа и не включались в итоговую матрицу кластеризации. Стандартизация выполнялась по формуле z -преобразования: из каждого значения признака вычиталось среднее значение по совокупности стран, после чего результат делился на стандартное отклонение. Это позволило исключить доминирование признаков с большим абсолютным масштабом, например ВВП, численности населения или установленной мощности генерации.

В целях анализа производства и потребления энергоресурсов, оценки эффективности их использования и влияния эмитентов на состояние окружающей среды рассмотрено формирование кластерных групп ключевых стран-эмитентов по экономико-демографическим и энергетическим показателям. Рассмотрены более 10 методов обработки статистических данных для формирования кластеров [10]. В таблице 1 обобщается информация о наиболее подходящих методах.

Таблица 1

Сравнительный анализ методов обработки статистических данных для формирования кластерных групп

Метод	Входные данные	Выходные данные	Достоинства	Недостатки
Иерархическая кластеризация	– массив с характеристиками точек данных, – матрица близости	– дендрограмма – иерархия вложенных кластеров	– не требует указания числа кластеров в отличие от метода k -средних, – простота интерпретации, – хорошая визуализация результата	– вычислительная сложность, – чувствительность к выбросам, – невозможность разделить пересекающиеся кластеры
k -means	– массив с характеристиками точек данных, – предполагаемое количество кластеров (k)	– набор кластеров с распределением объектов, – координаты центров кластеров	– возможность быстрой обработки больших наборов данных, – простота интерпретации, – хорошая визуализация результата	– зависимость результата от выбора исходных центров кластеров и их количества, – чувствительность к выбросам, – непоследовательность результатов
t -SNE	– массив данных с признаками (высокомерные данные)	– визуализация с сохранением локальных кластеров,	– эффективен для визуализации сложных нелинейных структур, – хорошо сохраняет локальные отношения между точками	– высокая вычислительная сложность, – результат зависит от параметров и количества итераций
$DBSCAN$ ¹⁵	– массив с характеристиками точек данных, – минимальное количество точек в кластере	– набор кластеров с распределением объектов по кластерам, – шумовые точки	– не требует указания числа кластеров, – нечувствителен к порядку точек, – может найти кластеры произвольной формы, – учитывает шум и устойчив к выбросам	– вычислительная сложность, – плохое разделение на кластеры при равномерном распределении данных

Кластерный анализ предполагает классификацию объектов наблюдения (случаев) в группы (кластеры) на основе сходства их характеристик по множеству переменных [11]. Иерархическая кластеризация выполнялась методом Уорда на стандартизированной матрице признаков с использованием Евклидова расстояния. Метод Уорда выбран, поскольку он минимизирует внутрикластерную дисперсию и позволяет получить интерпретируемую дендрограмму сходства стран. Дополнительно применялся комбинированный подход t -SNE + k -means. Для нелинейного отображения высокомерной структуры данных в двумерное пространство использовался t -SNE, после чего на полученном представлении выполнялась кластеризация методом k -means.

Для обеспечения воспроизводимости расчета параметры алгоритмов фиксировались в программной реализации. Число кластеров проверялось в диапазоне $k = 2-10$ с использованием метода локтя и коэффициента силуэта, а качество итоговых решений дополнительно оценивалось по индексу Дэвиса-Болдина. В процедурах k -means фиксировалось начальное состояние генератора случайных чисел ($random_state = 42$). При подборе числа кластеров использовалась инициализация центроидов k -means++. Параметры n_init и max_iter отдельно не задавались и принимались равными значениям по умолчанию используемой версии библиотеки *scikit-learn*. Для t -SNE задавались $n_components = 2$, $perplexity = 30$, $random_state = 42$. Параметры $learning_rate$, max_iter / n_iter , $init$ и $metric$ отдельно не задавались. После построения двумерного t -SNE-представления выполнялась кластеризация методом k -means при $k = 4$.

¹⁵ От англ. density-based spatial clustering of applications with noise — кластеризация приложений на основе плотности с учетом шума. Алгоритм машинного обучения.

Результаты исследования. Анализ статистики основных стран-эмитентов ПГ позволил получить перекрестные распределения по выбросам на душу населения и на единицу ВВП по ППС (рис. 1). Первый показатель характеризует удельную демографическую углеродную нагрузку и позволяет сопоставлять страны с учетом численности населения. Второй — углеродоемкость экономики, то есть объем выбросов, приходящийся на единицу создаваемого экономического продукта. Совместное рассмотрение этих показателей позволяет различать страны с высокой абсолютной эмиссией, страны с высокой углеродоемкостью производства и страны, где значительная углеродная нагрузка связана прежде всего с масштабом экономики и потребления. Размер пузырька соотносится со значением численности населения в 2022 году (млн человек).

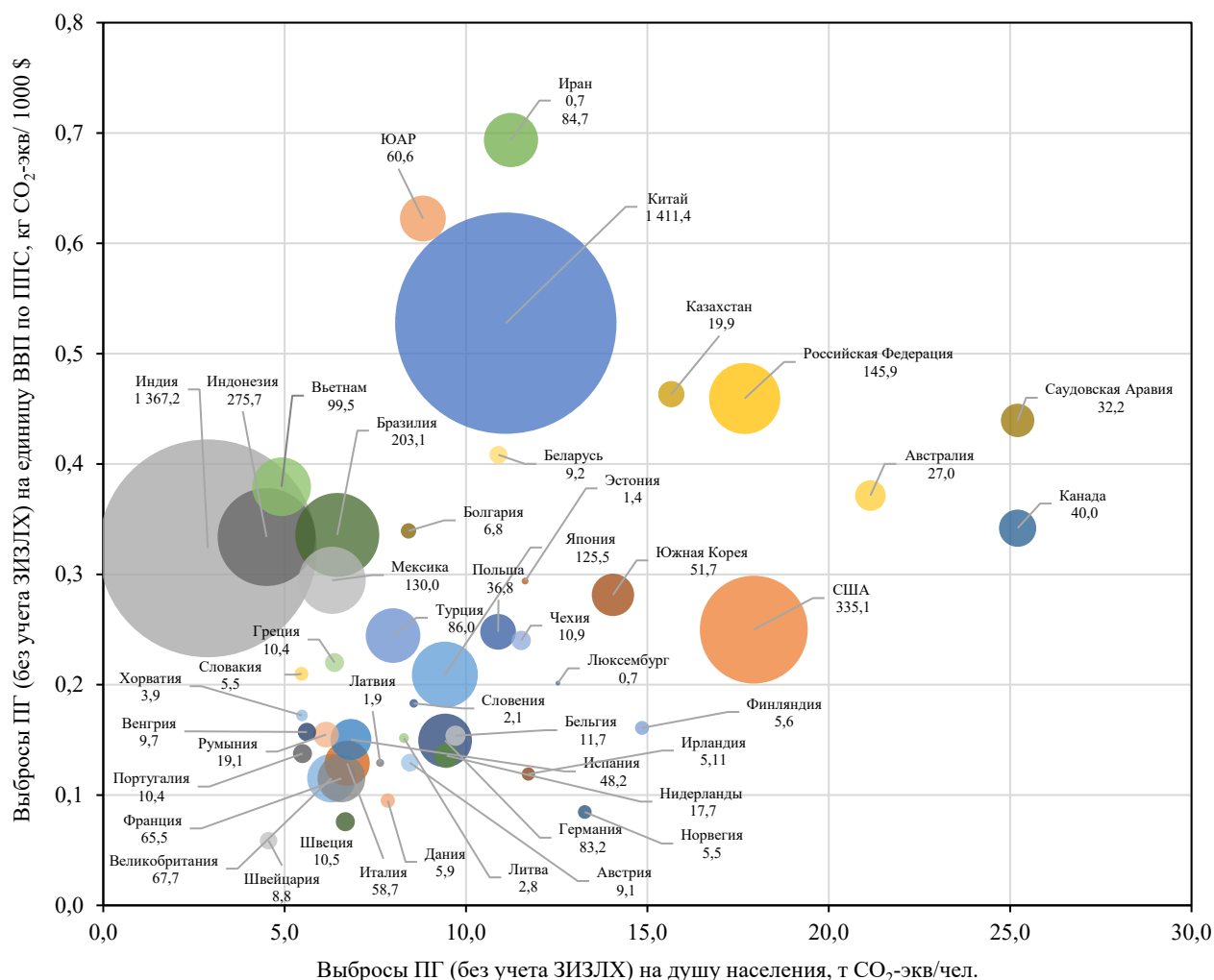


Рис. 1. Перекрестное распределение выбросов парниковых газов¹⁶ на единицу ВВП и на душу населения, 2022 год

В рамках исследования наиболее содержательно интерпретируемым очевидно оказался интегральный, совокупный набор экономико-демографических, энергетических и ресурсных, климатических признаков, поскольку отдельные блоки показателей отражали только частные аспекты различий между странами. Экономико-демографический блок преимущественно разделял страны по масштабу экономики и численности населения, климатический — по уровню абсолютных и удельных выбросов, энергетический — по структуре генерации и роли ископаемого топлива. Только совместное использование указанных групп признаков позволило выделить кластеры, различающиеся и по величине выбросов, и по причинам их формирования.

На рис. 2 представлена структура генерации по установленной мощности для 15 крупнейших эмитентов. На карте отображено значение суммарной мощности генерации в тераваттах. Для каждой страны визуализированы данные по долям тепло-, гидро-, атомных электростанций и возобновляемых источников в общем энергобалансе. Как видим, наибольшая доля во всех странах приходится на традиционную энергетику с органическим топливом. Исключения — Канада и Бразилия, где электроэнергию производят преимущественно гидроэлектростанции (ГЭС).

¹⁶ В данном случае из общего объема антропогенных выбросов газов, удерживающих тепло, исключается влияние сектора «Землепользование, изменение землепользования и лесное хозяйство» (ЗИЗЛХ).

Определено, что почти каждая четвертая тонна CO₂, выброшенная в атмосферный воздух, образована на объектах тепловой генерации при сжигании газа, угля, мазута, и это 12,5 млрд тонн CO₂ ежегодно.

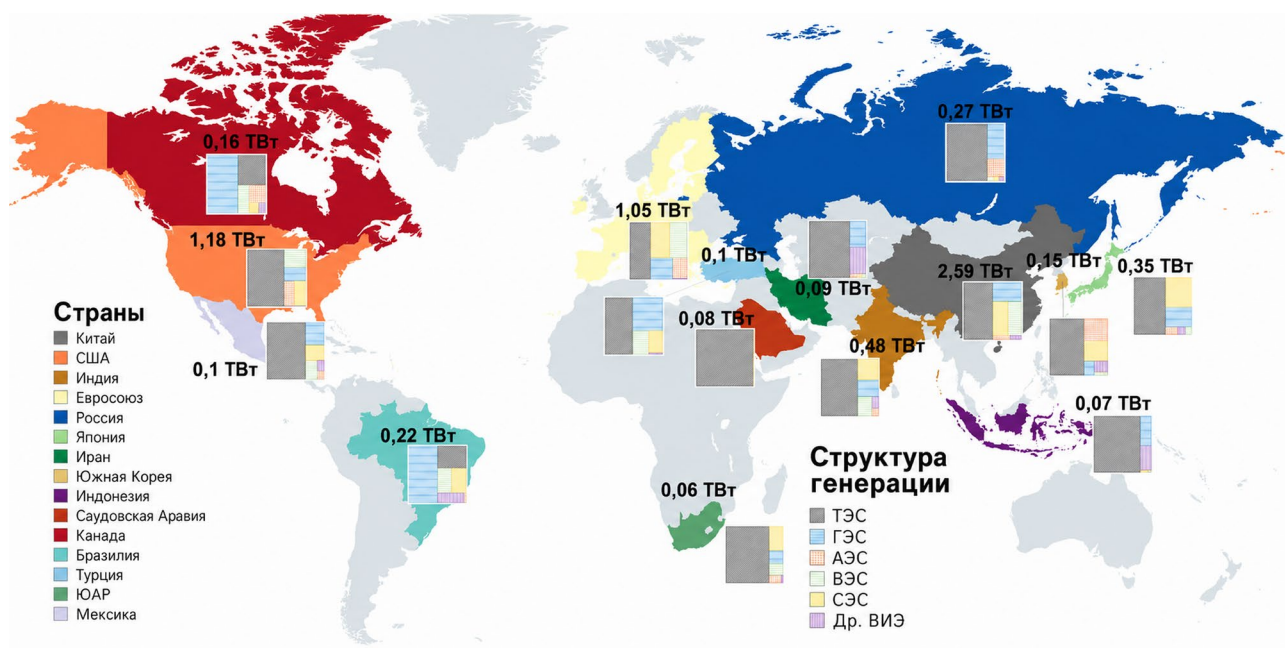


Рис. 2. Структура генерации для топ-15 эмитентов ПГ по виду и установленной мощности, 2022 год

Дендрограмма на рис. 3 — результат иерархической кластеризации по методу Уорда. После нормализации данных учитывается их дисперсия и определяются расстояния между ближайшими схожими элементами. Такой подход обеспечивает углубленный анализ производства и потребления энергоресурсов, эффективности их использования и влияния эмитентов на состояние окружающей среды по всем анализируемым показателям.

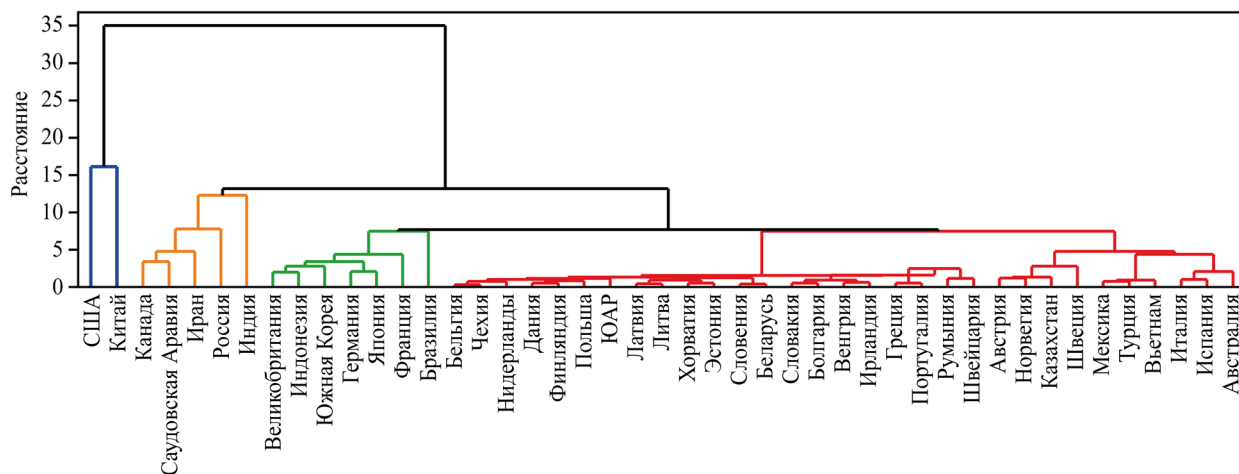


Рис. 3. Дендрограмма иерархической кластеризации стран-эмитентов ПГ по экономико-демографическим и энергетическим показателям

Алгоритм снижения размерности (*t-SNE*, рис. 4) использовался как инструмент нелинейного снижения размерности и визуализации локальной структуры данных, а окончательная интерпретация кластеров выполнялась с учетом результатов иерархической кластеризации и формальных метрик качества. Кластеры обозначены такими же цветами, как на рис. 3.

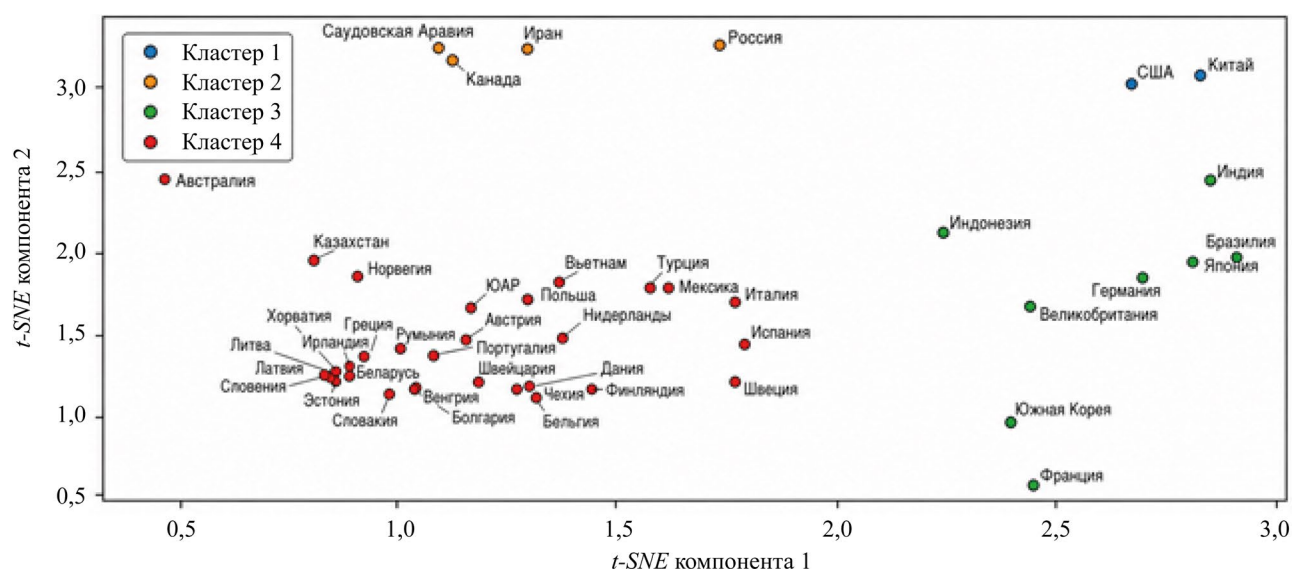


Рис. 4. Кластеризация на базе t -SNE алгоритма стран-эмитентов ПГ по экономико-демографическим и энергетическим показателям

Устойчивость полученных групп оценивалась путем сопоставления результатов иерархической кластеризации и подхода t -SNE + k -means. Кластеры считались устойчивыми в содержательном смысле, если страны с близкими энергетическими и эмиссионными профилями сохраняли принадлежность к одной группе при использовании разных алгоритмов либо формировали сопоставимые по интерпретации объединения. Совпадение основных профилей кластеров в двух подходах позволило рассматривать результат с четырьмя группами как наиболее обоснованный.

Как видим, страны разделились на четыре кластера. Такой итог получили при использовании двух подходов:

- метода локтя (оптимум при $k = 4$, где k — количество кластеров);
- коэффициента силуэта (максимум 0,62 при $k = 4$).

С точки зрения оценки качества результатов кластеризации, индекс Дэвиса — Болдина (англ. DBI) принимает максимальные значения для k , равных 4 и 3, — 0,92 и 0,89 соответственно, что указывает на сопоставимое качество разделения. Поскольку меньшее значение DBI соответствует более компактным и лучше разделенным кластерам, данный показатель сам по себе не дает однозначного преимущества варианту $k = 4$. Однако решение с четырьмя кластерами выбрано по совокупности критериев: максимуму коэффициента силуэта, результату метода локтя и более содержательной интерпретируемости кластеров (рис. 3 и 4).

На рис. 4 представлено двумерное t -SNE-отображение многомерного пространства признаков, характеризующих страны-эмитенты ПГ по экономико-демографическим, энергетическим и климатическим параметрам. Компоненты t -SNE 1 и t -SNE 2 являются условными координатами нелинейного отображения и не имеют прямой самостоятельной экономической или энергетической интерпретации. Их назначение состоит в визуализации локальной близости стран: близкое расположение точек указывает на сходство стран по совокупности нормализованных признаков, а удаленность — на различие их профилей. Полученное распределение подтверждает наличие четырех групп стран, что согласуется с результатами кластеризации и оценками оптимального числа кластеров.

Первый кластер представлен крупнейшими эмитентами — Китаем и США. Их объединяет исключительный масштаб экономики, энергопотребления и абсолютных выбросов, а также диверсифицированная генерация.

Во второй кластер вошли топливно-энергетические экспортеры — Россия, Канада, Иран и Саудовская Аравия. Их общие признаки: высокая роль добычи, производства и (или) экспорта первичных энергоресурсов, значимая доля ископаемого топлива в энергобалансе и повышенная чувствительность к переходным климатическим рискам.

Третий кластер — это группа углеродоемких промышленных и развивающихся экономик. Для них характерны растущий спрос на энергию, значимая доля промышленности и инфраструктурная инерция энергосистемы.

Четвертый кластер включает страны с более высокой энергоэффективностью, большей долей низкоуглеродной генерации и (или) прогрессивной климатической политикой.

Обсуждение. Итак, объем выбросов ПГ не может быть единственным основанием при выборе климатической стратегии. Кластерная принадлежность страны определяется совокупностью факторов: объемом экономики, численностью населения, структурой генерации, долей ископаемого топлива, ролью экспортируемых энергоресурсов, уровнем энергоэффективности и удельной углеродной нагрузкой [12]. Поэтому страны с сопоставимыми абсолютными выбросами могут относиться к разным группам по типам декарбонизационных задач. В качестве примеров можно привести снижение угольной зависимости, декарбонизация добычи и переработки, повышение энергоэффективности, устранение остаточных выбросов в секторах конечного потребления.

Интерпретация кластеров в настоящем исследовании основана не на нормативном предположении о «правильной» стратегии декарбонизации, а на выявленных структурных признаках каждой группы. Если кластер характеризуется высокой долей угольной генерации, то приоритет сокращения угольной зависимости следует непосредственно из энергетического профиля. Если кластер объединяет страны с высокой ролью добычи и экспорта углеводородов, то ключевыми становятся риски снижения внешнего спроса, углеродного регулирования импорта и технологической декарбонизации добывающего сектора. Если группа стран отличается более низкой углеродоемкостью генерации, то фокус смещается на остаточные выбросы, конечное энергопотребление и импортированный углеродный след.

Обособление Китая и США в отдельном кластере объясняется их системообразующей ролью в глобальной энергетике и климатической политике. Эти страны формируют значительную часть мирового спроса на энергию и обладают ресурсами для масштабирования низкоуглеродных технологий. Однако некорректно было бы считать эти две экономики аналогичными с точки зрения энергетики [13]. В Китае более выражена промышленно-угольная эмиссия. США характеризуются высокой энергетической насыщенностью экономики и существенным уровнем выбросов на душу населения. То есть даже внутри одного кластера нужно учитывать различия между технологическими и поведенческими источниками углеродной нагрузки.

В таблице 2 обобщенно описаны кластеры, перечисляются наиболее значимые переходные климатические риски, то есть экономические и финансовые угрозы, связанные с глобальным переходом к низкоуглеродной экономике. Здесь же — направления адаптации стратегий декарбонизации.

Таблица 2

Профили кластеров и направления адаптации стратегий декарбонизации

Кластер	Страны	Ключевые признаки	Переходные климатические риски	Приоритетные решения по декарбонизации
1. Крупнейшие эмитенты	Китай, США	– максимальный масштаб экономики, энергопотребления и абсолютных выбросов; – диверсифицированная энергетика	– высокая инерционность энергетики; – социально-экономические издержки ускоренного энергоперехода	– сокращение угольной генерации; – электрификация и модернизация сетей; – CCUS для трудно декарбонизируемых отраслей
2. Ресурсно-экспортные	Россия, Канада, Иран, Саудовская Аравия	– высокая роль добычи и энергоэкспорта; – значимая доля ископаемого топлива; – зависимость от внешнего спроса на углеводороды	– углеродное регулирование импортеров; – снижение спроса на первичные энергоресурсы	– снижение метановых утечек; – декарбонизация добычи; – диверсификация экспорта
3. Углеродоемкие промышленные и развивающиеся	Япония, Германия, Великобритания, Южная Корея, Франция, Индия, Бразилия, Индонезия	– рост энергопотребления; – значимая доля промышленности	– закрепление высокоуглеродной траектории развития; – дефицит инвестиций; – технологическая зависимость	– поэтапный вывод неэффективной угольной генерации; – энергоэффективность промышленности; – финансирование климатических программ
4. Энергоэффективные и относительно низкоуглеродные	ЕС (кроме Франции, Германии), Австралия, Норвегия, Швейцария, ЮАР, Турция и др.	– низкая углеродоемкость ВВП; – развитая институциональная климатическая политика; – значимая доля низкоуглеродной генерации	– остаточные выбросы транспорта, зданий и промышленности; – высокий углеродный след, связанный с импортом	– глубокая электрификация конечного потребления; – учет потребительского углеродного следа; – снижение импортированных выбросов

Для России, Канады, Ирана и Саудовской Аравии (кластер ресурсно-экспортных экономик) декарбонизация не сводится к снижению выбросов внутри страны. Она затрагивает структуру внешней торговли, устойчивость экспортных доходов и возможность адаптации к углеродному регулированию торговых партнеров [14]. Поэтому для данного профиля наиболее важны технологии снижения выбросов в добыче и переработке, CCUS и формирование новых экспортных направлений низкоуглеродной продукции. Все это имеет особое значение с точки зрения переходных климатических рисков.

Для индустриальных и развивающихся экономик (третий кластер) декарбонизация должна согласовываться с ростом спроса на энергию и расширением промышленной базы. Перенос подходов развитых стран на данный кластер может привести к социально-экономическим издержкам и замедлению развития. Из этого следует вывод о необходимости последовательно модернизировать генерацию, повышать энергоэффективность промышленности, развивать сетевую инфраструктуру [15].

Для развитых и относительно низкоуглеродных экономик ключевая задача смещается к остаточным и трудноустраняемым выбросам. Наличие изначально более развитой нормативной базы и высокой доли низкоуглеродной генерации не устраняет проблему выбросов транспорта, зданий и потребительского углеродного следа. В этой группе возрастает значение таких решений, как электрификация конечного потребления, гибкость энергосистемы и снижение углеродного следа импортируемой продукции [16].

Сопоставление полученных результатов с имеющимися исследованиями по сценариям низкоуглеродного развития, мировой энергетической статистике и оценке углеродоемкости экономики показывает, что описанный в данной статье кластерный подход не заменяет, а дополняет сценарное моделирование.

Сценарные исследования применяются для оценки возможных траекторий изменения энергобаланса и выбросов. Кластеризация позволяет определить страны с аналогичными исходными условиями и, соответственно, совпадающими или близкими переходными климатическими рисками. В отличие от индикаторного ранжирования, основанного на одном показателе, многомерная типологизация обеспечивает одновременный учет масштаба экономики, структуры генерации, ресурсной базы и углеродоемкости.

Ограничения исследования обусловлены несколькими причинами. Во-первых, национальные статистические системы различаются по полноте и методикам учета энергетических и климатических показателей. Во-вторых, результаты кластеризации чувствительны к составу включенных признаков и способу их нормализации. В-третьих, *t-SNE* использовался преимущественно как инструмент визуализации нелинейной структуры данных и не должен рассматриваться как самостоятельное доказательство устойчивости кластеров. Поэтому при интерпретации результатов сопоставлялись несколько методов кластеризации и содержательного анализа энергетических и эмиссионных профилей стран.

С практической точки зрения полученные результаты позволяют предварительно группировать страны по сходству предпосылок к декарбонизации. Так, для крупнейших эмитентов ключевые факторы — масштаб энергосистемы и абсолютных выбросов. Для ресурсно-экспортных экономик — зависимость от добычи, переработки и экспорта ископаемых энергоресурсов. Для индустриальных и развивающихся — сочетание роста спроса на энергию и высокой роли углеродоемкой генерации. Для относительно низкоуглеродных экономик главные проблемы связаны с остаточными выбросами и углеродным следом конечного потребления. Таким образом, направления декарбонизации должны рассматриваться не как общие рекомендации, а как меры, обусловленные профилем соответствующего кластера.

Заключение. Сформирована база экономико-демографических, энергетических и климатических показателей ключевых стран-эмитентов парниковых газов. Для стандартизации признаков и кластеризации стран применили иерархическую кластеризацию методом Уорда и комбинированный подход *t-SNE + k-means*. Наиболее содержательно интерпретируется вариант с четырьмя кластерами. В этом случае отражаются различия между странами:

- крупнейшими эмитентами ПГ,
- ресурсно-экспортными,
- углеродоемкими индустриальными и развивающимися,
- относительно энергоэффективными и низкоуглеродными.

Научная значимость исследования заключается в переходе от одномерного ранжирования стран по объему выбросов к многомерной типологизации эмитентов с учетом экономико-демографических, энергетических и климатических признаков. К тому же предложенная кластеризация может быть базой для предварительного выбора направлений декарбонизации, оценки переходных климатических рисков, и в этом — прикладная ценность работы.

Результаты кластеризации не следует рассматривать как универсальный набор рекомендаций. Тем не менее их можно задействовать для дальнейшего анализа сходств и различий ключевых стран-эмитентов, выявления оптимальных технологий и законодательных мер, необходимых для снижения эмиссии ПГ, а также для оценки эффективности климатических стратегий декарбонизации.

Список литературы / References

1. Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г. Перспективы достижения углеродной нейтральности экономически развитыми странами. *Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки*. 2024;517(1):71–80. <https://doi.org/10.31857/S2686740024040116>
- Klimenko VV, Klimenko AV, Tereshin AG. Prospects for Achieving Carbon Neutrality by Economically Developed Countries. *Doklady Physics*. 2024;517(1):71–80. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S2686740024040116>
2. Сухарева М.А., Ленков И.Н., Путой Ч. Углеродная нейтральность: перспективы развития и влияние на мировую экономику. *Вестник Московского университета. Серия 21. Управление (государство и общество)*. 2022;3:101–121. URL: <http://vestnik21msu.ru/articles/article/7050/> (дата обращения 11.06.2026).

- Sukhareva MA, Lenkov IN, Puyu Zh. Carbon Neutrality: Prospects for Development and Impact on the Global Economy. *Lomonosov Public Administration Journal. Series 21*. 2022;3:101–121. (In Russ.) URL: <http://vestnik21msu.ru/articles/article/7050/> (accessed 11.06.2026).
3. Лотникова Д.Ю. «Зеленая трансформация» России в рамках глобального тренда на декарбонизацию. *Научные труды КубГТУ*. 2021;3:62–71. URL: <https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0080/3961.pdf> (дата обращения 11.06.2026).
- Lotnikova DYU. Russia's "Green Transformation" as Part of the Global Decarbonisation Trend. *Scientific Works of KubSTU*. 2021;3:62–71. (In Russ.) URL: <https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0080/3961.pdf> (accessed 11.06.2026).
4. Potashnikov V, Golub A, Brody M, Lugovoy O. Decarbonizing Russia: Leapfrogging from Fossil Fuel to Hydrogen. *Energies*. 2022;15(3):683. <https://doi.org/10.3390/en15030683>
5. Порфирьев Б.Н., Шилов А.А., Колпаков А.Ю. Стратегия низкоуглеродного развития: перспективы для экономики России. *Мировая экономика и международные отношения*. 2020;64(9):15–25. <https://doi.org/10.20542/0131-2227-2020-64-9-15-25>
- Porfir'ev BN, Shirov AA, Kolpakov AYU. Low-Carbon Strategy Development: Prospects for the Russian Economy. *World Economy and International Relations*. 2020;64(9):15–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.20542/0131-2227-2020-64-9-15-25>
6. Башмаков И.А. Стратегия низкоуглеродного развития российской экономики. *Вопросы экономики*. 2020;7:51–74. <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2020-7-51-74>
- Bashmakov IA. Russian Low Carbon Development Strategy. *Voprosy Ekonomiki*. 2020;7:51–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2020-7-51-74>
7. Ильясов Р.Х., Плотноков В.А. Макрорегиональный анализ углеродоемкости экономики. *Управленческое консультирование*. 2023;175(7):42–52. <https://doi.org/10.22394/1726-1139-2023-7-42-52>
- Ilyasov RKh, Plotnikov VA. Macro-Regional Analysis of the Carbon Intensity of the Economy. *Administrative Consulting*. 2023;175(7):42–52. (In Russ.) <https://doi.org/10.22394/1726-1139-2023-7-42-52>
8. Strielkowski W, Chygryn O, Drozd S, Koibichuk V. Sustainable Transformation of Energy Sector: Cluster Analysis for the Sustainable Development Strategies of Selected European Countries. *Heliyon*. 2024;19(10):e38930. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38930>
9. Локионов О.А., Максимов Д.О. База данных экономико-демографических, энергетических и климатических показателей стран-эмитентов парниковых газов. RU2024624471. 2024. Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Бюл. № 10.
- Loktionov OA, Maksimov DO. Database of Economic, Demographic, Energy and Climatic Indicators of Greenhouse Gas Emitting Countries. RU2024624471. 2024. Federal Service for Intellectual Property. Bul. No. 10. (In Russ.)
10. Панферова Е.В., Матюшин Р.А. Сравнительная оценка методов кластеризации в работе с большими данными. *Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика*. 2024;65(2):61–67. URL: <https://press.psu.ru/index.php/Math/article/view/9054> (дата обращения 11.06.2026).
- Panferova EV, Matushin RA. Comparative Evaluation of Clustering Methods in Working with Big Data. *Bulletin of Perm University. Series: Mathematics. Mechanics. Computer Science*. 2024;65(2):61–67. (In Russ.) URL: <https://press.psu.ru/index.php/Math/article/view/9054> (accessed 11.06.2026).
11. Sangwon Jung, Dagobert T, Morel J-M, Facciolo G. A Review of t-SNE. *Image Processing On Line*. 2024;14:250–270. <https://doi.org/10.5201/ipol.2024.528>
12. Lamb WF, Grubb M, Diluiso F, Minx JC. Countries with Sustained Greenhouse Gas Emissions Reductions: An Analysis of Trends and Progress by Sector. *Climate Policy*. 2022;22(1):1–17. <https://doi.org/10.1080/14693062.2021.1990831>
13. Hou MZ, Luo Jiashun, Huang Liangchao, Beck H-P, Mehmood Faisal, Wang Qichen, et al. Strategies toward Carbon Neutrality: Comparative Analysis of China, USA, and Germany. *Carbon Neutral Systems*. 2025;1:3. <https://doi.org/10.1007/s44438-025-00003-1>
14. Salimi Mohsen, Amidpour Majid. The Impact of Energy Transition on the Geopolitical Importance of Oil-Exporting Countries. *World*. 2022;3(3):607–618. <https://doi.org/10.3390/world3030033>
15. Doğan Ebru. Electricity Capacity Convergence in G20 Countries: New Findings from New Tests. *Sustainability*. 2024;16(19):8411. <https://doi.org/10.3390/su16198411>
16. Zhen Wang, Haoben Yan, Xue Gao, Qiaomei Liang, Zhifu Mi, Lancui Liu. Have Consumption-Based CO₂ Emissions in Developed Countries Peaked? *Energy Policy*. 2024;184(3):113894. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113894>

Об авторах:

Олег Александрович Локтионов, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной экологии и охраны труда Национального исследовательского университета «МЭИ» (111250, Российская Федерация, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), loktionovoa@mpei.ru

Даниил Олегович Максимов, студент кафедры инженерной экологии и охраны труда Национального исследовательского университета «МЭИ» (111250, Российская Федерация, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), maximovdo@mpei.ru

Михаил Андреевич Забелин, аспирант, ассистент кафедры инженерной экологии и охраны труда Национального исследовательского университета «МЭИ» (111250, Российская Федерация, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), zabelinma@mpei.ru

Ирина Андреевна Белошицкая, студент кафедры инженерной экологии и охраны труда Национального исследовательского университета «МЭИ» (111250, Российская Федерация, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1) [SPIN-код](#), [ORCID](#), beloshitskayaia@mpei.ru

Заявленный вклад авторов:

О.А. Локтионов: разработка концепции, научное руководство.

Д.О. Максимов: оценка экономико-демографических показателей стран-эмитентов парниковых газов, обзор исследований и прогнозов по потреблению первичных энергоресурсов на кратко- и среднесрочную перспективу.

М.А. Забелин: формирование кластерных групп ключевых стран-эмитентов в разрезе экономико-демографических и энергетических показателей.

И.А. Белошицкая: оценка фактической структуры потребления и производства энергоресурсов в России и мире, энергетических показателей стран-эмитентов.

About the Authors:

Oleg A. Loktionov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Environmental Engineering and Occupational Safety, National Research University “MPEI” (14, Krasnokazarmennaya Str., Moscow, 111250, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), loktionovoa@mpei.ru

Daniil O. Maksimov, Student of the Department of Environmental Engineering and Occupational Safety, National Research University “MPEI” (14, Krasnokazarmennaya Str., Moscow, 111250, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), maximovdo@mpei.ru

Mikhail A. Zabelin, Post-Graduate Student, Assistant Professor of the Department of Environmental Engineering and Occupational Safety, National Research University “MPEI” (14, Krasnokazarmennaya Str., Moscow, 111250, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), zabelinma@mpei.ru

Irina A. Beloshitskaya, Student of the Department of Engineering Ecology and Occupational Safety, NRU “MPEI” (14, Krasnokazarmennaya Str., Moscow, 111250, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), beloshitskayaia@mpei.ru

Claimed Contributorship:

OA Loktionov: conceptualization, supervision.

DO Maksimov: assessment of economic and demographic indicators of greenhouse gas-emitting countries, review of studies and forecasts on primary energy consumption for the short and medium term.

MA Zabelin: formation of cluster groups of key emitting countries in terms of economic, demographic, and energy indicators.

IA Beloshitskaya: assessment of the actual structure of energy consumption and production in Russia and the world, as well as the energy indicators of the issuing countries.

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 01.06.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 22.06.2026

Принята к публикации / Accepted 06.07.2026

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 62.78

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-3-219-231>

Система идентификации состояния рельсовых путей грузоподъемных кранов

В.В. Егельский , Н.Н. Николаев , Е.В. Егельская ✉,

А.А. Короткий , Л.А. Терновской

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

✉ egelskaya72@mail.ru

EDN: JOZTEV

Аннотация

Введение. Обследование крановых путей мостовых кранов в производственных цехах и на складах — сложная и небезопасная задача. Риск для специалистов связан с большой высотой, на которой расположены пути, а также с тем, что проходные галереи вдоль них часто отсутствуют. При этом стандартный визуально-измерительный контроль отличается низкой скоростью обследования. В научной литературе широко представлены исследования, в которых рассматриваются возможности искусственного интеллекта (ИИ) для обеспечения производственной безопасности: методы контроля производственных рисков и предотвращения аварий, взаимосвязь аварийности с компетенциями машинистов кранов, распознавание дефектов съемных грузозахватных приспособлений средствами компьютерного зрения, а также дистанционный мониторинг безопасности кранов по данным видео с IP-камер. Однако эти решения не касаются обследования самих крановых путей, которые обладают рядом специфических особенностей — прежде всего значительной протяженностью (нередко до 200 метров и более). Применение ИИ здесь требует видеоаналитического контроля по всей длине пути и обучения нейросети распознаванию специфических местных дефектов и отклонений геометрии, чего существующие методы не обеспечивают. Сегодня такое обследование выполняется в форме визуально-измерительного контроля с непосредственным осмотром и плано-высотной съемкой тахеометрами и теодолитами. Эти методы точны, но трудоемки и медленны. Таким образом, существует запрос на применение ИИ для идентификации неисправностей крановых путей с сохранением точности при повышении безопасности и скорости. Цель данного исследования — разработка метода дистанционного обследования крановых путей мостовых кранов, расположенных на высоте в производственных помещениях, позволяющего минимизировать воздействие опасных и вредных производственных факторов на персонал при сохранении точности, скорости и достоверности получаемых результатов.

Материалы и методы. В качестве базовой информации были использованы данные о дефектах крановых путей, полученные в ходе обследования их на промышленных предприятиях. Методическая часть по выявлению дефектов крановых путей основана на ГОСТ Р 56944–2016¹. Нейронные сети компьютерного зрения обучали на основе открытых библиотек для языка Python. Для распознавания дефектов использовалась модернизированная предобученная нейронная сеть YOLOv8.

Результаты исследования. Разработан метод дистанционной дефектации надземных крановых путей мостовых кранов с применением беспилотного летательного аппарата авторской конструкции (квадрокоптер с защитным каркасом, оснащённый лидаром Livox MID-40, камерой глубины Orbbec Gemini 2, RGB-камерой 4K и системой позиционирования DWM1000 с поддержкой TWR и TDOA). На основе данных обследования 352 надземных крановых путей общей протяжённостью около 14 километров, полученных в 2024 году, была обучена модернизированная нейронная сеть компьютерного зрения YOLOv8. В результате было создано целостное трёхмерное облако точек, охватывающее рельсы, подкрановые балки и опоры с привязкой к створам и осям колонн. Построенная трёхмерная модель позволила в автоматизированном режиме выявить и классифициро-

¹ ГОСТ Р 56944–2016 «Краны грузоподъемные. Пути рельсовые крановые надземные. Общие технические условия» (утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 1 июня 2016 года № 463-ст). URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/8fe/4293754222.pdf?ysclid=mnsmrn94qrk671517049> (дата обращения: 10.04.2026).

вать локальные дефекты и оценить их размеры с точностью до одного миллиметра. Автоматизированная оценка геометрии показала, что отклонения отметок рельсов в рассматриваемой модели не превышают допустимые по ГОСТ Р 56944–2016² значения (40 миллиметров в одном сечении и 10 миллиметров на соседних колоннах), что подтвердило работоспособность метода.

Обсуждение. Полученные результаты свидетельствуют о достижении поставленной авторами цели — о разработке метода дистанционного обследования крановых путей мостовых кранов. Этому способствовал значительный объём проведённых обследований, обеспечивший разнообразную выборку дефектов для обучения нейронных сетей. Сравнение с ранее проведёнными исследованиями показало уникальность предложенного подхода к обследованию путей мостовых кранов: уже описанные методы на основе искусственного интеллекта и БПЛА применялись для контроля персонала, оценки съёмных грузозахватных приспособлений, стальных канатов или для обследования башенных кранов на открытом воздухе, однако ни один из них не был пригоден для выявления локальных дефектов надземных крановых путей внутри производственных помещений. Основным ограничением разработанного метода является время полёта БПЛА (не более 20 минут), обусловленное малой ёмкостью аккумуляторов, которую без повышения предельного размера аппарата (0,5 метра) невозможно увеличить в стеснённых условиях закрытых помещений. Результаты разработки нового метода интерпретируются как положительные: он обеспечивает осмотр путей по всей длине с близкого расстояния, построение 3D-модели методом фотограмметрии позволяет оценить размеры дефектов и снизить трудоёмкость и продолжительность обследования не менее чем в два раза. Все это делает целесообразным его дальнейшее развитие и внедрение в практику.

Заключение. Основным итогом исследования стал разработанный метод дистанционного обследования крановых путей мостовых кранов, расположенных на высоте в производственных помещениях. В ходе проделанной работы были обучены нейронные сети поиска дефектов и создан алгоритм обследования с построением трёхмерной модели, обеспечивающей автоматизированную оценку геометрических отклонений рельсов в продольной и поперечной плоскостях и выявление локальных дефектов. Ключевое достоинство метода — обеспечение безопасности экспертов за счёт исключения подъёма на высоту, а также возможность обследования труднодоступных участков и обнаружения ранее незаметных дефектов, что снижает вероятность возникновения впоследствии аварийных ситуаций. Дальнейшие исследования в этом плане будут направлены на дополнение системы функцией автоматической идентификации состояния металлоконструкций самих грузоподъёмных кранов и их возможных дефектов.

Ключевые слова: мостовой кран, рельсовый путь, нейронная сеть, мониторинг безопасности, беспилотный летательный аппарат

Для цитирования. Егельский В.В., Николаев Н.Н., Егельская Е.В., Короткий А.А., Терновской Л.А. Система идентификации состояния рельсовых путей грузоподъёмных кранов. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2026;10(3):219–231. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-3-219-231>

Original Empirical Research

System for Identifying the Condition of Hoisting Crane Runways

Vladislav V. Egelsky^{ID}, Nikolai N. Nikolaev^{ID}, Elena V. Egelskaya^{ID}✉, Anatoly A. Korotkiy^{ID},
Leonid A. Ternovskoi^{ID}

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

✉ egelskaya72@mail.ru

Abstract

Introduction. Inspecting the overhead crane runways in production workshops and warehouses is a challenging and dangerous task. The risks for specialists are associated with the high altitude at which the runways are located and the lack of walkways along them. At the same time, standard visual and dimensional inspection is characterized by a low inspection speed. The scientific literature contains numerous studies on the potential of artificial intelligence (AI) to ensure occupational safety: methods for monitoring occupational risks and preventing accidents, the relationship between accident rates and the competencies of crane operators, the detection of defects in removable load-handling devices using computer vision tools, as well as remote monitoring of crane safety based on video data from IP cameras. However, these solutions do not address the inspection of crane runways, which have specific features, primarily their

² ГОСТ Р 56944–2016 «Краны грузоподъемные. Пути рельсовые крановые надземные. Общие технические условия» (утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 1 июня 2016 года № 463-ст). С. 2. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/8fe/4293754222.pdf?ysclid=mnsrn94qrk671517049> (дата обращения: 10.04.2026).

considerable length (often up to 200 meters or more). The application of AI requires video-analytical monitoring along the entire length of the runway and training a neural network to recognize local defects and geometric deviations, which existing methods do not provide. Today, crane runway inspection is conducted through visual and dimensional control methods, including direct inspection and surveying using total stations and theodolites. While these methods are accurate, they are labor-intensive and time-consuming. Therefore, there is a need for the use of AI to improve safety and speed while maintaining accuracy in identifying faults in crane runways. The aim of this research is to develop a method for remote inspection of the overhead crane runways located at height in industrial facilities. This will help minimize the exposure of workers to hazardous and harmful working conditions while maintaining accuracy, speed, and reliability of the inspection results.

Materials and Methods. Data on crane runway defects collected during inspections at industrial facilities was used as the basis for the study. The methodology for identifying defects in crane runways was based on GOST R 56944–2016³. Computer vision neural networks were trained using open libraries for Python language. A modernized pre-trained YOLOv8 neural network was used to detect defects.

Results. A method for remote detection of defects on overhead crane runways was developed using an unmanned aerial vehicle designed by the authors (a quadcopter with a protective frame, equipped with a Livox MID-40 lidar, an Orbbec Gemini 2 depth camera, a 4K RGB camera, and a DWM1000 positioning system supporting TWR and TDOA). Based on survey data collected in 2024 from 352 overhead cranes with a total runway length of approximately 14 kilometers, a modernized YOLOv8 neural network for computer vision was trained. This resulted in the creation of a complete three-dimensional point cloud that covered the runways, crane beams and supports, as well as reference to column lines and centers. The three-dimensional model allowed for the automatic identification and classification of local defects, as well as the estimation of their sizes with accuracy of one millimeter. Automated geometry assessment showed that the deviations in the runway markings in the model in question did not exceed the permitted values according to GOST R 56944–2016⁴ (40 millimeters in one section and 10 millimeters on adjacent columns), which confirmed the effectiveness of the method.

Discussion. The results obtained indicate that the authors' goal has been achieved — the development of a method for remote inspection of overhead crane runways. This was made possible by conducting a significant number of surveys, which provided a diverse range of defects for training neural networks. A comparison with previous studies has shown the uniqueness of the proposed approach to inspecting overhead crane runways. Methods based on artificial intelligence and unmanned aerial vehicles (UAVs) have previously been used to monitor personnel, assess removable lifting attachments, and inspect tower cranes outdoors. However, these methods were not suitable for detecting local defects in overhead crane runways inside production facilities. The main limitation of the developed method was the flight time of the UAV (no more than 20 minutes), which was due to the low battery capacity. This capacity could not be increased without increasing the maximum size of the device (0.5 meters) in the confined conditions of enclosed spaces. The new method's results were positive, as it enabled inspection of tracks along their entire length from a close distance. By building a 3D model using photogrammetry, it was possible to assess the size of defects and reduce labor intensity and duration of the survey by at least half. These benefits made its further development and practical implementation worthwhile.

Conclusion. The main outcome of the study was the development of a method for remote inspection of overhead crane runways located at height in industrial facilities. During the research, neural networks were trained to detect defects, and an algorithm was created for inspection. This involved creating a three-dimensional model that allowed for automated assessment of geometric deviations in the runways in both longitudinal and transverse planes, as well as the identification of local defects. The key benefit of this method was that it eliminated the need for experts to climb to heights, ensuring their safety. Additionally, it allowed for the inspection of hard-to-reach areas and the detection of previously invisible defects, reducing the likelihood of future emergency situations. Further research in this field will focus on improving the system's ability to automatically identify the condition of load-bearing metal structures and possible defects in cranes.

Keywords: overhead travelling crane, runway, neural network, safety monitoring, unmanned aerial vehicle

For Citation. Egelsky VV, Nikolaev NN, Egelskaya EV, Korotkiy AA, Ternovskoi LA. System for Identifying the Condition of Hoisting Crane Runways. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(3):219–231. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-3-219-231>

³ GOST R 56944–2016 "Lifting Cranes. Overhead Crane Rail Tracks. General Technical Requirements" (approved and put into effect by Order No. 463-st of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated 1 June 2016). URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/8fe/4293754222.pdf?ysclid=mnsrn94qrk671517049> (accessed: 10.04.2026).

⁴ Ibid. P.2

Введение. Обследование крановых путей мостовых кранов в производственных цехах и складских помещениях является сложной задачей, сопряженной с риском для экспертов и специалистов по диагностике и обследованию подъемных сооружений. В настоящее время обследование крановых путей мостовых кранов проводится согласно приказу Ростехнадзора от 26.11.2020 № 461 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения»⁵ в форме визуально-измерительного контроля путем непосредственного осмотра по всей их длине, а также в форме контроля геометрических параметров в ходе плано-высотной съемки при помощи специальных приборов — тахеометров и теодолитов. Опасность при таком обследовании обусловлена нахождением крановых путей на значительной высоте, как правило, не менее 3–5 метров. В отдельных случаях высота их может превышать 20 метров.

Мостовые краны по способу опоры на крановые пути бывают двух типов: опорные и подвесные. В опорной конструкции на подкрановую балку (чаще всего двутавровую) прикреплены с помощью сварки или болтовых соединений рельсы, которые и подвергаются износу более всего. При установке кранов большой грузоподъемности для обследования опорных крановых путей могут быть организованы проходные галереи. Однако при грузоподъемности менее 10 тонн проходные галереи могут отсутствовать. При подвесной конструкции кранов (когда крановые пути выполнены в виде двутавровых балок) проходных галерей тоже, как правило, не бывает. В этом случае осмотр проводится с ремонтных площадок, а также с помощью передвижных вышек-тур. Это многократно увеличивает трудоемкость и продолжительность обследования, а также риски падения с высоты. Следовательно, существует потребность в разработке методов обследования, которые не требуют подъема специалистов и экспертов на высоту и обеспечивают при этом точность обнаружения и оценки дефектов. Кроме того, существует задача разработки более быстрых и эффективных методов контроля, чем непосредственный визуальный осмотр.

В научной литературе уже описаны возможности искусственного интеллекта для обеспечения производственной безопасности. Известна цифровая платформа видеоконтроля [1], которая осуществляет круглосуточное наблюдение за эксплуатацией кранов, за работами при погрузке и разгрузке, а также контролирует использование рабочими специальной одежды и средств индивидуальной защиты, нахождение работников в опасной зоне при перемещении грузов, зоны рельсовых путей (отсутствие или наличие посторонних лиц, оборудования), состояние съемных грузозахватных приспособлений (СГП), а также позиционирование перемещаемого груза и соблюдение правил складирования. В основе системы лежит видеоаналитика, полученная с IP-камер и обработанная с помощью искусственного интеллекта, переданная потом ответственным специалистам и руководителям. Следует отметить достоинства данного метода, позволяющего осуществлять многомерный контроль за работой кранов, действиями и экипировкой персонала. Данный метод основан на видеоданных от стационарно установленных IP-камер, каждая из которых охватывает достаточно большой сектор обзора (в [1] не указан точный размер), и это позволяет осуществлять заложенные в данном методе функции. Однако он неприменим для крановых путей мостовых кранов, так как для выявления местных дефектов видео должно охватывать всю длину путей, иметь высокое разрешение, при этом съемка должна осуществляться в стереоформате с получением данных о глубине всей конструкции и дефектах.

Разработан и применяется метод оценки СГП на основе алгоритмов компьютерного зрения, обученных с помощью платформы RoboFlow [2]. Метод позволяет оценить состояние СГП, расположенного на стенде хранения, в результате обработки фото- и видеоматериалов, получаемых веб-камерой. Ограничение данного метода — он применим только для СГП. Здесь веб-камера устанавливается стационарно на специальном стенде для хранения СГП, то есть не может получать данные на значительном расстоянии от стенда. При этом обучение нейронной сети было проведено на дефектах, относящихся исключительно к СГП. Следовательно, данный метод не может быть применен для крановых путей мостовых кранов.

В зарубежных исследованиях [3] нейронные сети компьютерного зрения на базе предобученной модели YOLOv8 [4] и комплексного анализа данных большой языковой модели GPT-3.5 Turbo [5] применялись для организации безопасной работы башенных кранов. Авторами была разработана специализированная база знаний о безопасности, которая затем была сопоставлена с GPT-3.5, позволяющей рассуждать о безопасности в контексте. Предложенная в работе [6] модель выдает практические рекомендации о действиях по повышению безопасности при эксплуатации башенных кранов в высокорисковой строительной отрасли. Авторы [7] утверждают, что компьютерное зрение может обеспечивать пространственную осведомленность в режиме реального времени, динамически определяя положение работников, перемещение оборудования и близость к опасным

⁵ Приказ Ростехнадзора от 26.11.2020 № 461 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_373321/ (дата обращения: 14.07.2026).

зонам. Положительной стороной данного исследования является акцент на безопасности персонала и рекомендациях по дальнейшему повышению ее средствами ИИ. Но компьютерное зрение охватывает участки рабочей зоны крана, без детализации возможных локальных дефектов конструкции, что не позволяет применять данный метод для выявления дефектов крановых путей мостовых кранов.

Известно, что беспилотные летательные аппараты (БПЛА) проводят визуальный осмотр труднодоступных участков конструкции башенных кранов [8]. Это дает возможность выявлять дефекты и повреждения, предотвращать аварии. При всех достоинствах данного метода обследования нельзя не отметить, что БПЛА, используемые в данном случае, предназначены только для использования на открытом воздухе, поскольку их позиционирование основано на протоколах GPS-навигации. Крановые пути мостовых кранов расположены, как правило, внутри помещений (цехов). Следовательно, данный метод невозможно применять для их обследования.

Авторы [9] используют методы компьютерного зрения для определения степени износа деталей, коррозии и остаточного ресурса машин.

Известны исследования об интегральной оценке риска эксплуатации стальных канатов при помощи технологий компьютерного зрения [10]. На основе анализа возможных дефектов стальных канатов [11] была обучена нейросетевая модель компьютерного зрения [12] и создана интеллектуальная система поддержки принятия решений (ИСППР — IDSS [13]), использующая методы искусственного интеллекта. Данная разработка обладает рядом достоинств, и ее принципы могут быть использованы для разработки методов обследования крановых путей мостовых кранов. В ходе этой разработки была создана база данных о дефектах канатов путем их искусственного нанесения на 1500 отрезков каната с последующим протягиванием под камерами на горизонтально-фрезерном станке. Продукт, созданный в результате этой работы, представляет собой стационарное устройство, охватывающее канаты лифта (или один канат канатной дороги) с тремя веб-камерами и источником света внутри устройства. Канаты перемещаются внутри устройства под непрерывным всесторонним обзором камер. Для обследования крановых путей мостовых кранов подобный принцип работы не пригоден.

Существует ряд БПЛА, разработанных целенаправленно для работы в помещениях и замкнутых пространствах [14]. Они могут оснащаться камерами различных типов и спектральных диапазонов работы, а также лидарами для создания облака точек обследуемых объектов [15]. Положительное свойство данных БПЛА — независимость от GPS-навигации. Однако на текущий момент методы на основе данных БПЛА применяются для обследования труднодоступных замкнутых пространств, например, заблокированных участков шахт или завалов разрушенных зданий, для корректировки спасательных операций. Применение искусственного интеллекта для автоматизированного распознавания дефектов крановых путей мостовых кранов в данных исследованиях не затрагивается. Но некоторые идеи могут быть использованы при разработке метода обследования крановых путей мостовых кранов.

Анализ опубликованных результатов подобных исследований показал наличие пробела в научном знании — отсутствие метода обследования, применимого к крановым путям, расположенным на высоте внутри производственных помещений. Такой метод должен выявлять дефекты крановых путей с достаточно высокими точностью и скоростью обследования при обеспечении безопасности персонала. Этот метод может быть основан на интеграции научных знаний, изложенных в анализе уже проведенных исследований, с добавлением уникальных и необходимых компонентов.

Цель данного исследования — разработать метод дистанционного обследования крановых путей мостовых кранов, расположенных на высоте в производственных помещениях, который позволит минимизировать воздействие опасных и вредных производственных факторов на технический персонал и обеспечит точность, скорость и достоверность полученных результатов.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Создать трехмерное облако точек, охватывающее рельсы, подкрановые балки, опоры, с фиксацией мест расположения опор подкрановой балки по осям обоих рельсов (далее — рельс оси А и рельс оси Б). При этом модель должна давать целостную картину взаимного расположения элементов путей по этим осям.
2. Добавить трехмерное облако точек высокой плотности для рельсов оси А и оси Б с целью выявления отклонений элементов крановых путей от проектного положения в плане и профиле (планово-высотная съемка), а также обнаружения дефектов крановых путей.
3. Создать трехмерную модель надземного рельсового кранового пути с последующей автоматизированной оценкой (измерением) отклонений геометрии крановых путей, износов и локальных дефектов и привязкой их к сечениям и осям колонн.

Материалы и методы. В качестве базовой информации использовались данные о дефектах на рельсовых путях мостовых кранов. Они получены при обследовании мостовых кранов в рамках проведения экспертного контроля за грузоподъемными кранами на машиностроительных предприятиях. Обследование проводилось в 2024 году, в ходе его было осмотрено 352 надземных крановых пути общей протяженностью 14 километров.

Методическая часть исследования основана на ГОСТ Р 56944–2016⁶. Нейронные сети компьютерного зрения обучали на основе открытых библиотек для языка Python. Для распознавания дефектов использовалась модернизированная предобученная нейронная сеть YOLOv8. Ее архитектура представляет собой трехчастную систему, состоящую из экстрактора признаков (программного модуля CSPDarknet53), комбинатора признаков (модуля C2f) и выходного предсказывающего блока (модуля decoupled head). YOLOv8 разработана компанией Ultralytics и обладает открытым исходным кодом, доступным для дальнейшей модернизации под нужды конкретного проекта.

Аппаратной основой платформы служила летающая мобильная система с модульной архитектурой (рис. 1).



Рис. 1. Промышленный инспекционный FPV-дрон (квадрокоптер) с защитным каркасом

Авторами предложена собственная конструкция беспилотного летательного аппарата (квадрокоптера), собранная из компонентов, произведенных в Китае и доступных для покупки у дистрибьюторов подобного оборудования.

Для позиционирования БПЛА относительно базовых станций и так называемых анкерных применены датчик DWM1000 — поддержка позиционирования TWR (Two-Way Ranging — метод определения расстояния между двумя устройствами с помощью обмена сигналами) и датчик TDOA (Time Difference of Arrival — метод позиционирования, который определяет местоположение объекта, измеряя разницу во времени прихода его сигнала на несколько приёмных станций (анкерных) с известными координатами).

Сенсорный комплекс включает в себя три ключевых типа датчиков:

- средства пространственного зондирования (мультилинзовый лидар Livox MID-40, камера глубины Orbbec Gemini 2);
- средства визуального восприятия (комплект DJI O3 Air Unit — цифровая FPV-система, включающая в себя компактную RGB камеру 4K и передатчик);
- системы позиционирования и стабилизации (датчики DWM1000, инерциальные модули NAV40, системы ближнего обнаружения на базе прошивки ArduPilot, резервные методы навигации — визуальная одометрия и оптическая навигация на базе лидара и камер).

Вычислительная подсистема построена на процессорном модуле Aocoda-RC F765 V2 с графическим ускорением, поддерживающим исполнение алгоритмов компьютерного зрения, нейросетевой обработки и слияния данных.

Методика обследования надземного рельсового кранового пути опорной конструкции с применением беспилотного летательного аппарата осуществлялась в соответствии со следующим алгоритмом (рис. 2):

1. Проверить состояние и установить заряженный аккумулятор БПЛА.
2. Провести калибровку средств пространственного и визуального восприятия.
3. Осуществить пробный полет с проверкой работы систем навигации и систем захвата и передачи облака точек 3d модели.

⁶ ГОСТ Р 56944–2016 «Краны грузоподъемные. Пути рельсовые крановые надземные. Общие технические условия» (утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 1 июня 2016 года № 463-ст). С. 3. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/8fe/4293754222.pdf?ysclid=mnsrnm94qrk671517049> (дата обращения: 10.04.2026).

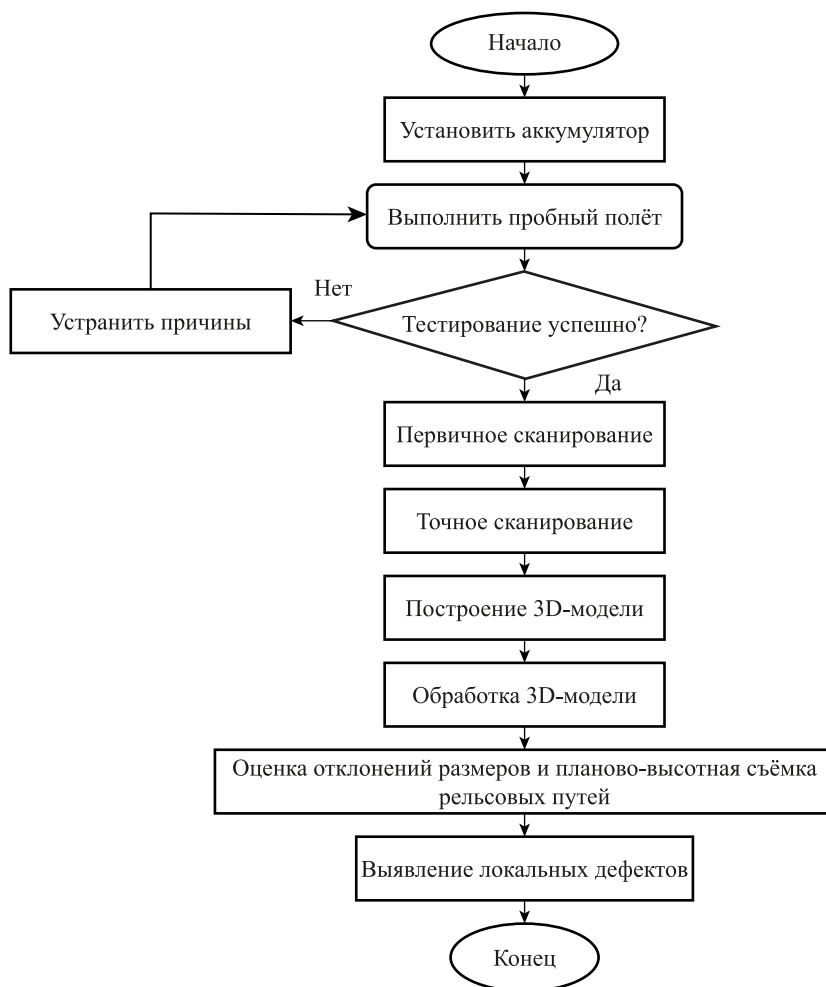


Рис. 2. Алгоритм применения БПЛА для обследования надземных крановых путей

4. Выполнить первичное сканирование (рис. 3, поз. 1) для создания целостного трехмерного облака точек, охватывающего рельсы, подкрановые балки, опоры, с фиксацией мест расположения опор подкрановой балки по осям обоих рельсов. При этом для обеспечения целостности модели сканирование может охватывать пол помещения или элемент конструкции, связывающий подкрановые балки оси А и Б. Расстояние пролета составляет около одного метра от сканируемых элементов. Скорость — 5 м/с. Плотность точек сканирования — 2000 шт/м².

5. Выполнить точное сканирование рельсов осей А и Б для добавления трехмерного облака точек высокой плотности (рис. 3, поз. 2). При этом пролет осуществляется на расстоянии около 0,2 метра от сканируемых элементов. Скорость — 1 м/с. Плотность точек сканирования — 40000 шт/м².

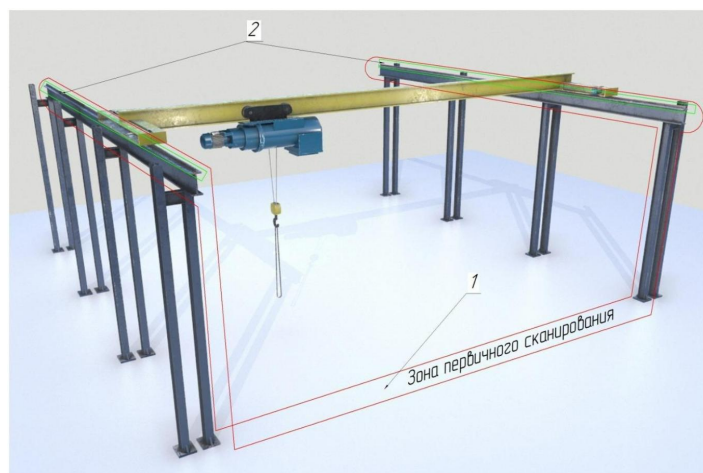


Рис. 3. Зона первичного (1) и точного сканирования (2)

6. Создание 3D модели из захваченного облака точек в приложении Geomagic Wrap.

7. Обработка 3D модели с применением искусственного интеллекта. При этом выявляются следующие элементы модели: рельсы, подкрановые балки, опоры, места расположения створов. Обработка выполняется с использованием собственного приложения на основе модернизированной модели YOLOv8.

8. Определение по модели отклонений размеров и планово-высотного положения рельсовых путей от предельных значений ГОСТ Р 56 944–2016 «Краны грузоподъемные. Пути рельсовые крановые надземные. Общие технические условия»⁷.

9. Выявление локальных дефектов крановых путей на модели.

В пунктах алгоритма 8 и 9 точность выявленных отклонений и дефектов на стадии испытаний способа верифицируется путем сравнения с результатами визуально-измерительного контроля. После завершения испытаний параметры его точности будут указаны в нормативно-технической документации.

Результаты исследования. Разработан метод дефектации надземных крановых путей с применением беспилотных летательных аппаратов. Выявлены локальные дефекты крановых путей. Данные получены при обследовании мостовых кранов в рамках проведения экспертного обследования грузоподъемных кранов на машиностроительных предприятиях.

В частности, решены следующие поставленные авторами задачи:

1. Создано трехмерное облако точек (рис. 4), охватывающее рельсы, подкрановые балки, опоры, с фиксацией мест расположения опор подкрановой балки по осям обоих рельсов (рельс оси А и рельс оси Б). При этом модель дает целостную картину взаимного расположения элементов путей по осям А и Б.



Рис. 4. Модель однобалочного мостового крана с крановыми путями

На рис. 4 представлена модель однобалочного мостового крана с крановыми путями, полученная из трехмерного облака точек, указаны оси рельсов А и Б, а также номера створов — колонн со средней линией между ними.

2. Получено трехмерное облако точек высокой плотности для рельсов оси А и оси Б с целью выявления отклонений элементов крановых путей от проектного положения в плане и профиле (планово-высотная съемка), а также обнаружения дефектов крановых путей (рис. 5–10).

Фотографии дефектов на рис. 5–10 были получены в цехах промышленного предприятия в ходе реального обследования при имеющихся освещенности и оптической прозрачности воздуха.

Оценка дефектов выполнена с помощью обученной нейронной сети компьютерного зрения.

На рис. 5 показан дефект стыка двутавровой балки с некачественной приваркой фиксирующей накладки.

⁷ ГОСТ Р 56944–2016 «Краны грузоподъемные. Пути рельсовые крановые надземные. Общие технические условия» (утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 1 июня 2016 года № 463-ст). С. 12. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/8fe/4293754222.pdf?ysclid=mnsrn94qrk671517049> (дата обращения: 10.04.2026).



Рис. 5. Дефект стыка

На рис. 6 продемонстрирован дефект перфорации двутавровой балки подвесного мостового крана (в области сварного шва).



Рис. 6. Перфорация двутавровой балки

На рис. 7 приведен пример износа рельса с выкрашиванием боковых кромок и раковинами на рабочей поверхности.



Рис. 7. Износ рельса с выкрашиванием и раковинами

На рис. 8 виден результат истирания двутавровой балки колесом подвесного мостового крана. Дефект может появиться в результате изгиба балки либо неисправности конструкций крана.



Рис. 8. Истирание боковой поверхности двутавровой балки

На рис. 9 виден износ рельса в результате буксования колеса опорного крана.



Рис. 9. Износ рельса в результате буксования колеса крана

На рис. 10 — дефект теплового стыка двутавровой балки с отсутствием нижней накладки.



Рис. 10. Дефект в области теплового стыка двутавровой балки

3. Созданная трехмерная модель надземного рельсового кранового пути позволяет проводить автоматизированную оценку отклонений геометрии крановых путей, износов и локальных дефектов с привязкой их к створам (сечениям) и осям колонн (рис. 4).

Оценка геометрии крановых путей, представленных в виде модели на рис. 4, дала следующие результаты, они показаны на рис. 11.

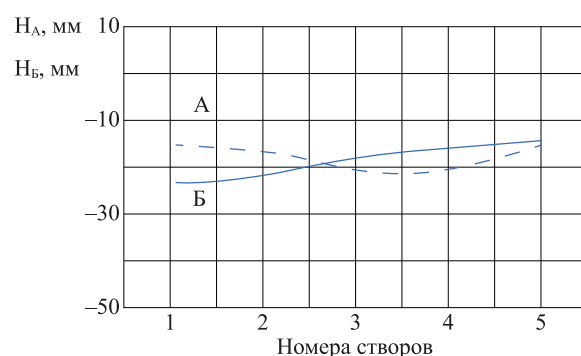


Рис. 11. Оценка геометрии рельсов А и Б в вертикальной плоскости по высотным отметкам НА и НБ

Допускаемая разность отметок рельсов в одном поперечном сечении по оси симметрии [P_1] равна 40 мм, допускаемая разность отметок рельсов на соседних колоннах [P_2] равна 10 мм (согласно ГОСТ Р 56 944–2016)⁸. Сравнив данные на рис. 11 с допускаемыми значениями, можно сделать вывод, что отклонения геометрии на рассматриваемой модели крановых путей лежат в пределах допуска.

Данный метод дефектации дает возможность получать данные фото-видеофиксации для оценки размеров дефектов с точностью до одного миллиметра.

Обсуждение. Полученные в ходе применения разработанного авторами метода результаты полностью удовлетворяют и поставленной цели исследования, и задачам по ее реализации. Достижению точных и четких показателей способствовал большой объем проведенных обследований надземных крановых путей, который позволил получить разнообразные и многочисленные образцы дефектов геометрии крановых путей, а также локальных дефектов. Обработка данных дала возможность обучить нейронные сети компьютерного зрения и получить полнофункциональные трехмерные модели, позволяющие выявлять и оценивать дефекты в автоматизированном режиме.

Сравнение полученных результатов с литературными данными, теориями, другими разработками позволяет сделать вывод об уникальности данного исследования, поскольку в отношении надземных крановых путей подобный метод ранее не разрабатывался.

На текущий момент главным недостатком разработанного метода является ограничение работы беспилотного летательного аппарата по времени из-за нехватки заряда аккумуляторов. При этом нет возможности установить аккумуляторы большей емкости, так как это потребует увеличения размеров самого беспилотного летательного аппарата. Предельный размер беспилотного летательного аппарата поэтому может составлять не более 0,5 метра, это обусловлено стесненными условиями полета в закрытых помещениях, а время полета — не более 20 минут (в зависимости от нагрузки от оборудования).

Полученные результаты исследования следует интерпретировать как положительные, метод следует развивать и внедрять в технологию обследования надземных крановых путей. На практике метод позволяет:

- производить осмотр крановых путей по всей длине с близкого расстояния;
- оценивать размер локальных дефектов по результатам фото-видеофиксации через программное обеспечение комплекса;
- построить 3D модель кранового пути методом фотограмметрии с последующей оценкой отклонений от прямолинейности в продольной и поперечной плоскости;
- снизить трудоемкость и продолжительность обследования не менее чем в два раза.

Заключение. В заключение следует отметить, что работа, проведенная авторами, имеет значимые результаты, главный из которых — разработка метода дистанционного обследования крановых путей мостовых кранов, расположенных на высоте. В ходе исследования были обучены нейронные сети поиска дефектов и разработан алгоритм обследования крановых путей с созданием трехмерной модели, позволяющей оценивать геометрические отклонения рельсов в продольной и поперечной плоскости. Главное положительное свойство метода — обеспечение безопасности экспертов и специалистов, обследующих подъемные сооружения. Кроме того, метод позволяет рассматривать труднодоступные участки крановых путей, выявлять дефекты, которые могли быть не замечены ранее, что снижает вероятность возникновения аварийных ситуаций.

⁸ ГОСТ Р 56944–2016 «Краны грузоподъемные. Пути рельсовые крановые надземные. Общие технические условия» (утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 1 июня 2016 года № 463-ст). С. 17. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/8fe/4293754222.pdf?ysclid=mnsrn94qrk671517049> (дата обращения: 10.04.2026).

В дальнейших планах исследований рельсовых путей грузоподъемных кранов — разработка дополнения к системе идентификации их состояния: система должна в автоматическом режиме проводить обследование крановых путей, а также анализировать состояние металлоконструкций кранов и выявлять наличие в них дефектов.

Список литературы / References

1. Junlin Wang, Songbo Hu, Yihai Fang, Hongling Guo. Knowledge-Augmented Multi-Modal Data Fusion and Reasoning for Automated Crane Lift Monitoring. *Automation in Construction*. 2026;183:106822. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2026.106822>
2. Егельский В.В., Николаев Н.Н., Егельская Е.В., Короткий А.А. Использование искусственного интеллекта для контроля надежности съемных грузозахватных приспособлений. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2024;(2):57–67. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-57-67>
3. Egelsky VV, Nikolaev NN, Egelskaya EV, Korotkiy AA. Use of Artificial Intelligence to Monitor the Reliability of Removable Load-Handling Devices. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2024;(2):57–67. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-57-67>
4. Lingxiao Wang, Jingfeng Yuan, Shu Su, Hongxing Ding, Yu Bai, Skibniewski MJ. Fusing Enhanced YOLO and knowledge graph-Based Large Language Models for Automatic Risk Perception in Tower Crane Operations. *Automation in Construction*. 2026;183:106823. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2026.106823>
5. Shi Qiu, Benxin Cai, Weidong Wang, Jin Wang, Qasim Zaheer, Xianhua Liu, et al. Automated Detection of Railway Defective Fasteners Based on YOLOv8-FAM and Synthetic Data Using Style Transfer. *Automation in Construction*. 2024;162:105363. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105363>
6. Yiheng Wang, Hanbin Luo, Weili Fang. An Integrated Approach for Automatic Safety Inspection in Construction: Domain Knowledge with Multimodal Large Language Model. *Advanced Engineering Informatics*. 2025;65(B):103246. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103246>
7. Yiheng Wang, Bo Xiao, Ahmed Bouferguene, Mohamed Al-Hussein. Proactive Safety Hazard Identification Using Visual-Text Semantic Similarity for Construction Safety Management. *Automation in Construction*. 2024;166:105602. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105602>
8. Yuexiong Ding, Ming Zhang, Jia Pan, Jinxing Hu, Xiaowei Luo. Robust Object Detection in Extreme Construction Conditions. *Automation in Construction*. 2024;165:105487. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105487>
9. Xiaohui Li, Hailong Huang, Savkin AV, Jian Zhang. Robotic Herding of Farm Animals Using a Network of Barking Aerial Drones. *Drones*. 2022;6(2):29. <https://doi.org/10.3390/drones6020029>
10. Na Zhang, Gang Yang, Dawei Wang, Fan Hu, Hua Yu, Jingjing Fan. A Defect Detection Method for Substation Equipment Based on Image Data Generation and Deep Learning. *IEEE Access*. 2024;12:105042–105054. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3436000>
11. Панфилов А.В., Николаев Н.Н., Юсупов А.Р., Короткий А.А. Интегральная оценка риска при диагностике стальных канатов с использованием компьютерного зрения. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;(1):56–69. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-56-69>
12. Panfilov AV, Nikolaev NN, Yusupov AR, Korotkiy AA. Integral Risk Assessment in Steel Ropes Diagnostics Using Computer Vision. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;(1):56–69. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-56-69>
13. Peterka P, Krešák J, Vojtko M, Mantič M. Failure Analysis of the Journal Bearing Pulley of the Cargo Cable Way. *Engineering Failure Analysis*. 2020;111:104329. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104329>
14. Короткий А.А., Панфилов А.В., Юсупов А.Р. Детекция и классификация дефектов стальных канатов лифтов с использованием компьютерного зрения. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2023;4:643–648. https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/preview_therest_ru.php?x=tsu_izv_technical_sciences_2023_04_e&year=2023 (дата обращения: 25.03.2026).
15. Korotkiy AA, Panfilov AV, Yusupov AR. Detection and Classification of Defects in Steel Ropes of Elevators Using Computer Vision. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2023;4:643–648. (In Russ.) https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/preview_therest_ru.php?x=tsu_izv_technical_sciences_2023_04_e&year=2023 (accessed: 25.03.2026).
16. Крючков М.С. Анализ методов интеллектуальных систем поддержки принятия решений. *Вестник науки*. 2025;7(88):303–314. <https://www.вестник-науки.рф/article/25033> (дата обращения: 25.03.2026).
17. Kruchkov MS. Analysis of Methods of Intelligent Decision Support Systems. *Vestnik Nauki*. 2025;7(88):303–314. (In Russ.) <https://www.вестник-науки.рф/article/25033> (accessed: 25.03.2026).
18. Yasser E El-Alfy, Uthman Baroudi. Monocular Based 3D Depth Estimation and SLAM Integration. *Drone Systems and Applications*. 2025;13:1–14. <https://doi.org/10.1139/dsa-2024-0025>
19. Yangzi Cong, Chi Chen, Bisheng Yang, Ruofei Zhong, Shangzhe Sun, Yuhang Xu, et al. OR-LIM: Observability-Aware Robust Lidar-Inertial-Mapping under High Dynamic Sensor Motion. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2024;218(A):610–627. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2024.09.036>

Об авторах:

Владислав Витальевич Егельский, аспирант кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), sp_5sp_6pb_97n14@mail.ru

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

Елена Владимировна Егельская, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), egelskaya72@mail.ru

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

Леонид Александрович Терновской, аспирант кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), leonidternovskoi@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

В.В. Егельский: формулирование идеи, гипотезы, цели исследования, создание программного обеспечения, скриптов, алгоритмов.

Н.Н. Николаев: разработка методов и процедур исследования, создание графиков, схем, иллюстраций.

Е.В. Егельская: редактирование, доработка текста.

А.А. Короткий: научное руководство проектом, организационное управление проектом.

Л.А. Терновской: написание первоначального текста статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Vladislav V. Egelsky, Postgraduate Student of the Department of Operation of Transport Systems and Logistics, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#), sp_5sp_6pb_97n14@mail.ru

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

Elena V. Egelskaya, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Operation of Transport Systems and Logistics, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), egelskaya72@mail.ru

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

Leonid A. Ternovskoi, Postgraduate Student of the Department of Transport Systems and Logistics, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#), leonidternovskoi@yandex.ru

Claimed Contributorship:

VV Egelsky: conceptualization, software.

NN Nikolaev: methodology, visualization.

EV Egelskaya: writing – review & editing.

AA Korotkiy: supervision, project administration.

LA Ternovskoi: 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 30.05.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 20.06.2026

Принята к публикации / Accepted 30.06.2026

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 613.644

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-3-232-246>

Применение малой архитектурной формы типа «Беседка» в качестве шумозащитной конструкции для площадок благоустройства жилых зон

А.В. Артёмов¹, Е.С. Куркин², П.С. Захаров¹, Т.В. Штеба³¹ Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация² ФКУ «Уралуправтодор», г. Екатеринбург, Российская Федерация³ Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация✉ artemovav@m.usfeu.ru

EDN: GGZPEL

Аннотация

Введение. Новый проект «Инфраструктура для жизни» предусматривает обновление жилищного фонда, развитие общественных пространств и формирование удобных маршрутов общественного транспорта. Наряду с химическим загрязнением атмосферного воздуха автотранспорт является значимым источником шумового воздействия, представляющего угрозу для здоровья населения. Для снижения уровня шума применяются специальные акустические экраны и зеленые насаждения. Однако существующие способы шумозащиты внутридворовых пространств не всегда обладают достаточной эффективностью и/или требуют существенных материальных затрат. С целью устранения указанных недостатков предлагается использовать малые архитектурные формы (МАФ), которые могут выступать как эффективное средство снижения шума и одновременно служить элементом благоустройства территории. Цель настоящего исследования — расчетное обоснование возможности применения инженерно-технических элементов благоустройства (МАФ) для снижения шумового воздействия придомовой инфраструктуры, в первую очередь автотранспорта, на площадки отдыха и досуговые зоны жилых районов.

Материалы и методы. Эмпирическую основу исследования составили данные нормативных документов и научных публикаций, дополненные результатами натурных наблюдений. Объектом изучения являлась МАФ в виде полужакрытой беседки с глухой задней стенкой. Для сопоставления были рассмотрены расчетные варианты без ограждения, со стандартным шумозащитным экраном, с полосой зеленых насаждений, с малым акустическим экраном и с МАФ типа «Беседка». Расчеты выполнены с применением программ «Эколог-Шум», «Расчет звукоизоляции» и «Расчет шума от транспортных потоков» в соответствии с действующими нормативными методиками.

Результаты исследования. Проведены расчеты шумового воздействия и изоляции воздушного шума для различных вариантов, результаты которых представлены в таблицах и отражены в графических материалах. Частотная характеристика изоляции воздушного шума для сплошной стенки МАФ, изображенная в виде ломаной линии, была определена графическим способом. Индекс изоляции воздушного шума для задней стенки МАФ составил 29 дБ, что указывает на потенциальную возможность ее применения в качестве локального шумозащитного элемента при рассматриваемых расчетных условиях. Расчеты шумовой характеристики транспортного потока показали, что эквивалентный уровень звука составляет 59,7 дБА при предельно допустимом уровне воздействия на зону отдыха жилой территории 45 дБА. Графическое отображение результатов расчета распространения шума представлено в виде изолиний зон акустического дискомфорта на высоте нормирования 1,5 м. Для дополнительной визуализации также выполнено графическое распределение шума в перспективе (3D).

Обсуждение. Полученные результаты показывают, что расчетное снижение уровня шума определяется прежде всего наличием сплошной ограждающей поверхности между источником акустического воздействия и защищаемой площадкой. В рассматриваемых условиях наиболее результативными оказались стандартный шумозащитный экран и МАФ типа «Беседка», тогда как зеленые насаждения, малый акустический экран и отсутствие защитных мероприятий не обеспечили требуемый уровень шумозащиты.

Заключение. Использование ограждающих конструкций, включая экраны и МАФ, значительно снижает уровень шума и уменьшает зону акустического дискомфорта. Необходимость разработки доступных и эффективных решений, направленных на снижение шумового воздействия в жилых зонах, обусловлена требованиями санитарно-гигиенического законодательства. Полученные расчетные данные свидетельствуют о перспективности применения полузакрытых МАФ с глухими ограждающими элементами в качестве дополнительного средства локальной шумозащиты. Окончательная оценка их эффективности требует дальнейшей проверки для иных конструктивных решений, планировочных условий и сценариев шумовой нагрузки.

Ключевые слова: физическое воздействие, шум, жилая зона, малые архитектурные формы, звукоизоляция

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

Для цитирования. Артёмов А.В., Куркин Е.С., Захаров П.С., Штеба Т.В. Применение малой архитектурной формы типа «Беседка» в качестве шумозащитной конструкции для площадок благоустройства жилых зон. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2026;10(3):232–246. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-3-232-246>

Original Empirical Research

Gazebo-Type Small Architectural Form as a Noise Protection Structure for Residential Area Improvement Sites

Artyem V. Artyemov[✉]¹, Evgenii S. Kurkin², Pavel S. Zakharov¹, Tat'yana V. Shteba³

¹ Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russian Federation

² Federal State Institution “Uralupravitel”, Yekaterinburg, Russian Federation

³ Ural Institute of the State Fire Service of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg, Russian Federation

✉ artemovav@m.usfeu.ru

Abstract

Introduction. The new “Infrastructure for Life” project aims to renovate housing, public spaces, and develop convenient public transportation routes. Along with chemical air pollution, motor vehicle traffic is becoming a significant source of noise pollution that threatens public health. Special acoustic barriers and green spaces are used to control noise. However, existing methods of noise protection for courtyard spaces are not always effective and/or require significant material costs. To overcome these limitations, the use of small architectural forms (SAFs) has been proposed. These forms can serve as noise reduction measures and also be elements of landscaping. The aim of this research is to provide a calculated justification for the possibility of using engineering and technical landscaping elements, namely SAFs, to reduce the noise from adjacent residential infrastructure, particularly motor vehicles, on recreational and leisure areas in residential districts.

Materials and Methods. The empirical basis of the study consisted of data from regulatory documents, scientific publications, and field observations. The research object was a small architectural form, a semi-enclosed gazebo with a solid rear wall, which could be used for noise protection of adjacent courtyard spaces and landscaped areas. For comparison, we also considered the following design solutions: no barrier, a standard noise barrier, a strip of green space, and a small railway barrier. Acoustic calculations were performed in accordance with current standards using specialized software, including Ecolog-Noise, Calculation of Sound Insulation, and Calculation of Traffic Flow Noise.

Results. Calculations of noise impact and airborne sound insulation were performed for various design options, and the results were presented in tables and graphical materials. The frequency characteristic of airborne sound insulation for a solid SAF wall was determined graphically in the form of a broken line. The airborne sound insulation index for the rear wall of the SAF was 29 dB, which indicated its potential use as a local noise protection element under the considered calculation conditions. Calculations of traffic noise characteristics showed that the equivalent sound level of the motor traffic flow was 59.7 dBA, while the maximum permissible level for a residential recreation area was 45 dBA. The graphical representation of the noise propagation calculation results was presented as isolines of acoustic discomfort zones at the normalization height of 1.5 m. Additionally, a 3D graphical distribution of noise was prepared for visualization purposes.

Discussion. The results showed that the calculated noise reduction was primarily determined by the presence of a solid enclosing surface between the acoustic impact source and the protected area. In the conditions considered, a standard noise-proof screen and a gazebo-type SAF proved to be the most effective, while green spaces, a small acoustic screen and the absence of any protective measures did not provide the required level of noise protection.

Conclusions. The use of enclosing structures, including acoustic barriers and SAFs, can significantly reduce the noise level and decrease the acoustic discomfort zone. The need to develop affordable and effective solutions for reducing noise levels in residential areas is determined by sanitary and hygienic legislation. The calculated data demonstrate the prospects of using semi-enclosed SAFs with solid enclosing elements as an additional means of local noise protection. However, the final assessment of their effectiveness requires further verification for other structural solutions, planning conditions, and noise load scenarios.

Keywords: physical impact, noise, residential area, small architectural forms, sound insulation

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

For Citation. Artyemov AV. Kurkin ES. Zakharov PS, Shteba TV. Gazebo-Type Small Architectural Form as a Noise Protection Structure for Residential Area Improvement Sites. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(3):232–246. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-3-232-246>

Введение. Реализация национальных проектов, направленных на развитие транспортной и жилищной инфраструктуры, повышает требования к качеству городской среды, а также к безопасности и комфортности внутридворовых пространств [1, 2]. В этих условиях шумовое воздействие автотранспорта рассматривается не только как инженерная задача дорожного проектирования, но и как фактор санитарно-гигиенического риска для населения.

В научной литературе установлено, что транспортный шум представляет собой значимый компонент физического загрязнения урбанизированных территорий и оказывает неблагоприятное влияние на комфорт проживания и здоровье горожан [3]. Обобщающие исследования связывают длительное воздействие шума с неврологическими нарушениями, сердечно-сосудистыми заболеваниями, тревожными состояниями и иными негативными эффектами [4–6]. Следовательно, снижение акустической нагрузки на территориях жилой застройки имеет выраженное санитарно-гигиеническое и градостроительное значение.

Существующие подходы к шумозащите городской среды можно условно разделить на несколько групп. Первая группа включает инженерные шумозащитные сооружения: акустические экраны, ограждающие конструкции и элементы звукоизоляции зданий [8–10]. Их результативность определяется высотой, положением относительно источника шума, геометрическими параметрами, применяемым материалом и наличием звукопоглощающей облицовки [11–13].

При этом инженерные экраны не всегда являются универсальным решением для внутридворовых пространств. В реальных условиях их применение может ограничиваться архитектурными, эксплуатационными, санитарно-гигиеническими и экономическими факторами. Кроме того, фактическое состояние акустических экранов, а также особенности их размещения способны снижать ожидаемую эффективность шумозащиты [14].

Вторая группа решений связана с использованием малых и специализированных акустических экранов [15, 16]. Такие конструкции позволяют локально уменьшать шумовое воздействие, однако их эффективность существенно зависит от высоты, положения относительно источника и приемника шума, а также от типа транспортного потока. Поэтому результаты, полученные для железнодорожного или магистрального шума, не могут автоматически переноситься на дворовые территории и площадки благоустройства. Обобщение указанных экранных решений представлено на рис. 1.



Рис. 1. Применение шумозащитных (акустических) экранов: а — затухание при распространении звука; б — потеря эффективности искусственных шумозащитных конструкций [14]; в — малые акустические экраны [16]

Третья группа решений представлена зелеными насаждениями, которые могут выполнять шумозащитную функцию при достаточной ширине, плотности и ярусности посадок [17, 18]. Наибольший эффект обеспечивают массивы высоких деревьев, дополненные кустарниками, поскольку именно вертикальная структура и плотность кроны определяют способность растительности ослаблять шум.

В качестве естественного шумозащитного средства могут применяться специальные или существующие зеленые насаждения. Исследования показывают, что их эффективность определяется не самим фактом озеленения, а структурными параметрами посадок: высотой, плотностью, шириной полосы, ярусностью и наличием кустарникового слоя [17, 18].

Следовательно, зеленые насаждения обладают выраженным экологическим и градостроительным потенциалом, однако в условиях ограниченной площади дворовой территории их шумозащитная эффективность может быть недостаточной. Основные ограничения связаны с необходимостью дополнительного землеотвода, недостаточной плотностью посадок и сохранением открытых подкрановых пространств.

На практике это приводит к ситуации, когда озеленение улучшает восприятие территории, но не всегда обеспечивает достижение нормативных уровней шума на границе площадок отдыха и досуговых зон.

При размещении гостевых автостоянок и местных проездов рядом с детскими, спортивными и рекреационными площадками возникает необходимость в дополнительных локальных мерах защиты, совместимых с архитектурно-планировочной структурой двора (рис. 2).

Такая постановка задачи позволяет рассматривать МАФ как возможный элемент первого эшелона шумозащиты для нормируемых территорий жилых зон.

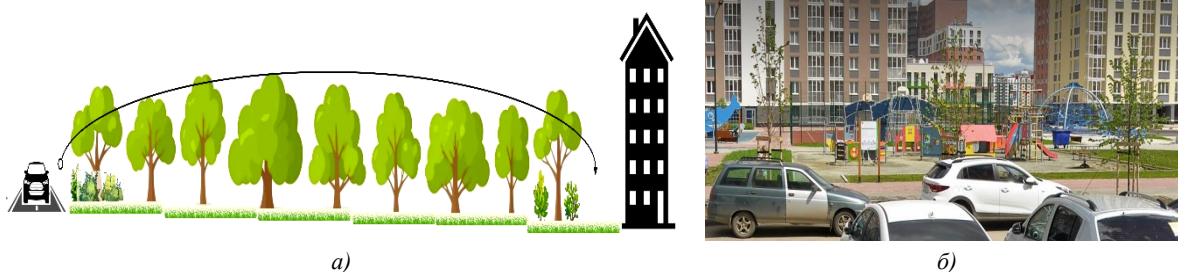


Рис. 2. Применение зеленых насаждений в качестве защитных полос: *а* — затухание при распространении звука; *б* — площадки благоустройства с озеленением со стороны объекта негативного воздействия (открытый интернет-источник «Яндекс-карты»)

Анализ указанных подходов показывает, что каждый из них имеет ограничения применительно к плотной жилой застройке. Традиционные экраны могут ухудшать визуальное восприятие дворовой среды и требовать отдельных затрат на проектирование и строительство. Зеленые насаждения нуждаются в значительной площади и не всегда обеспечивают защиту при наличии открытого подкранового пространства. Малые акустические экраны эффективны только в определенных геометрических условиях.

Особую актуальность данная проблема приобретает для площадок отдыха и досуговых зон, расположенных вблизи местных проездов и гостевых автостоянок. В таких условиях требуется локальное шумозащитное решение, которое не только снижает акустическое воздействие, но и сохраняет функциональность и архитектурную выразительность благоустраиваемой территории [7].

В случаях, когда установка традиционных экранов или создание полноценных зеленых защитных полос затруднены, проектные и эксплуатационные организации могут использовать сплошные элементы благоустройства: подпорные стенки, ограждающие конструкции или малые архитектурные формы (МАФ) (рис. 3). Их преимущество заключается в совмещении защитной функции с задачами благоустройства территории.

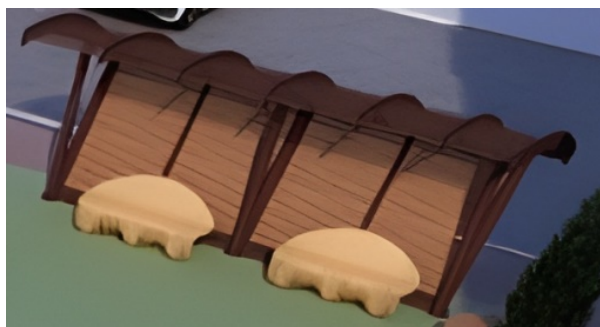


Рис. 3. Малая архитектурная форма «Беседка» для зон благоустройства жилых зон

С этих позиций перспективным направлением является использование элементов благоустройства как части системы шумозащиты. В отличие от специальных инженерных экранов, малые архитектурные формы могут одновременно выполнять рекреационную, градостроительную и защитную функции, что особенно важно для компактных внутридворовых пространств.

Однако в существующих исследованиях основное внимание уделяется традиционным акустическим экранам, зеленым насаждениям и инженерным шумозащитным сооружениям. Возможность применения малых архитектурных форм с глухими ограждающими поверхностями в качестве локальных конструкций для защиты площадок благоустройства от шума изучена недостаточно.

Несмотря на наличие исследований, посвященных традиционным акустическим экранам, зеленым насаждениям и малым шумозащитным конструкциям, недостаточно изучена возможность использования функциональных элементов благоустройства, совмещающих рекреационную и защитную функции, в качестве локальных средств снижения шума во внутридворовых пространствах. Научная новизна настоящей работы состоит в расчетной оценке малой архитектурной формы с глухими ограждающими поверхностями как локального шумозащитного элемента для площадок отдыха жилых зон и в сопоставлении ее эффективности с традиционными вариантами шумозащиты.

Цель данной работы — расчетно оценить возможность применения малых архитектурных форм с глухими ограждающими поверхностями в качестве локальных шумозащитных элементов благоустройства (МАФ) для снижения шумового воздействия придомовой инфраструктуры, прежде всего автотранспорта, на площадки отдыха и досуговые зоны жилых районов.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Выполнен анализ возможных шумозащитных решений для площадок благоустройства жилых зон.
2. Сформированы расчетные варианты шумозащиты, включающие отсутствие ограждения, типовой шумозащитный экран, зеленые насаждения, малый акустический экран и МАФ типа «Беседка».
3. Определены исходные параметры транспортного шума и звукоизоляционные характеристики ограждающей конструкции МАФ.
4. Проведено моделирование распространения шума на территории благоустройства и сопоставление расчетных уровней с предельно допустимыми значениями.
5. Выполнена сравнительная оценка рассмотренных вариантов по санитарно-гигиеническим, экологическим, градостроительным и экономическим критериям.

Материалы и методы. Эмпирическая база и источники данных. Эмпирическую основу исследования составили сведения из нормативных документов, научных публикаций, паспортных характеристик шумозащитных конструкций, а также результаты натурных маршрутных наблюдений, выполненных на территории жилой застройки. Указанные материалы использовались для формирования расчетных сценариев, задания исходных параметров транспортного потока и определения критериев оценки шумового воздействия.

Для проведения расчетно-аналитических работ по оценке акустической нагрузки применялось специализированное программное обеспечение — экологическая геоинформационная система (ГИС) «Эколог-Шум». Программный комплекс включен в «Единый реестр российских программ для ЭВМ и БД» на основании решения Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ.

Используемые дополнительные модули программного комплекса:

- модуль «Шум от автомобильных дорог». Применялся для расчета эквивалентного (L_{Aeq}) и максимального (L_{AFmax}) уровней звука транспортного потока. Методической основой послужили профильные документы транспортной отрасли;
- модуль «Расчёт звукоизоляции». Использовался для определения индекса изоляции воздушного шума (R_w) ограждающих конструкций. Расчет выполнялся в третьоктавных полосах частот 100–3150 Гц с последующей экстраполяцией до стандартных октавных значений. Дополнительно при выборе критериев оценки характеристик материалов применялись справочные сведения из электронного каталога НИИ строительной физики (1988 г.).

Обоснование принятых акустических моделей базируется на действующих нормативно-технических документах РФ и справочных материалах (см. сноски по ходу текста и ссылки на литературу).

Параметры объектов перспективной жилой застройки приняты на основании ранее разработанной проектной документации.

Шумовые характеристики автотранспорта определены с учетом интенсивности движения, зафиксированной в ходе полевых работ в июле 2025 г. на территории проектируемого жилого микрорайона в г. Екатеринбурге. Указанные работы выполнялись в рамках инженерно-экологических изысканий для предпроектной проработки проектной документации и были направлены на оценку фактического уровня шума на границе площадки проектируемого благоустройства.

При разработке рекомендаций по снижению шума в качестве основы использовались предельно допустимые уровни (ПДУ), установленные санитарно-гигиеническими нормами для объектов территории жилой зоны. Характеристики предлагаемых шумозащитных экранов, включая материал панелей, коэффициент звукопоглощения α_w , поверхностную плотность и другие параметры, выбраны на основе паспортных данных производителей либо с учетом предлагаемых проектных решений и справочной информации.

Графический интерфейс применяемой ГИС позволил одновременно редактировать параметры источников, препятствий, включая заданные коэффициенты звукопоглощения, и расчетных точек как в табличной форме, так и на цифровой карте. Для построения «шумовой» карты использовалась подложка из проектной документации, адаптированная с помощью открытых геоданных и импортированная через модуль «ГИС-Стандарт» в формате *.SNP. Оценка эффективности мероприятий проводилась путем сравнения сценариев «базовый», до внедрения защиты, и «проектный», после реализации рассматриваемых вариантов шумозащиты.

Объект исследования. В качестве объекта исследования для защиты площадок благоустройства от шума со стороны местного проезда автотранспорта была рассмотрена малая архитектурная форма типа «Беседка» с глухой задней стенкой (рис. 3, 4). Такая конструкция анализировалась как локальный ограждающий элемент, способный частично выполнять функцию акустического экрана.



Рис. 4. Панорама расположения МАФ в виде беседки при благоустройстве жилой зоны:
а — без присутствия; б — присутствие со стороны проезжей части

Границы применимости расчетной схемы. В настоящей работе рассмотрен частный расчетный случай применения малой архитектурной формы (МАФ) в виде полузакрытой беседки с глухой задней стенкой. Полученные результаты относятся к принятой планировочной схеме, заданным параметрам транспортного потока и выбранной конфигурации ограждающей конструкции. Распространение сформулированных выводов на иные типы МАФ, варианты застройки и сценарии шумовой нагрузки требует проведения дополнительных расчетных и натурных исследований.

Расчетные сценарии. Для сопоставления эффективности шумозащитных решений были заданы пять расчетных вариантов, различающихся типом ограждающей либо защитной конструкции:

- вариант 0 — отсутствие какой-либо ограждающей конструкции;
- вариант 1 — применение типового комбинированного шумозащитного экрана: панель шумоотражающая ПШО + панель шумопоглощающая ПШП + панель шумоотражающая светопрозрачная ПШС, без конструкционного козырька; индекс звукоизоляции воздушного шума принят по паспортным данным;
- вариант 2 — применение двухрядных листовенных древесно-кустарниковых посадок; затухание звука в октавных полосах при прохождении через плотную листву определяется длиной траектории распространения звука;
- вариант 3 — применение малого шумозащитного экрана; эффективность малого акустического экрана в зависимости от частоты принята согласно [16];
- вариант 4 — применение МАФ типа «Беседка» со сплошным задним ограждением из деревянных реек; индекс изоляции воздушного шума определялся расчетным методом.

Краткие исходные сведения по принятым вариантам ограждающих конструкций представлены в таблице 1.

Таблица 1

Принятые варианты для выполнения акустической оценки

Вариант	Вид звукоограждающей конструкций	Характеристика	Примечание
0	Отсутствует	—	—
1	Шумозащитный экран	Типовая конструкция, высота 3 м	Паспортные данные производителя
2	Зеленые насаждения	Высота 8 м, ширина полосы 5 м	Затухание в листе по ГОСТ 31 295.2–2005 ¹
3	Малый акустический экран	Высота 0,85 м	[16]
4	МАФ (в виде беседки)	Дерево, высота 2,5 м, толщина 20 мм	Расчет звукоизоляции

Исходные параметры звукоизоляции ограждающей конструкции. Расчет изоляции воздушного шума для однослойного плоского тонкого ограждения выполнялся в соответствии с алгоритмом, приведенным в п. 9.2 СП 275.1325800.2016². Расчет проведен с применением программы «Расчет звукоизоляции» (фирма-разработчик — «Интеграл»), в которой реализована указанная методика.

Частотная характеристика изоляции воздушного шума сплошной стенки МАФ, рассматриваемой как однослойная плоская тонкая ограждающая конструкция, определенная графическим способом и представленная в виде ломаной линии, приведена на рис. 5.

Результаты расчета индекса изоляции воздушного шума RwR_w для задней стенки МАФ представлены в таблице 5.

В качестве исходных данных для расчета использовались сведения об ограждающей конструкции, приведенные в таблице 2.

Таблица 2

Исходные данные для расчета звукоизоляции ограждающей конструкции

Параметр	Ед.изм.	Значение	Примечание
Тип конструкции	—	однослойная плоская тонкая ограждающая конструкция из металла, стекла, асбоцементного листа, гипсокартонных листов (сухой гипсовой штукатурки) и тому подобных материалов	СП 275.1325800.2016 ³
Вид материала	—	древесно-стружечная плита (ДСП)	материал-аналог*
Плотность материала	кг/м ³	650	СП 275.1325800.2016 ⁴
Толщина конструкции	мм	20	минимальная рекомендуемая толщина

Примечание: * В п. 9.2 СП 275.1325800.2016⁵ приведён перечень материалов для расчёта однослойных тонких ограждений (металл, стекло, гипсокартонный лист и т. п.) с указанием, что методика распространяется на аналогичные по поведению материалы. При отсутствии в СП 275.1325800.2016⁶ прямого указания на конструкцию из древесины (доска, рейка и проч.) в п. 9.2 для расчёта звукоизоляции однослойной части конструкции (обшивки из деревянных реек) применены табличные значения для ДСтП как материала со схожими акустическими свойствами (плотность, структура). Формулировка в указанном СП «и т.п.» нормативно допускает применение расчётной методики к иным материалам при условии их акустической схожести в указанном перечне.

¹ ГОСТ 31295.2–2005 «Затухание звука при распространении на местности». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200046351> (дата обращения 14.08.2026)

² СП 275.1325800.2016. «Конструкции ограждающие жилых и общественных зданий». URL: <https://docs.cntd.ru/document/456050583> (дата обращения 14.08.2026)

³ Там же.

⁴ Там же.

⁵ Там же.

⁶ Там же.

Исходные параметры транспортного потока. Для определения шумовых характеристик транспортного потока применялся алгоритм расчета, приведенный в п. 6.2.8–6.12.8 СП 276.1325800.2016⁷. Исходные параметры включали расчетное время суток, интенсивность движения, долю грузового транспорта, скорость движения, уклон проезжей части, тип покрытия и наличие дополнительных дорожных факторов.

Программные средства расчета транспортного шума. Расчет транспортного шума выполнен в модуле «Шум от автомобильных дорог. 1.1» (фирма-разработчик — «Интеграл»). Указанный модуль позволяет определить эквивалентный уровень звука при движении транспортного потока в заданных дорожных условиях с учетом индивидуальных характеристик потока.

Исходные данные для расчетов шумовых характеристик автомобильных транспортных потоков представлены в таблице 3.

Таблица 3

Исходные данные для расчета шума от автомобильного транспортного потока

Параметр	Ед. изм.	Значение	Примечание	Нормативный документ
Расчетное время суток	—	дневное	Эксплуатация зон благоустройства преимущественно в дневное время (с 7:00 до 23:00)	СанПиН 1.2.3685-21 ⁸
Среднегодовая интенсивность движения	ед./сут	750	Улицы местного значения — улицы в зоне жилой застройки	СП 396.1325800.2018 ⁹
Доля грузовых автомобилей потока	%	0	Движение грузового транспорта не допускается согласно назначенной категории	СП 396.1325800.2018 ¹⁰
Скорость движения	км/ч	20	В жилых зонах, велосипедных зонах и на дворовых территориях	Постановление Правительства РФ от 23.10.1993 N 1090 ¹¹
Уклон проезжей части	%	3	Для обеспечения постоянства скорости и безопасности движения, а также учитывая возможности последующей реконструкции дороги за пределами перспективного периода	СП 34.13330.2021 ¹²
Тип покрытия проезжей части	—	асфальтобетон	Учитывая интенсивность движения на данном участке и категорию дороги	СП 42.13330.2016 ¹³
Ширина центральной разделительной полосы	—	нет	В работе не рассматривалась	—
Наличие пересечения	—	нет	В работе не рассматривались	—

Критерии оценки. Программные средства моделирования распространения шума. Моделирование распространения шума выполнено с использованием ПК «Эколог-Шум. 2.4» (фирма-разработчик — «Интеграл»), имеющего рекомендации НИИСФ «Строительной физики» (сертификат соответствия РОСС RU.СП04. Н00084 от 05.03.2007 г.). Комплекс позволяет рассчитывать уровни звукового давления в отдельных точках и на расчетных площадках с учетом дифракции и отражения звука от препятствий.

⁷ Там же.

⁸ СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_375839/fa69e15a74de57cbe09d347462434c11fcfeeaca/ (дата обращения 14.04.2026).

⁹ СП 396.1325800.2018 Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования. URL: <https://docs.cntd.ru/document/552304870> (дата обращения 14.04.2026).

¹⁰ Там же.

¹¹ Постановление Правительства РФ от 23.10.1993 № 1090. О Правилах дорожного движения URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_2709/ (дата обращения 14.04.2026).

¹² СП 34.13330.2021 «СНиП 2.05.02-85* Автомобильные дороги» URL: <https://docs.cntd.ru/document/573818172> (дата обращения 14.04.2026).

¹³ СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89*» URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054209> (дата обращения 14.04.2026).

Расчетные допущения. Оценка проводилась по эквивалентному уровню шума (дБА), учитывающему временную неравномерность шумового воздействия. При выполнении расчетов не учитывались эффекты звукопоглощения, а также экранирования отраженными сигналами от соседних зданий, сооружений и зеленых насаждений, что позволяет рассматривать полученные значения как результат принятой расчетной схемы.

Последовательность расчета. Алгоритм исследования включал: 1) задание объекта исследования и расчетных сценариев; 2) определение звукоизоляционных характеристик ограждающей конструкции; 3) расчет шумовой характеристики транспортного потока; 4) моделирование распространения шума для каждого варианта; 5) сопоставление полученных уровней с предельно допустимыми значениями; 6) сравнительную оценку вариантов по заданным критериям.

Критерии оценки. В качестве исходных данных для расчета приняты шумовые параметры, характеризующие акустическое воздействие на окружающую среду, пространственное расположение источников шума и ограждающих конструкций. Расчеты уровней звукового давления проводились в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 31,5–8000 Гц, а также для эквивалентных уровней звука LA.

Моделирование учитывало следующие положения:

– Расчеты проведены в локальной системе координат. Ось ОХ ориентирована на восток, ось ОУ — на север. За отметку 0,0 принят уровень земли; расчет выполнялся без учета рельефа местности. Минимальные размеры расчетного прямоугольника составляли 70 × 70 м.

– В расчете учитывались дифракция и отражение звуковых волн ограждающими конструкциями с учетом метеорологических параметров — температуры и влажности воздуха.

– Значения эквивалентных уровней звукового давления L_{экв} за время воздействия Т получены расчетом на основе октавных уровней с учетом продолжительности используемого временного интервала: дневное время — с 7 до 23 ч, ночное время — с 23 до 7 ч.

– Расчетные точки выбраны непосредственно на территории прилегающей селитебной зоны в соответствии с СП 51.13330.2011¹⁴: на площадках отдыха микрорайонов и групп жилых домов, участках детских дошкольных учреждений, школ, больниц и санаториев расчетные точки принимаются на ближайшей к источнику шума границе площадок на высоте 1,5 м от поверхности земли.

Результаты представлялись в табличном виде и в форме цветных шумовых карт — изолиний.

Нормируемые параметры шума для рассматриваемой территории — площадок отдыха и досуговых зон жилых районов — приняты по СанПиН 1.2.3685-21¹⁵ (таблица 4). Основным критерием являлось соблюдение предельно допустимого эквивалентного уровня звука 45 дБА.

Таблица 4

Нормируемые показатели шума

Назначение помещений или территорий	Время суток	Для источников непостоянного шума	
		Эквивалентные уровни звука L(A _{экв}), дБА	Максимальные уровни звука L(A _{макс}), дБА
Площадки отдыха, функционально выделенные на территории микрорайонов и групп жилых домов	—	45	60

Результаты исследования. Согласно принятой процедуре оценки, были проведены требуемые расчёты, результаты которых приведены в соответствующих таблицах и рисунках.

Частотная характеристика изоляции воздушного шума для сплошной стенки МАФ (как однослойная плоская тонкая ограждающая конструкция) в виде ломаной линии, определенная графическим способом, представлена на рис. 5.

¹⁴ СП 51.13330.2011 «Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (с изменением № 1)». URL: <https://clck.ru/3VQEPA> (дата обращения 14.04.2026).

¹⁵ СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_375839/fa69e15a74de57cbe09d347462434c11fcfeeaca/ (дата обращения 14.04.2026).

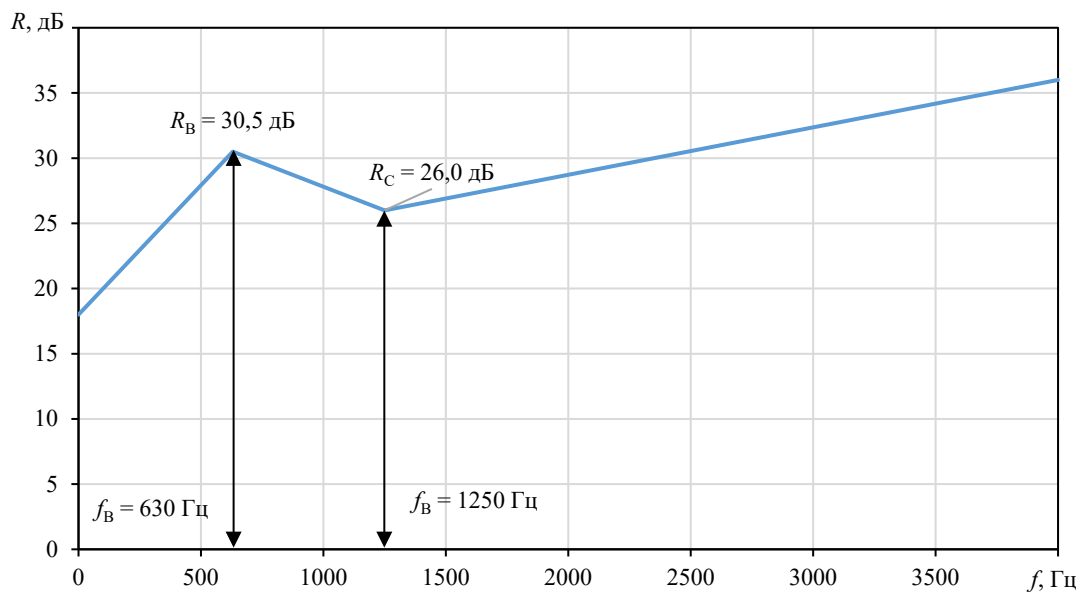


Рис. 5. Ломаная линия частотной характеристика изоляции воздушного шума (график программы «Расчёт звукоизоляции»)

Результаты расчета индекса изоляции воздушного шума (R_w) для задней стенки МАФ представлены в таблице 5.

Таблица 5

Расчет индекса изоляции воздушного шума сплошной стенкой МАФ

Показатель	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Звукоизоляция, дБ	11,1	15,6	20	24,5	29	27,5	31	38,5	46
Индекс изоляции воздушного шума, R_w : дБ					29				

Результаты расчетов шумовой характеристики транспортного шума представлены в таблице 6.

Таблица 6

Расчет шума от транспортных потоков

Показатель	Результат, дБА
Поправка, учитывающая изменение количества грузовых автомобилей и автобусов в транспортном потоке по сравнению с расчетным составом ($L_{\text{груз}}$)	–3
Поправка учитывающая, изменение средней скорости движения по сравнению с расчетным значением ($L_{\text{ск}}$)	–6,5
Поправка, учитывающая величину продольного уклона ($L_{\text{ук}}$)	0,75
Поправка, учитывающая тип дорожного покрытия ($L_{\text{пок}}$)	3
Поправка, учитывающая наличие центральной разделительной полосы ($L_{\text{рп}}$)	0
Поправка, учитывающая наличие пересечения ($L_{\text{перес}}$)	0
Эквивалентный уровень звука автомобильного транспортного потока ($L^{\text{авт. экв.}}$),	59,7

Результаты расчетов распространения шума представлены в таблице 7.

Таблица 7

Результаты расчетов уровней шума на территории рассматриваемой зоны благоустройства

№	Вариант	Уровень шума на границе нормируемой территории (максимальное значение), дБА
0	Отсутствует	53
1	Шумозащитный экран	45
2	Зеленые насаждения	53
3	Малый акустический экран	53
4	МАФ (в виде беседки)	45
	ПДУ	45

Зоны неблагоприятного воздействия шума представлены на изолиниях зон акустического дискомфорта на высоте нормирования 1,5 м (рис. 6).

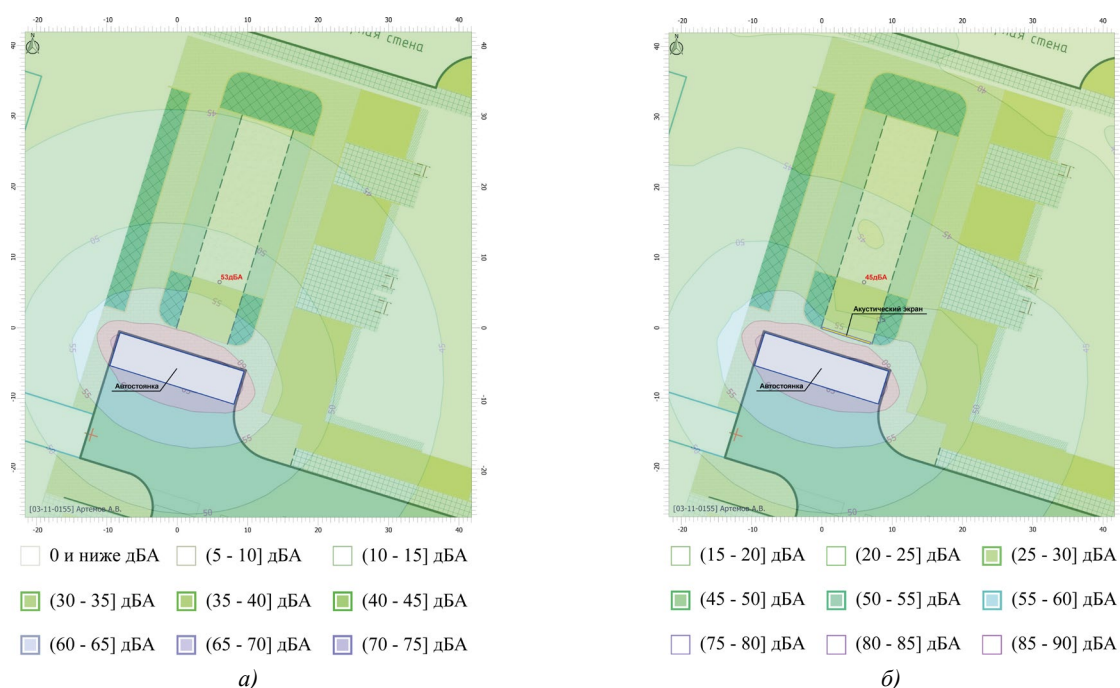


Рис. 6. Расчетное распределение уровня шума на территории благоустройства на высоте 1,5 м: а — вариант № 0 — отсутствие ограждающей конструкции; б — вариант № 1 — типовой шумозащитный экран (шумовые карты, формируемые ПК «Эколог-Шум»)

Для визуализации было выполнено графическое распределение шума в перспективе (3D) на высоте нормирования 1,5 м (рис. 7).



Рис. 7. Расчетное распределение уровня шума в формате 3D для варианта № 4 — МАФ типа «Беседка» с глухой задней стенкой. Расчет выполнен для высоты нормирования 1,5 м

Обсуждение. Полученные расчетные результаты свидетельствуют о том, что ключевым фактором снижения шума на границе нормируемой территории является наличие сплошной ограждающей поверхности, размещенной между источником шумового воздействия и защищаемой площадкой. В связи с этим варианты с типовым шумозащитным экраном и МАФ типа «Беседка» обеспечили достижение предельно допустимого уровня, тогда как отсутствие ограждающей конструкции, зеленые насаждения и малый акустический экран в принятой расчетной схеме не позволили получить сопоставимый эффект.

Данная интерпретация согласуется с литературными сведениями о том, что эффективность акустических экранов определяется их высотой, геометрическими параметрами, положением относительно источника и приемника шума, а также наличием непрерывной экранирующей поверхности [11–14]. Для МАФ типа «Беседка» шумозащитное действие обусловлено не самим фактом благоустройства территории, а наличием глухой задней стенки, выполняющей функцию локального барьера на пути распространения звуковой волны.

Следует подчеркнуть, что представленные результаты имеют расчетный характер. Используемые программные средства и нормативные методики позволяют выполнить предварительную оценку акустической эффективности анализируемых решений, однако не заменяют инструментальную проверку в натурных условиях. Поэтому полученное снижение уровня шума для варианта с МАФ следует рассматривать как расчетно-прогнозное значение, справедливое для принятой геометрии объекта, характеристик транспортного потока и условий распространения звука.

Для интерпретации практической применимости рассмотренных решений была выполнена сравнительная оценка по критериям, отражающим не только акустический результат, но и возможность использования соответствующего мероприятия в условиях жилой застройки:

- «Обеспечение санитарно-гигиенических норм» — соответствие расчетного уровня шума предельно допустимому значению для нормируемой территории;
- «Градостроительная интеграция» — возможность включения решения в архитектурно-планировочную структуру дворовой территории без ухудшения ее функциональности и визуального восприятия;
- «Экологический эффект» — потенциальное снижение отрицательного воздействия шумового фактора на окружающую среду и условия проживания населения;
- «Материальные затраты» — ориентировочная потребность в дополнительных финансовых вложениях сверх обычных работ по благоустройству территории.

Такое ранжирование показывает, что выбор шумозащитного мероприятия не должен основываться исключительно на величине расчетного снижения уровня шума. Для площадок благоустройства значимы также градостроительная совместимость, эксплуатационная целесообразность и возможность реализации решения без формирования отдельного инженерного объекта.

Результаты сравнительной оценки рассматриваемых вариантов мероприятий по шумозащите представлены в таблице 8.

Интерпретация рассмотренных вариантов показывает, что стандартный шумозащитный экран является наиболее очевидным инженерным решением при приоритете санитарно-гигиенического результата. Вместе с тем его применение во внутривдоровой среде может быть ограничено эстетическими и планировочными требованиями, поскольку такой экран воспринимается как самостоятельное техническое сооружение.

Таблица 8

Результаты сравнительной оценки вариантов шумозащиты по приоритетным критериям

Вариант	Обеспечение санитарно-гигиенических норм	Градостроительная интеграция	Экологический эффект	Материальные затраты
0	–	–	–	–
1	+	–	+	+
2	–	+	+	–*
3	–	–	+	+
4	+	+	+	–*

Примечания: * Материальные затраты только в рамках проекта благоустройства территории

Низкая эффективность варианта с зелеными насаждениями объясняется тем, что полоса шириной 5–10 м и рядовая посадка без плотного нижнего яруса не формируют непрерывного акустического барьера. Это согласуется с данными о необходимости достаточной ширины, плотности и ярусности насаждений для достижения выраженного шумозащитного эффекта [17, 18].

Недостаточная эффективность малого акустического экрана связана с его ограниченной высотой. При высоте 0,85 м такая конструкция не перекрывает значимую часть пути распространения звука между транспортным потоком и расчетной точкой, расположенной на высоте 1,5 м, поэтому в рассматриваемой планировочной схеме она не обеспечивает достижения ПДУ.

Вариант с МАФ типа «Беседка» отличается от стандартного экрана тем, что шумозащитная функция в данном случае совмещается с рекреационной и градостроительной. Это позволяет рассматривать такую конструкцию не как отдельное природоохранное сооружение, а как элемент благоустройства, который одновременно формирует защищенное пространство и сохраняет функциональное назначение площадки.

Практическая значимость полученного результата заключается в том, что МАФ с глухой задней стенкой может использоваться как локальное средство шумозащиты в тех случаях, когда установка традиционного экрана нежелательна или затруднена по архитектурно-планировочным причинам. При этом окончательная оценка эффективности такого решения требует уточнения для иных геометрических схем и условий шумовой нагрузки.

Ограничениями исследования являются расчетный характер полученных результатов, рассмотрение одного типа МАФ, одной планировочной конфигурации и одного сценария транспортной нагрузки. Кроме того, в расчетной схеме не учитывались некоторые факторы городской среды, включая отражения от соседних зданий и изменчивость фактической интенсивности движения.

Таким образом, результаты следует интерпретировать как расчетное обоснование перспективности применения МАФ типа «Беседка» с глухой задней стенкой для локальной шумозащиты. Для подтверждения практической эффективности необходимы натурные измерения шума до и после установки конструкции, а также серия расчетов при различных расстояниях до источника, интенсивностях движения и вариантах застройки.

Заключение. В работе выполнена расчетная оценка возможности применения МАФ типа «Беседка» с глухой задней стенкой в качестве локальной шумозащитной конструкции для площадок благоустройства жилых зон.

По результатам моделирования установлено, что при заданных параметрах транспортного потока вариант без защитных мероприятий не обеспечивает соблюдения предельно допустимого уровня шума на границе нормируемой территории. Типовой шумозащитный экран и МАФ типа «Беседка» в рассматриваемой расчетной схеме позволяют снизить уровень шума до 45 дБА.

Зеленые насаждения и малый акустический экран при принятых исходных условиях не обеспечивают требуемого уровня шумозащиты, что связано с недостаточной непрерывностью и/или высотой защитного барьера.

Главный вывод исследования состоит в том, что полузакрытая МАФ типа «Беседка» с глухой задней стенкой может рассматриваться как перспективное локальное шумозащитное решение, совмещающее акустическую и градостроительную функции.

Полученные результаты имеют расчетный характер и требуют дальнейшей проверки: инструментального подтверждения в натуральных условиях, анализа других типов МАФ, вариантов застройки и сценариев шумовой нагрузки.

Список литературы / References

1. Ворошилов Н.В. Тенденции, проблемы и перспективы реализации национального проекта России «Безопасные качественные дороги». *Вопросы территориального развития*. 2022;10(2):3. <https://doi.org/10.15838/tdi.2022.2.62.3>
2. Voroshilov NV. Trends, Problems, and Prospects for Implementing the Russian National Project “Safe and High-Quality Roads”. *Territorial Development Issues*. 2022;10(2):3. (In Russ.) <https://doi.org/10.15838/tdi.2022.2.62.3>
3. Зайцев О.Б., Артемов А.В. Зеленые стандарты в строительстве: реальность и перспективы. *Лесотехнические университеты в реализации концепции возрождения инженерного образования: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса : Материалы X Международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 18–19 мая 2015 года*. Екатеринбург: ФГБОУ ВО УГЛТУ, 2015. С. 167–169. URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5336?locale=en> (дата обращения 14.08.2026)
4. Zaytsev OB, Artyomov AV. Green Environmental Standards in Construction: Reality and Prospects. In: *Forestry Engineering Universities in the Implementation of the Concept of Reviving Engineering Education: Socio-Economic and Environmental Problems of the Forest Complex: Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference, Yekaterinburg, May 18–19, 2015*. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2015. P. 167–169. (In Russ.) URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5336?locale=en> (accessed 14.04.2026).
5. Май И.В., Кошурников Д.Н. Учет шумового фактора при размещении жилой застройки как условие обеспечения благоприятной городской среды. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. 2021;3(43):27–38. URL: <https://fcrisk.ru/node/2266> (дата обращения 14.04.2026).
6. May IV, Koshurnikov DN. Accounting the Noise Factor when Placing Residential Buildings as a Condition for Ensuring a Favorable Urban Environment. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Applied Ecology. Urban Development*. 2021;3(43):27–38. (In Russ.) URL: <https://fcrisk.ru/node/2266> (accessed 14.04.2026).
7. Iliria Ibrahimi Asllani, Riaz Agahi. Impact of Residential Noise Exposure on Neurological Health: A Systematic Scoping Review. *Journal of Urban Health*. 2025;102: 1175–1197. <https://doi.org/10.1007/s11524-025-01026-2>

5. Xia Chen, Mingliang Liu, Lei Zuo, Xiaoyi Wu, Mengshi Chen, Xingli Li, et al. Environmental Noise Exposure and Health Outcomes: An Umbrella Review of Systematic Reviews and Meta-Analysis. *European Journal of Public Health*. 2023;33(4):725–731. <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckad044>
6. Yuliang Lan, Roberts H, Mei-Po Kwan, Helbich M. Transportation Noise Exposure and Anxiety: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Environmental Research*. 2020;191:110118. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110118>
7. Зиятдинова А.Р., Фахрутдинова И.А. Подходы к проектированию соседских пространств в контексте социологических теорий создания благоприятной городской среды. *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2017. № 2(40). С. 60–69. URL: <https://clck.ru/3VEJtE> (дата обращения 14.04.2026).
- Ziyatdinova AR, Fahrutdinova IA. Design Approaches for Neighboring Spaces in a Context of Sociological Theories of Creating a Friendly Urban Environment. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2017;2(40):60–69. (In Russ.) URL: <https://clck.ru/3VEJtE> (accessed 14.04.2026).
8. Ковязин В.Ф., Глушкова Н.А. Защита жилой зоны поселения от воздействия шума акустическими экранами. *Инновационная наука*. 2015;12–2:67–70. URL: <https://clck.ru/3VEK43> (дата обращения 14.04.2026).
- Kovyazin VF, Glushkova NA. Protection of the Residential Area of the Settlement from Noise Using Acoustic Screens. *Innovative Science*. 2015;12–2:67–70. (In Russ.) URL: <https://clck.ru/3VEK43> (accessed 14.04.2026).
9. Чермных В.А., Уткина М.С., Шутова О.А. Анализ применения шумозащитных экранов для снижения шума транспортного потока при строительстве жилого комплекса. *Современные технологии в строительстве. Теория и практика*. 2018;2:107–115.
- Chermnykh VA, Utkina MS, Shutova OA. Analysis of the Application of Noise Screens to Reduce Traffic Noise during the Construction of Residential Complex. *Modern Technologies in Construction. Theory and Practice*. 2018;2:107–115. (In Russ.)
10. Аткина Л.И., Ефимова Н.А. Особенности планировочных решений образовательных объектов ограниченного пользования. *Леса России и хозяйство в них*. 2023;4(87):78–87. <https://doi.org/10.51318/FRET.2023.87.4.008>
- Atkina LI, Efimova NA. Features of Planning Solutions for Educational Objects of Limited Use. *Forests of Russia and Economy in Them*. 2023;4(87):78–87. (In Russ.) <https://doi.org/10.51318/FRET.2023.87.4.008>
11. Аистов В.А., Шубин И.Л. Исследования влияния формы шумозащитного экрана на его акустическую эффективность. *Academia. Архитектура и строительство*. 2009;5:200–208. URL: <https://clck.ru/3VEKTW> (дата обращения 14.04.2026).
- Aistov VA, Shubin IL. Studies of the Influence of the Shape of the Noise Shield on Its Acoustic Efficiency. *Academia. Architecture and Construction*. 2009;5:200–208. (In Russ.) URL: <https://clck.ru/3VEKTW> (accessed 14.04.2026).
12. Иванов Н.И., Шашурин А.Е., Бойко Ю.С. Влияние материала на акустическую эффективность шумозащитных экранов. *Noise Theory and Practice*. 2016;2;4(6):24–28.
- Ivanov NI, Shashurin AE, Boiko IS. Influence of the Material on the Acoustic Efficiency of the Noise Barriers. *Noise Theory and Practice*. 2016;2(4):24–28. (In Russ.)
13. Кондратьев С.А., Иванов Н.И., Тюрина Н.В. Влияние формы и размеров акустического экрана на его эффективность. *Noise Theory and Practice*. 2025;11(3):121–132. URL: <https://clck.ru/3VEKkV> (дата обращения 14.04.2026).
- Kondratev SA, Ivanov II, Tyurina NV. Influence of Noise Barrier Design Parameters on Its Acoustical Insertion Loss. *Noise Theory and Practice*. 2025;11(3):121–132. (In Russ.) URL: <https://clck.ru/3VEKkV> (accessed 14.04.2026).
14. Тюрина Н.В. Актуальные проблемы проектирования транспортных акустических экранов. *Защита от повышенного шума и вибрации : Сборник докладов V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 18–20 марта 2015 года / под редакцией Н.И. Иванова*. Санкт-Петербург: Общество с ограниченной ответственностью «Айсинг», 2015. С. 685–693.
- Tyurina NV. Actual Problems of Designing Acoustic Transport Screens. In: *Protection from Increased Noise and Vibration. Proceedings of the V All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation, St. Petersburg, March 18–20, 2015*. St. Petersburg: Aising Limited Liability Company; 2015. P. 685–693. (In Russ.)
15. Калиниченко М.В. О возможности применения акустических экранов, выполненных на основе резонаторов Гельмгольца, для снижения шума. *Noise Theory and Practice*. 2015;1(1):45–54. URL: <https://clck.ru/3VEKx6> (дата обращения 14.05.2026).
- Kalinichenko M.V. About the Possibility of Using Acoustic Screens, Made on the Basis of Helmholtz Resonators, to Reduce Noise. *Noise Theory and Practice*. 2015;1(1):45–54. (In Russ.) URL: <https://clck.ru/3VEKx6> (accessed 14.08.2026).
16. Васильев А., Ли-Ко-шин Ю., Кудавев А.В., Куклин Д.А., Матвеев П.В. Эффективность малых акустических экранов для защиты от шума железнодорожного транспорта. *Noise Theory and Practice*. 2016;2(3):45–49.
- Vasilev A, Li-Ko-Shin Y, Kudaev AV, Kuklin DA, Matveev PV. The Effectiveness of Small Noise Barriers for Protection of Railway Noise. *Noise Theory and Practice*. 2016;2(3):45–49. (In Russ.)

17. Лукьянец А. Г. Снижение уровня шума в зависимости от структурных параметров насаждений. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2011;65:253–263.

Lukyanets AG. Decreasing of Noise Level Depending on Plantings Structure Parameters. *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University*. 2011;65(1):253–263. (In Russ.)

18. Гордеев Ю.А., Кулагин А.А. Влияние зелёных насаждений на шумовую характеристику урбанизированных территорий. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2014;2(46):151–155.

Gordeev YuA, Kulagin AA. Effect of Shade-Trees Plantations on the Noise Level of Urbanized Territories. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2014;2(46):151–155. (In Russ.)

Об авторах:

Артём Вячеславович Артёмов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров» Уральского государственного лесотехнического университета (620100, Российская Федерация, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, д. 37), [SPIN-код](#), [ORCID](#), artemovav@m.usfeu.ru

Евгений Сергеевич Куркин, начальник ФКУ «Уралуправтдор» (620026, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Луначарского, д. 203), kurkines@inbox.ru

Павел Сергеевич Захаров, кандидат технических наук, ассистент кафедры «Технологии целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров» Уральского государственного лесотехнического университета (620100, Российская Федерация, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, д. 37), [SPIN-код](#), [ORCID](#), zaharovps@m.usfeu.ru

Татьяна Валерьевна Штеба, кандидат технических наук, доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств Уральского института Государственной противопожарной службы МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22), [SPIN-код](#), [ORCID](#), shtebatv@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

А.В. Артёмов: разработка концепции, написание рукописи, внесение замечаний и исправлений.

Е.С. Куркин: разработка методологии, курирование данных, валидация результатов.

П.С. Захаров: проведение исследования, формальный анализ, написание черновика рукописи.

Т.В. Штеба: визуализация, написание черновика рукописи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Artyem V. Artyemov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department Technology of Pulp and Paper Production and Processing of Polymers, Ural State Forest Engineering University (37, Siberian Tract, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), artemovav@m.usfeu.ru

Evgenii S. Kurkin, Head of the Federal State Institution “Uralupravtodor” (620026, Yekaterinburg, Lunacharsky Street, 203), kurkines@inbox.ru

Pavel S. Zakharov, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Lecturer of the Department Technology of Pulp and Paper Production and Processing of Polymers, Ural State Forest Engineering University (37, Siberian Tract, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), zaharovps@m.usfeu.ru

Tat'yana V. Shteba, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Department of Fire Safety of Technological Processes and Production, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22, Mira St., Yekaterinburg, 620062, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), shtebatv@yandex.ru

Claimed Contributorship:

AV Artyemov: conceptualization, writing – review & editing.

ES Kurkin: methodology, data curation, validation.

PS Zakharov: investigation, formal analysis, writing – original draft preparation.

TV Shteba: 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 28.05.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 22.06.2026

Принята к публикации / Accepted 10.07.2026

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 504.064

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-3-247-255>

Интеграция методов компьютерного зрения и гидродинамического моделирования для повышения экологической безопасности за счет идентификации источников негативного воздействия на водные объекты



EDN: BRDTZS

А.В. Гусев

Российский государственный социальный университет, г. Москва, Российская Федерация

gusevandre2015@yandex.ru

Аннотация

Введение. Традиционные системы мониторинга водных объектов нередко демонстрируют недостаточную эффективность при оперативной локализации источника аварийных либо нестационарных сбросов, что препятствует своевременному принятию управленческих решений. Проблема обостряется в условиях быстрого распространения загрязнителя при неполноте, запаздывании и фрагментарности данных наблюдений. Указанные обстоятельства актуализируют разработку методов, обеспечивающих не только фиксацию факта загрязнения, но и ретроспективное восстановление координат источника по полю концентрации. В литературе достаточно широко представлены подходы, базирующиеся на уравнениях адвекции-диффузии, численном гидродинамическом моделировании и анализе спутниковых данных. Однако интеграция методов компьютерного зрения с гидродинамическими моделями для решения обратной задачи идентификации источника остаётся малоизученной. Теоретически такая интеграция обоснована возможностью автоматизированного выделения границ акватории посредством семантической сегментации и физически содержательного описания переноса пассивной примеси. Существующий научный пробел обусловлен отсутствием верифицированных вычислительных схем, объединяющих оба направления. Целью настоящего исследования является разработка и верификация подхода, интегрирующего компьютерное зрение и гидродинамическое моделирование для точной ретроспективной идентификации источника негативного воздействия.

Материалы и методы. Методология включает два взаимосвязанных модуля. Первый модуль компьютерного зрения выполняет семантическую сегментацию спутниковых снимков или данных аэрофотосъёмки с применением свёрточных нейронных сетей. Результатом является бинарная маска акватории, её внешние контуры извлекаются средствами OpenCV с морфологической постобработкой. Второй модуль реализует двумерную численную модель адвекции-диффузии на основе метода конечных объёмов со стационарным полем скоростей. Алгоритм обратной идентификации генерирует множество виртуальных точек-кандидатов по периметру водоёма, для каждого выполняется прямой расчёт поля концентрации, после чего с использованием среднеквадратической ошибки отбирается кандидат, обеспечивающий наилучшее соответствие наблюдаемому распределению. Валидация проведена на трёх синтетических сценариях (рН, растворённый кислород, свободный хлор) в 300 вычислительных экспериментах.

Результаты исследования. Проведено 300 вычислительных экспериментов со случайным заданием координат источника. Модуль компьютерного зрения безошибочно формировал маску акватории во всех испытаниях. Алгоритм обратной идентификации, осуществляющий перебор кандидатов с шагом 50 м, в 285 случаях (95 %) абсолютно точно определил истинный источник. Установлено, что 12 из 15 ошибочных случаев обусловлены расположением источника на расстоянии менее 3 м от границы акватории, где влияние турбулентной диффузии и граничных условий приводит к «размыванию» следа загрязнения. Выявлены ключевые ограничения метода: погрешности двумерного гидродинамического приближения в стратифицированных водоёмах и снижение точности при резко нестационарной гидродинамике. Визуализация результатов подтверждает высокое качество пространственной локализации источника.

Обсуждение. Полученные результаты подтверждают, что интеграция методов создает синергетический эффект: компьютерное зрение обеспечивает скорость и объективность обработки пространственных данных, а гидродинамическое моделирование — физическую и математическую обоснованность анализа. Такой подход преодолевает ключевое ограничение традиционного мониторинга, позволяя не только констатировать факт загрязнения, но и устанавливать его причину, что согласуется с современными тенденциями развития предсказательной аналитики.

Заключение. Разработанная концепция формирует основу для создания операционных систем поддержки принятия решений и «цифровых двойников» водных объектов. Ее внедрение в практику экологического мониторинга создаёт предпосылки для перехода от реактивного реагирования к проактивному управлению рисками и может способствовать повышению обоснованности и эффективности мер по обеспечению экологической безопасности водных ресурсов. Перспективы дальнейших исследований связаны с адаптацией методов для работы с реальными данными онлайн-мониторинга и различными типами водных объектов.

Ключевые слова: экологическая безопасность, компьютерное зрение, гидродинамическое моделирование, идентификация источника загрязнения, цифровой двойник, экологический мониторинг, водные объекты, машинное обучение

Благодарности. Авторы благодарят редакционную команду журнала и анонимных рецензентов за высказанные замечания и ценные рекомендации, которые позволили повысить качество статьи.

Для цитирования. Гусев А.В. Интеграция методов компьютерного зрения и гидродинамического моделирования для повышения экологической безопасности за счет идентификации источников негативного воздействия на водные объекты. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2026;10(3):247–255. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-3-247-255>

Original Empirical Research

Integration of Computer Vision and Hydrodynamic Modeling Methods to Improve Environmental Safety by Identifying Sources of Negative Impact on Water Bodies

Andrey V. Gusev  

Russian State Social University, Moscow, Russian Federation

 gusevandre2015@yandex.ru

Abstract

Introduction. Traditional water body monitoring systems often demonstrate insufficient effectiveness in promptly locating the source of an emergency or non-stationary discharge, which hinders timely management decisions. This problem is further exacerbated by the rapid spread of pollutants in conditions where observational data is incomplete, delayed, or fragmented. These circumstances emphasize the need for methods that can not only detect pollution but also reconstruct the coordinates of its source based on its concentration field. The literature provides a wide range of approaches based on advection-diffusion equations, numerical hydrodynamic modeling, and satellite data analysis. However, the integration of computer vision methods with hydrodynamic models to solve the inverse problem of source identification remains under-researched. Theoretically, such integration is justified by the possibility of automated delineation of water area boundaries through semantic segmentation and a physically meaningful description of passive impurities transport. However, there is a scientific gap due to the lack of verified computational schemes that combine these two approaches. The aim of this study is to develop and verify an approach that integrates computer vision and hydrodynamic modeling to accurately identify the source of a negative impact.

Materials and Methods. The methodology included two interconnected modules. The first computer vision module performed semantic segmentation of satellite images or aerial photography data using convolutional neural networks. The result was a binary mask of the water area; its external contours were extracted using OpenCV with morphological post-processing. The second module implemented a two-dimensional numerical advection-diffusion model based on the finite volume method with a steady velocity field. The inverse identification algorithm generated a set of virtual candidate points along the perimeter of the water body. For each point, a direct calculation of the concentration field was performed, after which a candidate was selected using the root-mean-square error, ensuring the best fit to the observed distribution. Validation was carried out on three synthetic scenarios (pH, dissolved oxygen, free chlorine) in 300 computational experiments.

Results. Three hundred computational experiments were conducted using randomly assigned source coordinates. The computer vision module accurately generated a water area mask in all trials. The inverse identification algorithm, which iterated through candidates in 50-meter increments, identified the true source with absolute accuracy in 285 cases (95%). It was found that 12 out of 15 erroneous cases were due to the source being located less than 1 m from the water area boundary, where the influence of turbulent diffusion and boundary conditions led to the “blurring” of the pollution trace. The key limitations of the method were identified: errors in the two-dimensional hydrodynamic approximation for stratified water bodies, and a decrease in accuracy under sharply non-stationary hydrodynamics. Visualization of the results confirmed the high quality of spatial localization of the source.

Discussion. The results obtained confirmed that the integration of these methods created a synergistic effect. Computer vision ensured the speed and objectivity of spatial data processing, while hydrodynamic modeling provided physical and mathematical validity for the analysis. This approach overcame the key limitation of traditional monitoring by allowing us not only to detect pollution, but also to determine its causes. This is consistent with current trends in predictive analytics.

Conclusion. The developed concept forms the foundation for creating decision-support operational systems and “digital twins” of water bodies. Its implementation in environmental monitoring practices creates the prerequisites for transitioning from reactive response to proactive risk management, and can contribute to enhancing the validity and effectiveness of measures to ensure environmental safety of water resources. Prospects for further research lie in adapting methods for working with real-time online monitoring data and different types of water bodies.

Keywords: environmental safety, computer vision, hydrodynamic modeling, pollution source identification, digital twin, environmental monitoring, water bodies, machine learning

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board of the journal and the anonymous reviewers for their comments and valuable recommendations, which helped improve the quality of the article.

For Citation. Gusev AV. Integration of Computer Vision and Hydrodynamic Modeling Methods to Improve Environmental Safety by Identifying Sources of Negative Impact on Water Bodies. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(3):247–255. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-3-247-255>

Введение. Задача оперативной идентификации источника аварийного или залпового сброса загрязняющих веществ в водный объект возникает при ликвидации последствий инцидента и привлечении виновных к ответственности. Традиционный мониторинг — сеть стационарных постов и эпизодический отбор проб — фиксирует концентрации в отдельных точках [1]. Подобные данные не позволяют за короткое время восстановить полную пространственно-временную картину распространения примеси. Процессы адвекции и турбулентной диффузии быстро «размывают» след источника [2].

Как показывает практика внедрения систем экологического контроля на промышленных предприятиях, разрыв между двумя классами методов сохраняется.

Первую группу методов составляют компьютерное зрение (CV) и глубокое обучение. Они анализируют спутниковые снимки [3]. Семантическая сегментация выделяет акватории [4]. Спектральные индексы (NDWI) фиксируют аномалии цвета воды [5]. Однако CV отображает лишь видимые последствия на поверхности, оставляя необъяснённой динамику переноса в водной толще.

Вторую группу образует гидродинамическое моделирование. Уравнение адвекции-диффузии физически обоснованно прогнозирует рассеивание примеси [6]. Тем не менее модель требует априорного знания координат и мощности источника. В классической постановке эти величины неизвестны.

Ограничения существующих подходов целесообразно рассмотреть подробнее.

Спутниковый мониторинг и CV. Yusuf et al. [1] обобщили эффект-ориентированные методы для водной среды. Достигнута высокая чувствительность к широкому спектру веществ, однако механизмов восстановления параметров источника авторы не предлагают. Chen et al. [2] выполнили обзор данных дистанционного зондирования. Скорость получения пространственной информации высока, но исследование ограничивается констатацией факта загрязнения, а обратная задача не решается. Wang et al. [5] проанализировали модели качества поверхностных вод. Большинство из них работают в прямом прогнозном режиме и для ретроспективной идентификации источника не предназначены.

Инструменты выделения акватории. Свидетельства о регистрации программ [3] и [4] описывают автоматизированные средства морфометрического анализа и идентификации водных объектов. Данные инструменты решают задачу выделения акватории, однако не интегрированы с гидродинамическими моделями переноса.

Цифровые двойники и искусственный интеллект. Maksoud и Mohamed [6] проанализировали применение цифровых двойников в водном секторе. Сделан вывод, что концепция перспективна, но требует алгоритмов автоматической калибровки по данным наблюдений. Frincu [7] рассмотрел применение ИИ для оценки качества воды. Основной недостаток обзора — отсутствие физически обоснованных моделей переноса: используются исключительно статистические методы.

Обратная идентификация источника. Существующие работы [8] применяют гидродинамическое моделирование и оптимизационные алгоритмы [9]. Однако геометрия акватории в них задаётся вручную либо берётся из статических карт, что исключает оперативное использование при поступлении новых снимков.

Опыт обработки более сотни сцен Sentinel-2 показывает, что ручное выделение границ водоёма занимает от 20 до 60 минут на один объект. В аварийной ситуации подобная длительность недопустима.

Таким образом, существующий пробел — отсутствие метода, который одновременно:

- автоматически извлекает геометрию акватории из спутниковых данных с помощью CV;
- использует эту геометрию в гидродинамической модели для обратной идентификации источника;
- выполняет это за время, приемлемое для оперативного реагирования (минуты, а не часы).

Цель данного исследования — разработка и верификация подхода, интегрирующего компьютерное зрение (семантическая сегментация спутниковых снимков и картографических материалов) и гидродинамическое моделирование (двумерное уравнение адвекции-диффузии) для ретроспективной идентификации координат источника аварийного сброса по наблюдаемому полю концентрации.

Задачи:

- реализовать модуль семантической сегментации водной поверхности;
- создать гидродинамическую модель переноса пассивной примеси;
- построить алгоритм обратной идентификации посредством перебора виртуальных источников и сравнения среднеквадратической ошибки (MSE);
- провести верификацию подхода на синтетических данных с контролируемой погрешностью.

Материалы и методы. Методологическая основа исследования представляет собой последовательный алгоритм обработки данных (рис. 1), в котором информация проходит путь от необработанного изображения до количественного вывода о местоположении источника загрязнения. Архитектура решения включает два фундаментальных взаимосвязанных модуля, работающих в единой геоинформационной системе координат.



Рис. 1. Схема интегрированного алгоритма работы

Модуль интеллектуальной обработки пространственных данных на основе компьютерного зрения.

Данный модуль отвечает за автоматизированную подготовку исходной информации для физического моделирования и первичную диагностику. На вход системы поступает изображение исследуемой акватории, полученное со спутниковых платформ среднего разрешения, например Sentinel-2 и Landsat, посредством аэрофотосъемки с БПЛА либо представляющее собой оцифрованный картографический снимок. После этапа предварительной обработки, включающей геометрическую и радиометрическую коррекцию, а также приведение к единой системе координат, ключевой задачей становится семантическая сегментация водной поверхности. Для ее решения применяются алгоритмы глубокого обучения, специально адаптированные для анализа изображений Земли. Эти алгоритмы, часто основанные на сверточных нейронных сетях [10], обучаются на размеченных наборах спутниковых снимков для точной классификации каждого пикселя как «вода» или «не вода». Использование современных фреймворков и библиотек позволяет достигать высокой точности сегментации даже в сложных условиях, таких как облачность, блики на воде или неоднородная береговая линия. Результатом работы модуля является бинарная маска акватории, которая служит основой для построения расчетной области гидродинамической модели [11]. Данный этап полностью исключает субъективные ошибки и значительные временные затраты, связанные с ручным выделением контуров водоема [12].

После получения бинарной маски акватории (результат семантической сегментации) выполняется выделение контуров водных объектов. Для этого используется функция `cv2.findContours` из библиотеки `OpenCV` (Python). Параметр `cv2.RETR_EXTERNAL` обеспечивает извлечение только внешних контуров, игнорируя внутренние полости (например, острова). Параметр `cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE` применяется для сжатия контура: удаляются избыточные точки, лежащие на одной прямой, что позволяет сократить объем данных без потери формы границы. Перед выделением контуров маска подвергается морфологической обработке: последовательно выполняются операции закрытия (заполнение мелких разрывов внутри акватории) и открытия (удаление мелких шумовых фрагментов за пределами водоёма). Используется ядро размером 5×5 пикселей, количество итераций — 2 для закрытия и 2 для открытия.

Модуль гидродинамического моделирования и алгоритм обратной идентификации.

Данный модуль является вычислительным ядром системы. Для описания переноса загрязняющего вещества в водоеме использовалась двумерная $2D$ в плане модель, основанная на уравнении адвекции-диффузии [13]. Такой выбор определяется компромиссом между вычислительной эффективностью, критичной для множественных расчетов при решении обратной задачи, и адекватностью описания для большинства водоемов [14], где горизонтальные масштабы значительно преобладают над вертикальными, а перемешивание можно считать достаточно интенсивным. Уравнение переноса концентрации пассивной примеси [15] C записывается в следующем виде:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \kappa \frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{v} \frac{\partial C}{\partial t} = D_h \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + S(x, y, t),$$

где κ и $\mathbf{v}$ — компоненты вектора горизонтальной скорости течения (м/с); D_h — коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии ($\text{м}^2/\text{с}$); $S(x, y, t)$ — функция-источник, описывающая мощность, локализацию и временной режим сброса. Для численного решения использовался метод конечных объемов, гарантирующий сохранение массы [15]. Поля скоростей течения κ и $\mathbf{v}$ могут быть заданы аналитически для простых сценариев, считаны из файлов результатов отдельной гидродинамической модели или восстановлены по данным измерений. Следует отметить, что в зависимости от масштаба акватории, сложности течений и требуемой точности система может применять различные численные методы для решения уравнения (1). Для большинства сценариев, особенно при работе с крупными водными объектами, используется метод конечных объемов, обеспечивающий сохранение массы и устойчивость решения. Однако для задач с высокой динамикой или необходимостью повышенной точности в зонах интенсивных градиентов концентраций могут применяться адаптивные методы, такие как методы Рунге-Кутты или конечно-разностные схемы повышенного порядка. Это позволяет оптимизировать вычислительные затраты и повысить точность идентификации источника в различных гидродинамических условиях.

Алгоритм обратной идентификации источника формализует решение задачи поиска. При фиксации зоны загрязнения (в условиях синтетического эксперимента — смоделированного поля концентрации $C_{obs}(x, y)$ в области и возможного расположения источников (например, по всему периметру водоема, заданному модулем компьютерного зрения) генерируется множество из N виртуальных точек-кандидатов. Для каждой i -ой точки с координатами (x_i, y_i) выполняется прямой расчет по уравнению (1), в котором функция-источник $S(x, y, t)$ соответствует положению данного кандидата. Результатом является модельное поле концентраций ($C_{mod,i}(x, y)$). Для количественного сравнения каждого модельного поля с наблюдаемым рассчитывается мера близости, например, среднеквадратическая ошибка (MSE):

$$MSE_i = \frac{1}{A} \iint_{\varpi} (C_{mod,i}(x, y) - C_{obs}(x, y))^2 dx dy,$$

где ϖ — область водного объекта; A — ее площадь. Источником загрязнения признается тот виртуальный кандидат, для которого мера близости минимальна: $(x_s, y_s) = \min(MSE_i)$. Таким образом, сложная обратная задача сводится к решению множества прямых задач и выбору наилучшего соответствия, что обеспечивает наглядность и устойчивость результата.

Результаты исследования. Для объективной проверки работоспособности и оценки точности предложенного подхода был проведен комплекс вычислительных экспериментов на синтетических данных. Это позволило исключить влияние неопределенностей, присущих реальным измерениям, и сфокусироваться на проверке работоспособности алгоритма. Моделировалась овальная акватория реального водохранилища со стационарным полем течений. Было исследовано три независимых сценария, имитирующих сброс различных типов загрязняющих веществ, каждый из которых характеризуется своим фоновым значением, концентрацией в стоке и нормативом предельно допустимых концентраций (ПДК). Детальные параметры сценариев систематизированы в таблице 1.

Таблица 1

Параметры синтетических сценариев для валидации алгоритма идентификации

Параметр сценария	Сценарий 1 (pH)	Сценарий 2 (O ₂)	Сценарий 3 (Cl ⁻)
Моделируемый показатель	Водородный показатель (pH)	Растворенный кислород (O ₂), мг/л	Концентрация хлора свободного (Cl ⁻), мг/л
Фоновое значение	7,0 (нейтральная среда)	8,0 (норма)	0,01 (ниже ПДК)
Максимальное значение в сбросе	3,0 (кислый сток)	2,0 (дефицит O ₂)	1,5 (высокое загрязнение)
ПДК(Норматив) ¹	6,0 – 9,0	6,0	0,5
Коэффициент диффузии D_h , м ² /с	0,5	0,5	0,5
Скорость течения, м/с	0,01	0,01	0,01

В каждом из 300 проведенных испытаний, по 100 для каждого параметра, координата истинного источника задавалась случайным образом. Модуль компьютерного зрения безошибочно обрабатывал входные данные, формируя точную маску акватории. Алгоритм обратной идентификации, перебирая кандидатов с шагом 50 м, демонстрировал стабильно высокую эффективность. Статистический анализ результатов показал, что в 285 случаях (95 %) алгоритм с абсолютной точностью определял истинный источник.

Несмотря на высокую эффективность подхода, следует отметить ряд условий, при которых точность метода может снижаться. Во-первых, как показал анализ 15 ошибочных случаев, основная доля неточных определений (12 из 15) связана с расположением источника на расстоянии менее 3 м от границы акватории. Вблизи береговой линии влияние турбулентной диффузии и граничных условий становится сопоставимым с адвективным переносом, что приводит к «размыванию» следа загрязнения и уменьшению уникальности решения обратной задачи. Во-вторых, метод предполагает использование двумерной гидродинамической модели, что оправдано для водоемов с хорошо перемешанной толщей, где преобладают горизонтальные масштабы над вертикальными. В стратифицированных водоемах, например в глубоких озерах с выраженным термоклином, или в зонах с интенсивными вертикальными течениями двумерное приближение может давать существенные погрешности. В-третьих, разработанный алгоритм требует задания стационарного или квазистационарного поля скоростей течения; при резко нестационарной гидродинамике, например в приливно-отливных устьях рек или в период паводков, точность идентификации может снижаться без дополнительной калибровки модели по актуальным на момент инцидента гидрологическим данным. Валидация метода проведена только на синтетических данных, что позволяет судить лишь о его принципиальной работоспособности.

Визуализация результатов наглядно подтверждает высокое качество работы алгоритма. На рис. 2–3 представлены финальные карты моделирования для некоторых из исследуемых параметров.

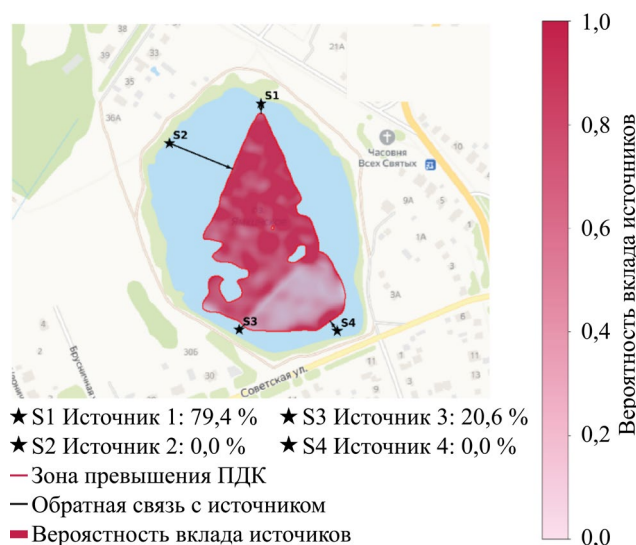


Рис. 2. Карта моделирования источников сброса по параметру водородный показатель (pH)

¹ Санитарные правила и нормы от 28.01.2021 г. (с изменениями на 17.03.2025 г.). СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_375839/ (дата обращения: 20.01.2026).

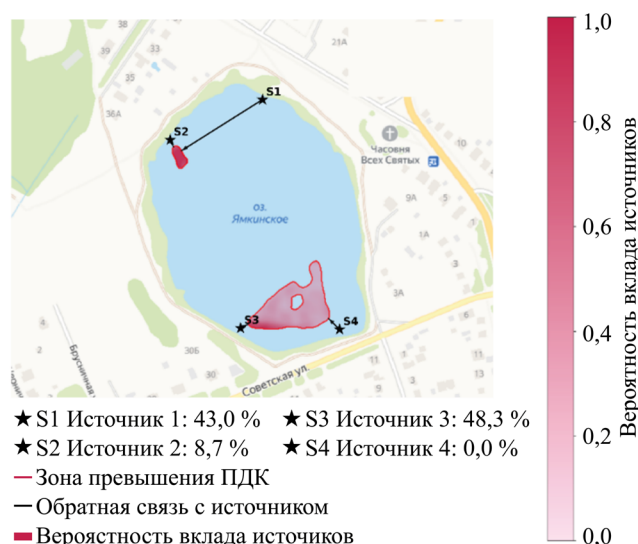


Рис. 3. Карта моделирования источников сброса по параметру свободный хлор (Cl)

Цветовое поле отображает пространственное распределение концентрации (или отклонение от фона), явно выделяя зону влияния сброса. Важно отметить, что алгоритм не просто строит поле, но и вычисляет вероятную точку возникновения загрязнения. На всех визуализациях меткой (красная мишень) точно обозначено местоположение, рассчитанное алгоритмом обратного анализа, которое в подавляющем большинстве испытаний совпадает с заданными в сценарии координатами источника. Эти графики служат убедительным доказательством того, что система способна не только зафиксировать факт загрязнения, но и уверенно указать на его происхождение с заданной точностью.

Обсуждение. Вычислительные эксперименты показали, что точность идентификации источника составляет 95 % (285 из 300 испытаний). Однако 5 % ошибок (15 случаев) не являются случайными. Двенадцать из них связаны с расположением источника на расстоянии менее 3 м от границы акватории. Вблизи берега диффузия и граничные условия искажают след загрязнения, вследствие чего снижается уникальность решения обратной задачи.

Как показывает практика подготовки расчетных областей, дискретизация с шагом 50 м представляет собой компромисс между скоростью и точностью. При шаге 25 м вычислительное время возрастает в 4 раза, тогда как прирост точности не превышает 2 % (проверено на тестовых сценариях). Поэтому для обеспечения оперативности была выбрана расчетная область с шагом 50 м. Вместе с тем это является потенциальным источником погрешности: источник, смещенный на 25–30 м, может быть отнесен к соседнему узлу сетки.

Сравнение с литературными данными подтверждает конкурентоспособность подхода. Jiang et al. [8] сообщают о точности выше 90 % на речных разливах, однако их расчетная область создается вручную. Tao et al. [16] достигают высокой эффективности на распределенных системах, но геометрия акватории задается априорно. Данный метод полностью автоматизирует выделение границ посредством семантической сегментации [4]. Это сокращает время предобработки с 20–60 минут при ручной работе до 1–2 минут.

Автоматизация имеет свою цену. Качество сегментации зависит от разрешения снимка, облачности и бликов. Обработка более сотни сцен Sentinel 1–2 показала, что при облачности более 30 % точность бинарной маски падает до 85–88 %. Ошибки выделения контура, выражающиеся в сдвиге на 1–2 пикселя, приводят к смещению расчетной области и, как следствие, к ошибке идентификации до 50 м. В текущей реализации такие искажения не моделировались — это задача следующих этапов.

Границы применимости метода четко определяются принятыми допущениями. (1) Двумерная модель адекватна только для водоемов с интенсивным вертикальным перемешиванием. В стратифицированных озерах глубиной более 10 м с термоклином горизонтальная диффузия не описывает вертикальный градиент концентрации. Погрешность может превышать 30 %. (2) Модель пассивной примеси не учитывает химические превращения. Для pH это некорректно: кислотный сток нейтрализуется за счет буферных свойств воды. В синтетических сценариях pH задавался как консервативный трассер — упрощение, которое в реальных условиях снизит точность. (3) Поле скоростей течения предполагается стационарным. На практике при паводках или приливно-отливных явлениях гидродинамика изменяется в течение нескольких часов. Без калибровки по актуальным данным ошибка идентификации возрастет.

Источники погрешности, помимо перечисленных, включают выбор коэффициента диффузии во всех сценариях. В реальном водоеме он может изменяться в зависимости от ветра и турбулентности. При этом увеличение коэффициента диффузии в 2 раза смещает оценку источника на 30–50 м по течению. Коэффициент в работе задан как константа — это слабое место. Адаптивная оценка по данным наблюдений осталась за рамками исследования.

Еще одно ограничение — синтетический характер валидации. Наблюдаемое поле концентрации $C_{obs}(x, y)$ в экспериментах было свободно от шумов измерений, пропусков данных и неоднозначности спектральных индексов. В реальных условиях спутниковый снимок дает интегральную концентрацию в поверхностном слое, а не по всей глубине. Для растворенного кислорода и хлора это приемлемо, для pH — нет. Таким образом, заявленная точность 95 % — верхняя оценка. На реальных данных она ожидаемо снизится до 70–85 % в зависимости от гидрологических условий.

Надежность выводов заключается в том, что предложенный метод доказал принципиальную работоспособность. Он пригоден для оперативного применения в хорошо перемешанных водоемах — водохранилищах, каналах, равнинных реках — при известном или измеренном поле течений. Для стратифицированных или динамичных систем требуется переход к трехмерной модели и учет нестационарности. Практическая интерпретация результатов такова: алгоритм позволяет за 10–15 минут указать зону вероятного источника с радиусом неопределенности около 50 м. Этого достаточно для выездной проверки и отбора проб.

Перспективы развития связаны с заменой синтетических данных на реальные спутниковые снимки с одно-временными полевыми измерениями. Необходима также калибровка коэффициента диффузии по обратной задаче. Без этих шагов метод остается прототипом.

Заключение. Разработан и программно реализован алгоритм обратной идентификации источника аварийного сброса загрязняющих веществ в водный объект. Алгоритм объединяет два модуля: семантическую сегментацию спутниковых снимков (компьютерное зрение) и двумерную гидродинамическую модель переноса пассивной примеси.

Модуль компьютерного зрения автоматически выделяет акваторию. Время предобработки сокращено с 20–60 минут (ручное выделение) до 1–2 минут. Ошибки оператора исключены. Модуль гидродинамического моделирования решает уравнение адвекции-диффузии. Алгоритм обратной идентификации перебирает виртуальные источники и выбирает кандидата с минимальной среднеквадратической ошибкой (MSE) между модельным и наблюдаемым полями концентрации.

Верификация проведена на синтетических данных (300 испытаний для pH, растворенного O_2 и Cl^-). Алгоритм правильно определил координаты источника в 285 случаях. Точность составила 95 %.

Метод пригоден для оперативного применения в хорошо перемешанных водоемах (водохранилища, каналы, равнинные реки) при известном поле течений. Перспективы: адаптация к реальным спутниковым данным и калибровка коэффициента диффузии по обратной задаче.

Список литературы / References

1. Azeez Yusuf, O'Flynn D, White B, Holland L, Parle-McDermott A, Lawler J, et al. Monitoring of Emerging Contaminants of Concern in the Aquatic Environment: A Review of Studies Showing the Application of Effect-Based Measures. *Analytical Methods*. 2021;13(43):5120–5143. <https://doi.org/10.1039/d1ay01184g>
2. Jinyue Chen, Shuisen Chen, Rao Fu, Dan Lli, Hao Jiang, Chongyang Wang, et al. Remote Sensing Big Data for Water Environment Monitoring: Current Status, Challenges, and Future Prospects. *Earth's Future*. 2022;10(2):1–33. <https://doi.org/10.1029/2021EF002289>
3. Гусев А.В. Программа для автоматизированного расчета морфометрических характеристик водных объектов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ № 2025668927. 2025. 1 с. URL: <https://fips.ru/EGD/0b4cdf99-068b-4c27-8142-426a7df83ced> (дата обращения: 17.12.2025).
4. Gusev AV. *Software for Automated Calculation of Morphometric Characteristics of Water Bodies*. Certificate of State Registration of the RF Computer Program No. 2025668927. 2025. 1 p. (In Russ.) URL: <https://fips.ru/EGD/0b4cdf99-068b-4c27-8142-426a7df83ced> (accessed: 12.17.2025).
5. Гусев А.В. Программа для автоматизированной идентификации водных объектов на картографических схемах и спутниковых снимках. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ № 2025668441. 2025. 1 с. URL: <https://fips.ru/EGD/c7d3b1b1-22bb-4240-bbb8-7673e8998e54> (дата обращения: 17.12.2025).
6. Gusev AV. *Software for Automated Identification of Water Bodies on Cartographic Schemes and Satellite Images*. Certificate of State Registration of the RF Computer Program No. 2025668441. 2025. 1 p. (In Russ.) URL: <https://fips.ru/EGD/c7d3b1b1-22bb-4240-bbb8-7673e8998e54> (accessed: 12.17.2025).
7. Qinggai Wang, Shibe Li, Peng Jia, Changjun Qi, Feng Ding. A Review of Surface Water Quality Models. *The Scientific World Journal*. 2013;231768. <https://doi.org/10.1155/2013/231768>
8. Maksoud N, Mohamed MM. Digital Twins Applications in the Water Sector. *AIP Conference Proceedings*. 2023;2928(1):160014. <https://doi.org/10.1063/5.0170525>
9. Frincu RM. Artificial Intelligence in Water Quality Monitoring: A Review of Water Quality Assessment Applications. *Water Quality Research Journal*. 2025;60(1):164–176. <https://doi.org/10.2166/wqri.2024.049>

8. Dexun Jiang, Hao Zhu, Peng Wang, Jie Liu, Fengfan Zhang, Yuanlong Chen. Inverse Identification of Pollution Source Release Information for Surface River Chemical Spills Using a Hybrid Optimization Model. *Journal of Environmental Management*. 2021;294:113022. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113022>
9. Penenko A, Rusin E. Parallel Implementation of a Sensitivity Operator-Based Source Identification Algorithm for Distributed Memory Computers. *Mathematics*. 2022;10(23):4522. <https://doi.org/10.3390/math10234522>
10. Ражев А.О., Недоступ А.А. Разработка математической модели, технологии дополненной реальности и машинного зрения для задач автоматизации сбора данных в рыболовных хозяйствах. *Морские интеллектуальные технологии*. 2024;4(1):349–358. <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.041>
- Razhev AO, Nedostup AA. Development of a Mathematical Model, Augmented Reality Technology and Computer Vision for Automation of Data Collection in Fish Farms. *Marine Intellectual Technologies*. 2024;4(1):349–358. <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.041>
11. Ruo-Qian Wang, Pacheco-Crosetti G, Calderon CV, Cohen J, Smyth E. An Integrative Framework for AI-Supported Coastal Hydrodynamics Monitoring and Analysis. *Scientific Reports*. 2025;15(1):12403. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-94791-8> (accessed 20.01.2026)
12. Kun Shi, Yunlin Zhang, Boqiang Qin, Botian Zhou. Remote Sensing of Cyanobacterial Blooms in Inland Waters: Present Knowledge and Future Challenges. *Science Bulletin*. 2019;64(20):1540–1556. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2019.07.002>
13. Ruixiao Ma, Hao Han, Zhaoan Zhang. An Integrated Hydrological–Hydrodynamic Model Based on GPU Acceleration for Catchment-Scale Rainfall Flood Simulation. *Atmosphere*. 2025;16(7):809. <https://doi.org/10.3390/atmos16070809>
14. Mahmoud S Salem, Nashaat M Hussain Hassan, Marwa M Aly, Youssef Soliman, Peters RW, Mohamed K Mostafa. Integrating Deep Learning and Process-Based Modeling for Water Quality Prediction in Canals: CNN-LSTM and QUAL2K Analysis of Ismailia Canal. *Sustainability*. 2025;17(17):7743. <https://doi.org/10.3390/su17177743>
15. Sibren Loos, Chang Min Shin, Sumihar J, Kyunghyun Kim, Jaegab Cho, Weerts AH. Ensemble Data Assimilation Methods for Improving River Water Quality Forecasting Accuracy. *Water Research*. 2020;171:115343. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115343>
16. Fei Tao, He Zhang, Ang Liu, Nee AYC. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019;15(4):2405–2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>

Об авторах:

Андрей Вячеславович Гусев, аспирант кафедры «Экология и природоохранная деятельность» Российского государственного социального университета (129226, Российская Федерация, г. Москва, ул. Вильгельма Пика, д. 4, стр. 8), [SPIN-код](#), [ORCID](#), gusevandre2015@yandex.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Andrey V. Gusev, Postgraduate Student of the Department of Ecology and Environmental Protection, Russian State Social University (4, Bldg. 8, Vilgelma Pika St., Moscow, 129226, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), gusevandre2015@yandex.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 12.06.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 25.07.2026

Принята к публикации / Accepted 05.08.2026

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 537.531

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-3-256-265>

Оценка интенсивности электромагнитных излучений от смартфонов в режиме видеосвязи

Т.А. Будыкина , А.А. Блохин

Академия гражданской защиты МЧС России, г.о. Химки, Российская Федерация

✉ tbudykina@yandex.ru

EDN: KXPYFN

Аннотация

Введение. 20-е годы XXI века актуализировали проблему электромагнитного излучения (ЭМИ) при видео-конференц-связи (ВКС). Такие сервисы распространились из-за пандемийной самоизоляции, снижения цен смартфонов, мобильности студентов и работников. Ткани человека локально нагреваются при разговоре и видеосвязи, т.к. аппарат излучает неионизирующие электромагнитные радиоволны. Их влияние на организм описано в нескольких работах, однако рассматривается только ситуация аудиосозвона. Нет данных, насколько вредно ЭМИ при ВКС. Соответственно, невозможно обосновать рекомендации по безопасности видеосвязи, в частности по «защите расстоянием». Представленная работа восполняет эти пробелы. Цель — определить уровень ЭМИ от смартфонов при ВКС.

Материалы и методы. Излучение измерялось прибором ПЗ-41. Производитель — ООО «СКБ ПиТОН», г. Нижний Новгород. Антенна фиксировала максимальные и средние значения плотности потока энергии (ППЭ). Условия: ППЭ — 0,26–100 000 мкВт/см², частота при определении ППЭ — 2450 МГц, время усреднения параметра до вывода на табло — 1 минута. Тестировались смартфоны с операционными системами «Айос» (iOS) и «Андроид» (Android) с работающим и отключенным вайфаем (Wi-Fi). Измерялись показатели на расстоянии 0 и 15 см от верхнего и нижнего динамика. Провели по пять экспериментов.

Результаты исследования. При видеозвонках ЭМИ выше, чем при разговоре. Для каждого аппарата обобщили в таблицах максимальные и средние значения ППЭ в режиме видеосвязи с включенным и выключенным вайфаем. Получили по 40 показателей для каждого из четырех случаев (два аппарата и два режима) с минимумами и максимумами: 0,365 и 9,732; 3,813 и 72,136; 0,01 и 3,633; 0,781 и 30,371. Отметили данные с моделированием помех и плохим интернет-соединением. По каждому опыту вывели усредненные значения. ППЭ от «Айоса» оказалась выше, чем от «Андроида». Превышение по ППЭ_{средн} с вайфаем малоразлично (0,6) в 0 см от верхнего динамика и более 85 — в 15 см от нижнего. Абсолютные показатели невелики: 0,549 и 0,985 и 0,854 и 0,010 соответственно.

Обсуждение. Защита расстоянием срабатывает в 15 см от динамика с вайфаем (получены сходные ППЭ_{макс} и ППЭ_{средн}). Помехи и снижают, и повышают ППЭ. Закономерность не выявлена. Нестабильный интернет вдвое увеличил среднюю ППЭ. Вайфай снизил ППЭ в 3,1–26,9 раза для «Айоса» и в 3,8–167,5 раза для «Андроида» (из-за малого радиуса действия роутера смартфону не нужен мощный передатчик). Для «Айоса» высокие ППЭ фиксируются у нижнего динамика, для «Андроида» — у верхнего. Максимальное снижение ППЭ_{средн} продемонстрировал «Андроид»: с вайфаем в 15 см от нижнего динамика показатель сократился в 115 раз, у верхнего — в 167 раз.

Заключение. Держатели для гаджетов удаляют смартфон от человека и повышают безопасность ВКС. Сбой в интернет-связи усиливает излучение. В перспективе целесообразно изучить другие модели смартфонов и проработать нормирование ЭМИ при созвонах.

Ключевые слова: видео-конференц-связь по смартфону, плотность потока энергии при видеозвонках, электромагнитное излучение при видеозвонках, «защита расстоянием» при видеозвонках

Благодарности. Авторы выражают благодарность заведующему кафедрой пожарной безопасности Академии гражданской защиты МЧС России, кандидату военных наук, доценту Ляшенко Сергею Михайловичу за материальное обеспечение эксперимента — предоставление измерительного оборудования.

Для цитирования. Будыкина Т.А., Блохин А.А. Оценка интенсивности электромагнитных излучений от смартфонов в режиме видеосвязи. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2026;10(3):256–265. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-3-256-265>

Original Empirical Research

Assessment of Electromagnetic Radiation Intensity from Smartphones in Video Communication Mode

Tatyana A. Budykina , Andrey A. Blokhin 

Civil Defense Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Khimki, Russian Federation

✉ tbudykina@yandex.ru

Abstract

Introduction. The 2020s have brought the issue of electromagnetic radiation (EMR) in video conferencing (VC) to the forefront. Such services have become widespread due to pandemic-related self-isolation, falling smartphone prices, and the increased mobility of students and workers. Human tissues heat up locally during conversations and video calls because the device emits non-ionizing electromagnetic radio waves. Their effect on the body has been described in several studies, but only the situation of audio calls is considered. There is no data on how harmful EMR is in VC. Accordingly, it is impossible to substantiate recommendations for video communication safety, in particular for “protection by distance”. This study aims to fill this gap by determining the level of EMR emitted by smartphones during video conferences.

Materials and Methods. The radiation was measured using a PZ-41 device. The manufacturer was Special Design Bureau PiTON, located in Nizhny Novgorod. The antenna recorded the maximum and average values of the energy flux density (EFD). Conditions: EFD — 0.26–100,000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, frequency used to determine EFD — 2450 MHz, and the averaging time for the parameter before it was displayed on the screen — 1 minute. Smartphones with iOS and Android operating systems with and without Wi-Fi were tested. Measurements were taken at distances of 0 and 15 cm from the top and bottom speakers. Five experiments were conducted in each case.

Results. During video calls, EMR was higher than during a conversation. For each device, the maximum and average values of EFD in the video call mode with Wi-Fi enabled and disabled were summarized in tables. We obtained 40 indicators for each of the four cases (two devices and two modes), with minimum and maximum values: 0.365 and 9.732; 3.813 and 72.136; 0.01 and 0.633; 0.781 and 30.271. We noted the data with interference modeling and poor Internet connection. For each experiment, we derived average values. EFD from iOS turned out to be higher than from Android. EFD_{avg} excess with Wi-Fi was indistinguishable (0.6) in 0 cm from the top speaker and more than 85 in 15 cm from the bottom one. The absolute values were low: 0.549 and 0.985 and 0.854 and 0.010, respectively.

Discussion. Protection by distance worked at a distance of 15 cm from the speaker with Wi-Fi (similar EFD_{max} and EFD_{avg} values were obtained). Interference both reduced and increased EFD. There was no pattern. Unstable Internet doubled the average EFD. Wi-Fi reduced the EFD by a factor of 3.1–26.9 for iOS and by a factor of 3.8–167.5 for Android (due to the router’s short range, the smartphone did not need a powerful transmitter). For iOS, high EFDs were recorded at the bottom speaker; for Android — at the top one. Android demonstrated the maximum reduction in EFD_{avg}: with Wi-Fi 15 cm away from the bottom speaker, the value decreased by a factor of 115; at the top speaker, by a factor of 167.

Conclusion. Device holders distance the smartphone from the user and enhance the VC safety. A failure in Internet connection increases radiation. In the future, it would be advisable to study other smartphone models and work out the regulation of EMF during calls.

Keywords: video conferencing via smartphone, energy flux density during video calls, electromagnetic radiation during video calls, “protection by distance” during video calls

Acknowledgements. The authors would like to express their gratitude to the Head of the Fire Safety Department of the Civil Defense Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Candidate of Military Sciences, Associate Professor Sergey M. Lyashenko for his invaluable material support in conducting the experiment. He provided the necessary measuring equipment for our research.

For Citation. Budykina TA, Blokhin AA. Assessment of Electromagnetic Radiation Intensity from Smartphones in Video Communication Mode. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(3):256–265. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-3-256-265>

Введение. В 20-е годы XXI века актуализировалась проблема электромагнитного облучения участников видео-конференц-связи (ВКС). Глобальное массовое использование таких сервисов связывают в первую очередь с требованиями самоизоляции во время пандемии коронавирусной инфекции. В числе других причин — мобильность студентов и работников, распространение удаленного или гибридного режима работы, снижение розничных цен мобильных устройств с поддержкой видеосвязи. Трансформацию можно иллюстрировать таким примером. До пандемии общеизвестным было одно бесплатное решение. Время самоизоляции пополнило список сразу шестью продуктами с таким функционалом. Позже появились еще два [1].

С 2019 года для большей доступности видеосвязи используются программно-аппаратные терминалы, серверные системы, облачные сервисы, приложения для смартфонов. В российском сегменте удаленного общения лидируют «Яндекс Телемост», «ВК Звонки», «МТС Линк», Мах.

Возникающие во время ВКС неионизирующие электромагнитные радиоволны могут вызывать локальный нагрев тканей. Требуется детальной проработки вопрос, насколько это вредно. Как выяснили авторы представленной статьи, имеющиеся в открытом доступе публикации не учитывают массовое применение видеоконтента на мобильных устройствах. Отсюда гипотеза об усилении электромагнитного излучения (ЭМИ) от смартфонов при современных сценариях использования ВКС. С учетом сказанного выше целесообразно определить влияние Wi-Fi на значения ЭМИ. Именно эта проблема в литературе не освещается, хотя есть исследования по оценке влияния на организм человека мобильных телефонов в режиме разговора, то есть при целевом использовании аппарата. Никитина В.Н. и Вторникова Н.И. отмечают неблагоприятное для человека повышенное тепловое воздействие электромагнитного излучения [2]. В первую очередь неблагоприятное влияние сказывается на головном мозге [3], зрительном и слуховом анализаторах, щитовидной железе [4]. По некоторым данным, непосредственный контакт мобильного телефона с головой человека обуславливает риск отдаленных последствий и увеличивает вероятность опухолей мозга [5], болезни Альцгеймера, ранней деменции [6].

Хорсева Н.И. [7] отмечает утомление, значимые ухудшения показателей работоспособности, сенсомоторных реакций, утомления, когнитивных функций у детей и подростков из-за использования мобильной связи. Бельпом Д. и Рахманин Ю.А. доказывают, что мобильные телефоны — причина изменений в нейроразвитии и нейробиологическом поведении [8], а также нарушений памяти, обучения, внимания и поведенческих проблем у детей [9].

Прямой контакт устройства с головой человека однозначно объясняет выявленное негативное воздействие на нервную систему и анализаторы. Но есть и другие, неочевидные зависимости, которые требуют дальнейшего изучения. Так, использование мобильных телефонов более четырех часов в день сказывается на репродуктивности мужчин [10], и женщин [11].

Таким образом, можно утверждать, что внимание исследователей фокусируется на изучении рисков, связанных с разговорами по мобильной связи без наушников, когда аппарат соприкасается или почти соприкасается с головой. Не рассматривается ситуация, когда абонент пользуется видео-конференц-связью, не определяется ЭМИ для таких случаев. В рамках данной работы впервые предпринимается попытка устранить указанный пробел и впоследствии предложить рекомендации безопасности. Аналогичные изыскания не проводились. Цель исследования — определение уровня электромагнитного излучения от смартфонов во время сеанса видеосвязи через мобильный интернет и Wi-Fi.

Для достижения заявленной цели реализуются следующие задачи:

- определение величин максимальных и средних значений электромагнитного излучения (плотности потока энергии, ППЭ) на расстоянии 0 см и 15 см от верхних и нижних динамиков двух аппаратов (смартфонов) при сеансах видеосвязи;
- оценка влияния использования Wi-Fi на величину ЭМИ;
- выявление точек максимальных значений ЭМИ в смартфонах.

Материалы и методы. Уровень электромагнитного излучения от смартфонов измерялся прибором ПЗ-41. В комплект входят три антенны-преобразователя: АП-1, АП-2, АП-3. Высокочастотное электромагнитное поле преобразуется в постоянное напряжение, которое подается на измерительное устройство, обеспечивающее обработку информации и визуализацию параметров измеряемого электромагнитного поля (ЭМП) на табло. Производитель — ООО «СКБ ПиТОН», г. Нижний Новгород.

С помощью антенны АП-1 фиксировались максимальные и средние значения плотности потока энергии (ППЭ_{макс}, ППЭ_{средн}, мкВт/см²) при следующих условиях:

- время усреднения измеряемого параметра, выводимого на табло прибора, — 1 минута;
- диапазон измеряемых частот — 0,3–40 ГГц;
- плотность потока энергии — 0,26–100 000 мкВт/см²;
- частота для определения ППЭ — 2450 МГц.

Отметим, что российские операторы сотовой связи работают с абонентскими диапазонами от 790 МГц до 2700 МГц. Для стандартов передачи мобильных данных 4G (LTE) используется частота 2600 МГц [12]. При применении технологии Wi-Fi рабочая частота — 5150–5850 МГц.

На рис. 1 показана работа прибора ПЗ-41 по оценке ППЭ на частотах 2450 МГц и 5150 МГц с измерением максимальных и средних значений при экспозиции в течение 1 минуты.



Рис. 1. Интерфейс прибора ПЗ-41 при измерении ППЭ_{макс} и ППЭ_{средн} на частотах 2450 МГц и 5150 МГц:
 а — определение ППЭ_{макс} на частоте 2450 МГц, б — определение ППЭ_{средн} на частоте 2450 МГц, в — определение ППЭ_{макс} на частоте 5150 МГц, г — определение ППЭ_{средн} на частоте 5150 МГц

ППЭ измеряли на кафедре пожарной безопасности Академии гражданской защиты МЧС России на лабораторном стенде, имитирующим рабочую поверхность с прикрепленной масштабно-координатной бумагой. Смартфон крепился к диэлектрическому штативу в вертикальном положении (МУК 4.3.2501–09¹), а измерительный прибор с антенной — к специальному держателю. Антенна ПЗ-41 находилась на расстоянии 0 и 15 см от верхнего и нижнего динамика смартфона (рис. 2).

¹ Методические указания 4.3. Методы контроля. Физические факторы. Измерение электромагнитных полей персональных подвижных систем сотовой связи. Дата введения 2009-06-20. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200076309> (дата обращения: 13.07.2026).

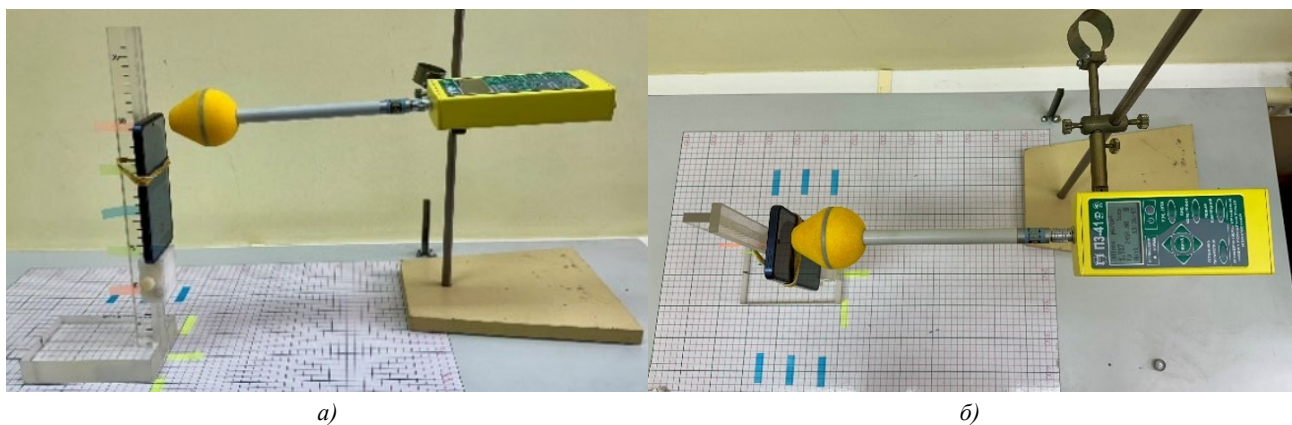


Рис. 2. Эксперименты на частотах 2450 МГц и 5150 МГц: а — измерение у верхнего динамика, вид сбоку; б — то же, вид сверху

Тестировались два мобильных устройства разных операторов связи, одного года выпуска. Каждое было в эксплуатации 2,5 года.

Характеристики аппарата 1:

- операционная система iOS (iPhone 14 Pro);
- версия iOS — 26.3.1(a);
- емкость памяти устройства — 128 ГБ;
- оператор связи — «Теле2».

Характеристики аппарата 2:

- операционная система Android (Samsung Galaxy A35 5G);
- версия — Android 14;
- емкость памяти устройства — 128 ГБ;
- оператор связи — «МТС».

Смартфоны тестировались:

- без включения модулей Bluetooth и NFC (всегда);
- с работающим модулем Wi-Fi (отдельно указано) и с отключенным Wi-Fi.

Видео передавалось с помощью сервиса «Яндекс Телемост». Продукт российской компании «Яндекс» для организации видео-конференц-связи работает с лета 2020 года на платформах [iOS](#) и [Android](#).

Для создания постоянного эфира видео-конференц-связи на планшете (аппарат 3) воспроизводилось обучающее видео со звуком. Контент с помощью смартфона 1 передавался смартфону 2. Аппараты 1 и 2 находились в удаленных друг от друга помещениях. Во время эксперимента моделировалось создающее помехи движение людей, их активная жестикуляция рядом с телефоном. В таблицах такие случаи помечаются *. Данные, полученные при плохом интернет-соединении, помечаются #.

При использовании Wi-Fi расстояние до роутера не превышало 10 м, с учетом преграды в виде железобетонной стены.

Рассматривалась гипотеза об усилении ЭМИ при работе смартфона в режиме видеосвязи. Для оценки ее корректности определялось ЭМИ аппаратов в режиме звонка, без отключения Wi-Fi.

При измерении ЭМИ аппарата 1 в режиме разговора получены следующие усредненные результаты:

- 0 см от нижнего динамика — $\text{ППЭ}_{\text{макс}} = 1,101 \text{ мкВт/см}^2$, $\text{ППЭ}_{\text{средн}} = 0,258 \text{ мкВт/см}^2$;
- 0 см от верхнего динамика — $\text{ППЭ}_{\text{макс}} = 0,633 \text{ мкВт/см}^2$, $\text{ППЭ}_{\text{средн}} = 0,221 \text{ мкВт/см}^2$;
- 15 см от нижнего динамика — $\text{ППЭ}_{\text{макс}} = 0,396 \text{ мкВт/см}^2$, $\text{ППЭ}_{\text{средн}} = 0,014 \text{ мкВт/см}^2$;
- 15 см от верхнего динамика — $\text{ППЭ}_{\text{макс}} = 0,276 \text{ мкВт/см}^2$, $\text{ППЭ}_{\text{средн}} = 0,027 \text{ мкВт/см}^2$.

Мы видим небольшие значения ППЭ в режиме разговора, особенно при удалении на расстояние 15 см. Полученные данные важны для сравнения результатов ППЭ в режиме видеозвонка.

Результаты исследования. В таблицах 1–4 представлены итоги измерений $\text{ППЭ}_{\text{макс}}$ и $\text{ППЭ}_{\text{средн}}$ в режиме видеозвонка в двух контрольных точках — на расстоянии 0 см и 15 см от верхнего и нижнего динамиков смартфонов на частоте 2450 МГц. В таблицах в соответствии с хронологией измерений приводятся по пять значений ЭМИ. Измерения 1–5 проводились в один день, в одной и той же последовательности.

Таблица 1

Максимальные и средние значения ППЭ аппарата 1 в режиме видеосвязи
через приложение «Яндекс Телемост» с Wi-Fi для приема сигнала

Измеряемое значение, мкВт/см ²	Номер эксперимента					Усредненное значение по опытам 1–5
	1	2	3	4	5	
Место измерения — 0 см от верхнего динамика						
ППЭ _{макс}	4,133	4,881	9,732 [#]	3,315	1,551*	4,722
ППЭ _{средн}	0,570	0,548	0,548	0,568	0,514*	0,549
Место измерения — 0 см от нижнего динамика						
ППЭ _{макс}	8,197	6,877*	6,752	5,299	3,674	6,159
ППЭ _{средн}	5,121	4,622*	4,981	0,436	0,365	3,105
Место измерения — 15 см от верхнего динамика						
ППЭ _{макс}	2,186	1,696	2,049	1,794	2,293	2,004
ППЭ _{средн}	0,638	0,927	0,952	1,130	1,262	0,982
Место измерения — 15 см от нижнего динамика						
ППЭ _{макс}	2,616	1,832	2,694	1,325	1,860	2,065
ППЭ _{средн}	0,651	0,904	0,922	0,887	0,904	0,854

Таблица 2

Максимальные и средние значения ППЭ аппарата 1 в режиме видеосвязи
через приложение «Яндекс Телемост» без Wi-Fi для приема сигнала

Измеряемое значение, мкВт/см²	Номер эксперимента					Усредненное значение по опытам 1–5
	1	2	3	4	5	
Место измерения — 0 см от верхнего динамика						
ППЭ _{макс}	28,110	20,412	20,033	19,321	27,372	23,049
ППЭ _{средн}	15,939	15,652	15,303	14,216	12,870	14,796
Место измерения — 0 см от нижнего динамика						
ППЭ _{макс}	62,679	61,704	69,125	60,016	72,136	65,132
ППЭ _{средн}	33,024	45,233	43,580	46,344	51,335	43,903
Место измерения — 15 см от верхнего динамика						
ППЭ _{макс}	5,317	5,548	6,002	7,201*	7,089	6,231
ППЭ _{средн}	4,002	4,227	4,493	4,146*	4,169	4,207
Место измерения — 15 см от нижнего динамика						
ППЭ _{макс}	7,767	5,735	6,532	5,866	7,252	6,630
ППЭ _{средн}	4,180	3,813	4,459	4,444	4,015	4,182

Таблица 3

Максимальные и средние значения ППЭ аппарата 2 в режиме видеосвязи
через приложение «Яндекс Телемост» с Wi-Fi для приема сигнала

Измеряемое значение, мкВт/см ²	Номер эксперимента					Усредненное значение по опытам 1–5
	1	2	3	4	5	
Место измерения — 0 см от верхнего динамика						
ППЭ _{макс}	2,136	3,126	3,633	2,398	1,656	2,589
ППЭ _{средн}	1,015	0,896	1,338	0,836	0,839	0,985
Место измерения — 0 см от нижнего динамика						
ППЭ _{макс}	0,655	1,566	0,947	0,838	0,661	0,933
ППЭ _{средн}	0,218	0,336	0,257	0,214	0,208	0,246
Место измерения — 15 см от верхнего динамика						
ППЭ _{макс}	0,574	0,472	0,544	0,360	0,002	0,392
ППЭ _{средн}	0,021	0,020	0,012	0,010	0,001	0,013
Место измерения — 15 см от нижнего динамика						
ППЭ _{макс}	0,268	0,602	0,490	0,073	0,094	0,305
ППЭ _{средн}	0,014	0,027	0,008	0,001	0,002	0,010

Таблица 4

Максимальные и средние значения ППЭ аппарата 2 в режиме видеосвязи
через приложение «Яндекс Телемост» без Wi-Fi для приема сигнала

Измеряемое значение, мкВт/см ²	Номер эксперимента					Усредненное значение по опытам 1–5
	1	2	3	4	5	
Место измерения — 0 см от верхнего динамика						
ППЭ _{макс}	25,587	30,371	19,764	17,900*	15,520	21,828
ППЭ _{средн}	14,640	14,718	11,432	9,015*	11,296	12,220
Место измерения — 0 см от нижнего динамика						
ППЭ _{макс}	3,283	3,281	3,096	3,596	4,734*	3,598
ППЭ _{средн}	1,819	1,408	1,677	2,126	2,250*	1,856
Место измерения — 15 см от верхнего динамика						
ППЭ _{макс}	3,599	3,394	2,996	3,026	3,794	3,362
ППЭ _{средн}	2,223	2,200	2,025	1,877	2,568	2,178
Место измерения — 15 см от нижнего динамика						
ППЭ _{макс}	1,905	2,163	3,000	2,994	2,382	2,489
ППЭ _{средн}	0,881	0,781	1,167	1,633	1,302	1,153

В таблице 5 сведены усредненные значения по пяти измерениям, представленным в таблицах 1–4, а также превышение показателей ППЭ, зафиксированное у смартфона на платформе iOS по сравнению с Android. Это превышение определяется как частное от деления большего значения на меньшее. Подчеркнем, что показатель iOS почти во всех экспериментах оказался выше, чем у Android.

Таблица 5

Усредненные значения ППЭ аппаратов 1 и 2 в режиме видеосвязи
через приложение «Яндекс Телемост» с Wi-Fi и без него

Измеряемый параметр, мкВт/см ²	Аппарат 1			Аппарат 2			Превышение показателей ППЭ iOS в сравнении с Android	
	Без Wi-Fi	С Wi-Fi	Превышение	Без Wi-Fi	С Wi-Fi	Превышение	Без Wi-Fi	С Wi-Fi
Место измерения — 0 см от верхнего динамика								
ППЭ _{макс}	23,049	4,722	4,9	21,828	2,589	8,4	1,1	1,8
ППЭ _{средн}	14,796	0,549	26,9	12,220	0,985	12,4	1,2	0,6
Место измерения — 0 см от нижнего динамика								
ППЭ _{макс}	65,132	6,159	10,6	3,598	0,933	3,9	18,1	6,6
ППЭ _{средн}	43,903	3,105	14,1	1,856	0,246	7,5	23,7	12,6
Место измерения — 15 см от верхнего динамика								
ППЭ _{макс}	6,231	2,004	3,1	3,362	0,392	8,6	1,9	5,1
ППЭ _{средн}	4,207	0,982	4,3	2,178	0,013	167,5	1,9	75,5
Место измерения — 15 см от нижнего динамика								
ППЭ _{макс}	6,630	2,065	3,2	2,489	0,305	8,2	2,7	6,8
ППЭ _{средн}	4,182	0,854	4,9	1,153	0,010	115,3	3,6	85,4

Обсуждение. Данные таблиц 1–5 позволяют сделать десять обоснованных утверждений.

1. У аппарата 1 при измерении на расстоянии 0 см от динамиков с использованием Wi-Fi более высокие значения ППЭ фиксируются у нижнего динамика (6,159 мкВт/см² и 3,105 мкВт/см²). Соответствующие показатели у верхнего динамика — 4,722 мкВт/см² и 0,549 мкВт/см². На расстоянии 15 см в значениях ППЭ_{макс} и ППЭ_{средн} нет принципиальных различий. Показатели для ППЭ_{макс} — 2,004 и 2,065; для ППЭ_{средн} — 0,982 и 0,854. Это подтверждает принцип безопасности «защита расстоянием». Интенсивные помехи вблизи смартфонов серьезно не повлияло на ППЭ, в отличие от нестабильного интернета, который вдвое увеличил среднее значение (таблица 1).

2. Для аппарата 1 без Wi-Fi на расстоянии 0 см получены сверхвысокие значения у нижнего динамика: ППЭ_{макс} — 65,132 мкВт/см², ППЭ_{средн} — 43,903 мкВт/см². У верхнего фиксируются показатели 23,049 и 14,796 соответственно, и они в 10 с лишним раз больше полученных с включенным Wi-Fi. На расстоянии 15 см значения ППЭ_{макс} и ППЭ_{средн} у нижнего динамика уменьшаются в 10 раз. Помехи почти не влияют на результат (таблица 2).

3. У аппарата 2 на расстоянии 0 см с Wi-Fi у верхнего динамика фиксируются значения 2,589 (максимальное) и 0,985 (среднее). Это больше, чем у нижнего (0,933 и 0,246 соответственно). На расстоянии 15 см от верхних и нижних динамиков не выявлены принципиальные различия. Для ППЭ_{макс} — 0,392 и 0,305; для ППЭ_{средн} — 0,013 и 0,010 (таблица 3).

4. У аппарата 2 без Wi-Fi при измерении на расстоянии 0 см фиксируются сверхвысокие значения у верхнего динамика 21,828 для ППЭ_{макс} и 12,220 для ППЭ_{средн}. Соответствующие результаты замеров у нижнего динамика — 3,598 мкВт/см² и 1,856. На расстоянии 15 см значения ППЭ_{макс} и ППЭ_{средн} уменьшаются в 5–7 раз у верхнего динамика и примерно в 1,5 раза — у нижнего. Установлено, что помехи могут как снижать, так и повышать ППЭ. Однако закономерность еще предстоит выяснить (таблица 4).

5. Использование технологии Wi-Fi в режиме видеосвязи позволяет снижать ППЭ_{макс} и ППЭ_{средн} в 3,1–26,9 раза для аппарата 1 и в 3,8–167,5 раза для аппарата 2 (таблица 5).

6. С использованием технологии Wi-Fi в режиме видеосвязи ППЭ_{средн} снижается более существенно, чем ППЭ_{макс}. Это верно для обоих аппаратов (таблица 5).

7. Более высокие значения ППЭ на расстоянии 0 см отметили у нижнего динамика аппарата 1 и у верхнего динамика аппарата 2. Это обусловлено конструктивными особенностями (таблица 5).

8. В сравнении с аппаратом 2 у аппарата 1 превышение ППЭ больше и доходит до 85 раз. Такой результат получили при измерениях у нижнего динамика на расстоянии 15 см с Wi-Fi (таблица 5).

9. Наибольшее снижение ППЭ_{средн} у аппарата 2 — в 115 раз и в 167 раз для нижнего и верхнего динамика соответственно. Такие показатели фиксируются на расстоянии 15 см с Wi-Fi (таблица 5).

10. При сбоях в интернет-сети значения ППЭ увеличиваются.

Полученные результаты подтверждают выдвинутую гипотезу об увеличении электромагнитного излучения при видеозвонках по смартфону. Проведенное исследование устраняет пробел в данной области знаний. Открываются перспективы многочисленных исследований по детализации и углублению мониторинга ЭМИ-излучения при использовании смартфона для ВКС, онлайн-игр, виртуальной и дополненной реальности и пр.

Значимым результатом исследования можно считать выявленное существенное снижение электромагнитного излучения при использовании технологии Wi-Fi на смартфоне в режиме видеосвязи. Это можно объяснить особенностями связи через Wi-Fi: благодаря малому радиусу действия роутера смартфону не нужен мощный передатчик.

Заключение. Экспериментально подтвержден принцип «защиты расстоянием»: при удалении от смартфона на 15 см электромагнитное излучение снижается. Значит, можно рекомендовать безопасный способ видеозвонков: следует использовать держатели для гаджетов, чтобы создать дистанцию между человеком и аппаратом, не носить устройство на теле, не прислонять к себе и удалять не менее чем на 15 см во время видеосвязи.

У разных моделей мобильных устройств высокие значения ЭМИ фиксируются в разных точках, что объясняется конструктивными особенностями смартфонов. Для аппарата на платформе iOS высокие значения обнаружили у нижнего динамика на платформе Android — у верхнего. Пользователям следует изучить конструкцию аппарата для формирования правил собственной безопасности. Необходимо продолжение исследований для построения полей ЭМИ персональных подвижных систем сотовой связи.

Доказано, что из-за особенностей работы передатчика сбой в интернет-связи ведет к увеличению значений плотности потока энергии, о чем следует уведомить пользователей.

Полученные результаты имеют практическое значение и открывают перспективы дальнейших изысканий. В их числе могут быть:

— построение полей пространственного распределения плотности потока энергии от смартфона в режиме видеосвязи,

— проведение аналогичных измерений с другими моделями смартфонов,

— разработка рекомендаций безопасной работы,

— нормирование ЭМИ при удаленном общении с помощью смартфонов.

Список литературы / References

1. Чернышова М.С. *Краткая история видеосвязи. Часть 2. От коммерческого премиум-сервиса до «карманной» технологии.* URL: <https://trueconf.ru/blog/news/history-of-video-conferencing> (дата обращения: 20.02.2026).

Chernyshova MS. *A Brief History of Video Communication. Part 2. From Commercial Premium Service to "Pocket" Technology.* (In Russ.) URL: <https://trueconf.ru/blog/news/history-of-video-conferencing> (accessed: 20.02.2026).

2. Никитина В.Н., Калинина Н.И., Дубровская Е.Н. Анализ зарубежных научных исследований о влиянии электромагнитных полей радиочастотного диапазона на здоровье населения (научный обзор). *Профилактическая и клиническая медицина.* 2023;3(88):15–23. URL: <https://elck.ru/3VRS2K> (дата обращения: 20.02.2026).

Nikitina VN, Kalinina NI, Dubrovskaya EN. On the Issue of the Influence of Electromagnetic Fields of the Radio Frequency Range on the Health of the Population (Review). *Preventive and Clinical Medicine*. 2023;3(88):15–23. (In Russ.) URL: <https://clck.ru/3VRS2K> (accessed: 20.02.2026).

3. Вторникова Н.И., Бабалян А.В., Карелин А.О., Иванов В.А. Оценка интенсивности электромагнитного излучения мобильных телефонов, воздействующего на голову человека. *Ученые записки СПбГМУ им. акад. И.П. Павлова*. 2017;24(4):75–81. <https://doi.org/10.24884/1607-4181-2017-24-4-75-81>

Vtornikova NI, Babalyan AV, Karelin AA, Ivanov VA. Evaluation of EMF Exposure of Mobile Phones on Human Head. *The Scientific Notes of the Pavlov University*. 2017;24(4):75–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.24884/1607-4181-2017-24-4-75-81>

4. Никитина В.Н., Калинина Н.И., Ляшко Г.Г., Дубровская Е.Н., Плеханов В.П. Методические подходы к измерению и оценке воздействия электромагнитных полей, создаваемых смартфонами. *Гигиена и санитария*. 2022;101(8):855–860. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-8-855-860>

Nikitina VN, Kalinina NI, Lyashko GG, Dubrovskaya EN, Plekhanov VP. Methodological Approaches to Measuring and Evaluating the Effects of Electromagnetic Fields Generated by Smartphones. *Hygiene and Sanitation*. 2022;101(8):855–860. (In Russ.) <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-8-855-860>

5. Sage C, Burgio E. Electromagnetic Fields, Pulsed Radiofrequency Radiation, and Epigenetics: How Wireless Technologies May Affect Childhood Development. *Child Development*. 2018;89(1):129–136. <https://doi.org/10.1111/cdev.12824>

6. Jin-Hwa Moon. Health Effects of Electromagnetic Fields on Children. *Clinical and Experimental Pediatrics*. 2020;63(11):422–428. <https://doi.org/10.3345/cep.2019.01494>

7. Хорсева Н.И., Григорьев Ю.Г., Григорьев П.Е. Оценка опасности ЭМП мобильных телефонов для детей и подростков. Итоги единственного в мире 14-летнего психофизиологического исследования. В: *Актуальные вопросы радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений: мат-лы всерос. конф.* Москва: Российский национальный комитет по защите от неионизирующих излучений; 2019. С. 148–151. ISBN 978-5-6041530-0-0. URL: http://bioemf.ru/conf/conf2/KHORSEVA_NI.pdf (дата обращения: 14.07.2026).

Khorseva NI, Grigoriev YuG, Grigoriev PE. Hazard Assessment of Electromagnetic Fields of Mobile Phones for Children and Teenagers. The Results of the World's Only Lasted 14–Years Physiological Studies. In: *Actual Issues of Radiobiology and Hygiene for Non-Ionizing Radiation Proceedings of Scientific Conference*. Moscow: Russian National Committee on Non-Ionizing Radiation Protection; 2019. P. 148–151. ISBN 978-5-6041530-0-0. (In Russ.) URL: http://bioemf.ru/conf/conf2/KHORSEVA_NI.pdf (accessed: 14.07.2026).

8. Belpomme D, Hardell L, Belyaev I, Burgio E, Carpenter DO. Thermal and Non-Thermal Health Effects of Low Intensity Non-Ionizing Radiation: An International Perspective. *Environmental Pollution*. 2018;242A:643–658. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.019>

9. Рахманин Ю.А., Онищенко Г.Г., Григорьев Ю.Г. Современные проблемы и пути обеспечения электромагнитной безопасности сотовой связи для здоровья населения. *Гигиена и санитария*. 2019;98(11):1175–1183. URL: https://www.rjhas.ru/jour/article/view/436?locale=ru_RU (дата обращения: 14.07.2026).

Rakhmanin YuA, Onishchenko GG, Grigoriev YuG. Contemporary Issues and the Ways of Ensuring Electromagnetic Safety of Mobile Communication to the Health of the Population. *Hygiene & Sanitation*. 2019;98(11):1175–1183. (In Russ.) URL: https://www.rjhas.ru/jour/article/view/436?locale=ru_RU (accessed: 14.07.2026)

10. Лифанова Р.З., Орлова В.С., Цетлин В.В. Влияние электромагнитного излучения радиодиапазона на организм в целом и структурные единицы (обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2021;100(2):123–128. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-2-123-128>

Lifanova RZ, Orlova VS, Tsetlin VV. Effects of Radiofrequency Electromagnetic Radiation on the Organism as a Whole and Structural Units (Literature Review). *Hygiene & Sanitation*. 2021;100(2):123–128. (In Russ.) <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-2-123-128>

11. Auvinen A, Feychting M, Ahlbom A, Hillert L, Elliott P, Schüz J, et al. Headache, Tinnitus and Hearing Loss in the International Cohort Study of Mobile Phone Use and Health (COSMOS) in Sweden and Finland. *International Journal of Epidemiology*. 2019;48(5):1567–1579. <https://doi.org/10.1093/ije/dyz127>

12. Верещако Г.Г. Проблемы репродукции у мужчин, вызванные использованием мобильного телефона. *Проблемы репродукции*. 2014;4:73–78. URL: <https://www.mediasphera.ru/issues/problemny-reproduktcii/2014/4/031025-72172014415?ysclid=mrkkz73bux271346667> (дата обращения: 14.07.2026).

Vereshchako GG. The Problems of Male Reproduction Due to the Use of Mobile Phone. *Russian Journal of Human Reproduction*. 2014;4:73–78. (In Russ.) URL: <https://www.mediasphera.ru/issues/problemny-reproduktcii/2014/4/031025-72172014415?ysclid=mrkkz73bux271346667> (accessed: 14.07.2026).

Об авторах:

Татьяна Алексеевна Будыкина, доктор технических наук, профессор кафедры «Пожарная безопасность» Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, Московская обл., г.о. Химки, мкр. Новогорск, Соколовская ул., 1) [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), tbudykina@yandex.ru

Андрей Александрович Блохин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Пожарная безопасность» Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, Московская обл., г.о. Химки, мкр. Новогорск, Соколовская ул., 1) [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), Blokhi-andrej@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Т.А. Будыкина: формулирование замысла исследования; выполнение эксперимента по определению плотности потока энергии от смартфона; проверка воспроизводимости результатов эксперимента; создание и подготовка рукописи статьи; построение табличных зависимостей; внесение замечаний и исправлений в рукопись.

А.А. Блохин: выполнение эксперимента по определению плотности потока энергии от смартфона; проверка воспроизводимости результатов эксперимента; создание и подготовка черновика рукописи статьи; построение табличных зависимостей; внесение замечаний и исправлений в рукопись.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Tatyana A. Budykina, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Fire Safety Department, Civil Defense Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia (1, Sokolovskaya Str., Novogorsk district, Khimki, Moscow Region, 141435, Russian Federation) [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), tbudykina@yandex.ru

Andrey A. Blokhin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Fire Safety Department, Civil Defense Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia (1, Sokolovskaya Str., Novogorsk district, Khimki, Moscow Region, 141435, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), Blokhi-andrej@yandex.ru

Claimed Contributorship:

TA Budykina: conceptualization, conducting an experiment to determine the energy flux density from the smartphone, verifying the reproducibility of the experiment's results, writing — original draft preparation, constructing tabular dependencies, making comments and corrections to the manuscript.

AA Blokhin: conducting an experiment to determine the energy flux density from a smartphone, verifying the reproducibility of the experiment's results, writing — original draft preparation, constructing tabular dependencies, making comments and corrections to the manuscript.

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 24.04.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 15.05.2026

Принята к публикации / Accepted 02.06.2026

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 629.3.079

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-3-266-276>

Мобильный технический модуль для производства композитного сорбента нефтепродуктов

В.В. Гаевский , И.В. Одинокова , И.Ю. Исаева ✉, Г.Ю. Остаева

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),

г. Москва, Российская Федерация

✉ irina-razumova-xim@yandex.ru

EDN: YWXXUA

Аннотация

Введение. В России ежегодно фиксируются тысячи случаев аварийных разливов нефтепродуктов, при этом значительная их часть происходит в труднодоступных регионах, включая Западную Сибирь, Арктическую зону и Дальний Восток. Нефтепользование на всех этапах сопровождается негативным воздействием на литосферу, гидрологический режим и биоразнообразие, а его интенсивность возрастает с увеличением масштабов деятельности нефтехимической и добывающей отраслей. Анализ научной литературы показывает, что для ликвидации таких разливов используются разнообразные сорбенты, применяются различные мобильные решения, однако при этом сохраняются проблемы, связанные с высокой стоимостью транспортировки, ограниченными сроками хранения, сложностями в подборе материалов под конкретный тип загрязнения и отсутствием технологических модулей, адаптированных к доставке в труднодоступные районы. Цель данного исследования заключается в переносе ранее разработанной технологической схемы получения композитного сорбента на мобильный носитель и в определении конструктивно-технологических параметров мобильного технологического модуля (МТМ) для оперативной ликвидации разливов нефтепродуктов.

Материалы и методы. В основу исследования положена ранее разработанная авторами стационарная схема получения композитного сорбента из дихлорэтана, поверхностно-активного вещества цетиламина, вермикулита и измельчённого пенополистирола (ПС). Технологический процесс включал в себя перевод пенополистирола в вязкотекучее состояние с помощью растворителя, введение минерального наполнителя и последующее высушивание сформированной смеси. Для проектирования мобильного технологического модуля были рассчитаны время производственного цикла, масса комплекса и площадь, занимаемая оборудованием. При расчётах учитывались элементы из фторопласта ПТФЭ марки Ф-4 по ТУ 6-05-810-88¹, шестерёнчатый насос BYD NYP-3.6, строительный фен Greenworks G24HG 24V, конденсатор, ёмкости, смесители, сушильная камера, жёлобы и гидравлическая арматура. В качестве мобильного носителя предложен автомобиль УАЗ 23632, выбранный с учётом проходимости, грузоподъёмности и размеров грузовой платформы.

Результаты исследования. Было установлено, что композитный сорбент может быть получен в мобильных условиях по ранее разработанной технологической схеме, включающей в себя растворение пенополистирола, введение наполнителя и сушку сформированной массы. Производственный цикл для партии из 20 листов сорбента размером 210×297×5 мм составил пять часов при сушке при температуре 22 °С и сократился до четырех часов при использовании строительного фена. Общая масса основных элементов мобильного комплекса без учёта компонентов сорбента составила 70 кг, а рабочая масса модуля с прекурсорами достигла 78 кг. Площадь, занимаемая основными элементами оборудования, составила 8900 см², что соответствует площади EUR-палеты (около 0,9 м²). Расчёты подтвердили возможность размещения всех компонентов мобильного технологического модуля на автомобиле УАЗ 23632. Также в процессе исследования было учтено, что минеральный наполнитель может использоваться повторно до трёх циклов, после чего потеря сорбционных свойств составляет 35 %.

Обсуждение. Полученные результаты показывают, что перевод стационарной схемы производства композитного сорбента в мобильный формат технически реализуем и соответствует задаче оперативного реагирования на аварийные разливы нефтепродуктов в труднодоступных районах. В отличие от решений, ориентированных

¹ ТУ 6-05-810-88. Заготовки из фторопласта-4. URL: <https://ftoroplast.com.ru/tu-6-05-810-88/> (дата обращения 10.06.2026)

© Гаевский В.В., Одинокова И.В., Исаева И.Ю., Остаева Г.Ю., 2026

на доставку готовых сорбентов, предлагаемый подход предусматривает транспортировку компонентов и изготовление материала непосредственно вблизи места применения, что снижает зависимость от логистики и условий хранения. Сопоставление с литературными данными подтверждает актуальность такого направления: мобильные технологии позволяют регулировать свойства сорбентов, сокращать транспортные издержки и уменьшать объём отходов за счёт регенерации материалов. Ограничением исследования является расчётно-проектный характер валидации: работоспособность модуля оценивалась на основе математического моделирования и сопоставления с аналогичным оборудованием. Практическое значение результатов состоит в подтверждении возможности размещения компактного производственного комплекса на транспортном средстве высокой проходимости без изменения базовой технологической схемы.

Заключение. В ходе исследования были рассчитаны ключевые параметры мобильного технологического модуля: продолжительность производственного цикла, масса оборудования и занимаемая площадь. Показано, что модуль массой 78 кг и площадью около 0,9 м² может быть установлен на автомобиль УАЗ 23632 и использован для получения композитного сорбента непосредственно в зоне аварийного разлива. Такое решение позволяет повысить оперативность в ликвидации загрязнений, сократить логистические издержки и снизить экологическую нагрузку за счёт уменьшения числа рейсов транспорта и количества переработанных отходов пенополистирола. Мобильный технологический модуль может быть рекомендован как элемент оборудования для ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов в труднодоступных районах.

Ключевые слова: мобильный технологический модуль, мобильное производство сорбентов, мобильные комплексы

Благодарности. Авторы выражают признательность за помощь в проведении исследований ОАО «ЦАСЭО» и НПП «Ареал».

Для цитирования. Гаевский В.В., Одинокова И.В., Исаева И.Ю., Остаева Г.Ю. Мобильный технический модуль для производства композитного сорбента нефтепродуктов. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2026;10(3):266–276. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-3-266-276>

Original Empirical Research

A Mobile Technical Module for the Production of Composite Sorbents for Petroleum Products

Vitaly V. Gaevskiy , Irina V. Odinkova , Irina Yu. Isaeva ✉, Galina Yu. Ostaeva 

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russian Federation

✉ irina-razumova-xim@yandex.ru

Abstract

Introduction. Thousands of oil spills are recorded in Russia every year, many of which occur in remote regions such as Western Siberia, the Arctic zone, and the Far East. Oil production at all stages has a negative impact on the lithosphere, hydrological regime, and biodiversity. This impact increases with the scale of petrochemical and mining activities. An analysis of the literature shows that various sorbents and mobile solutions are used to eliminate spills, but there are still challenges with high transportation costs, limited shelf life, difficulty in selecting the right material for a specific type of contamination, and a lack of technological modules that can be delivered to hard-to-reach areas. The aim of this research was to transfer the previously developed technology for producing a composite sorbent to a mobile vehicle, and to determine the design and technical parameters of a mobile technological module (MTM) for the prompt elimination of oil spills.

Materials and Methods. The study was based on a stationary scheme previously developed by the authors for producing a composite sorbent from dichloroethane, cetylamine surfactant, vermiculite, and shredded polystyrene foam. The process involved converting polystyrene foam to a viscous state with a solvent, adding mineral filler, and drying the mixture. To design a mobile technological module, we calculated the production cycle time, the weight of the complex, and the area occupied by the equipment. The calculations took into account elements made of PTFE-4 fluoroplastic according to TU 6-05-810-88², a BYD NYP-3.6 gear pump, a Greenworks G24HG 24V heat gun, a capacitor, containers, mixers, a drying chamber, chutes, and hydraulic fittings. UAZ 23632 was chosen as a mobile vehicle because of its off-road capabilities, cargo capacity, and cargo platform dimensions.

Results. It was established that the composite sorbent could be produced in mobile conditions using a previously developed technological process, which included dissolving polystyrene foam, adding a filler, and drying the formed mass. The production cycle for a batch of 20 sorbent sheets measuring 210×297×5 mm took five hours when drying at a temperature of 22°C, and was reduced to four hours by using a heat gun. The total mass of the main elements of the mobile complex, excluding the sorbent components, amounted to 70 kg, and the working mass of the module with

² TU 6-05-810-88. PTFE blanks. URL: <https://ftoroplast.com.ru/tu-6-05-810-88/> (accessed: 10.06.2026)

precursors reached 78 kg. The area occupied by the main equipment elements was 8900 cm², which corresponded to the area of a EUR-pallet (approximately 0.9 m²). The calculations confirmed that it was possible to place all components of the mobile technological module on a UAZ 23632 vehicle. During the study, it was also taken into account that the mineral filler could be reused for up to three cycles, after which the loss of sorption properties amounted to 35%.

Discussion. The research results demonstrated that converting the stationary production process for a composite sorbent into a mobile format was technically feasible and met the goal of providing a rapid response to emergency oil spills in hard-to-reach areas. Unlike solutions focused on delivering ready-made sorbents, the proposed approach involved transporting the components and producing the material directly near the spill site, which reduced the dependence on logistics and storage conditions. The comparison with literature data confirmed the relevance of this approach. Mobile technologies made it possible to customize the properties of the sorbent, reducing transportation costs and minimizing waste through material recovery. However, the limitations of this study included its design-based nature: the functionality of the module was assessed based on mathematical modeling and comparison with similar equipment. The practical significance of the results was that they confirmed the possibility of installing a compact production complex on an off-the-road vehicle without changing the basic process flow.

Conclusion. During the study, the key parameters of the mobile technological module were calculated: duration of the production cycle, weight of the equipment, and the occupied area. It has been shown that a module weighing 78 kg and with an area of approximately 0.9 m² can be mounted on a UAZ 23632 vehicle and used to produce a composite sorbent directly at the site of an emergency spill. This solution makes it possible to increase the efficiency of pollution cleanup, reduce logistics costs, and lower the environmental impact by reducing the number of transport trips and the amount of recycled polystyrene foam waste. A mobile technological module can be recommended as a component of equipment for eliminating emergency oil spills in hard-to-reach areas.

Keywords: mobile technological module, mobile production of sorbents, mobile complexes

Acknowledgements. The authors would like to express their gratitude for the assistance provided by the Center for Emergency Rescue and Ecological Operations and Research and Production Enterprise “AREAL”.

For Citation. Gaevskiy VV, Odnokova IV, Isaeva IYu, Ostaeva GYu. A Mobile Technical Module for the Production of Composite Sorbents for Petroleum Products. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(3):266–276. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-3-266-276>

Введение. Ежегодно в Российской Федерации регистрируются тысячи аварийных случаев разлива нефти и нефтепродуктов [1], большая часть их происходит в труднодоступных регионах Западной Сибири, Арктической зоны и Дальнего Востока [2]. Ликвидация таких разливов осложняется удалённостью объектов, недостаточной транспортной доступностью, суровыми природно-климатическими условиями и высокой стоимостью доставки к ним специализированных материалов и оборудования. В связи с этим проблема оперативного реагирования на загрязнение нефтепродуктами территорий имеет высокую экологическую, технологическую и организационную значимость.

Нефтепользование на всех стадиях жизненного цикла — от геологоразведочных работ и строительства буровых сооружений до бурения скважин, интенсификации добычи, подъёма флюида на поверхность, подготовки углеводородов к хранению и транспортировке — оказывает негативное воздействие на компоненты окружающей среды [3, 4]. Интенсивность данного воздействия определяется масштабами производственной деятельности, особенностями применяемых технологий и степенью устойчивости природных экосистем к антропогенной нагрузке. Основными последствиями влияния нефтепользования на окружающую среду являются деградация литосферы, нарушение гидрологического баланса и ущерб биоразнообразию.

Деградация литосферы проявляется в механическом нарушении почвенного покрова, уплотнении почв, формировании техногенных форм рельефа, образовании карьеров, провалов и общей трансформации природного ландшафта. Нарушение гидрологического баланса связано с загрязнением и истощением водоносных горизонтов, затоплением территорий промышленными стоками, а также ухудшением качества поверхностных вод вследствие повышения минерализации и увеличения содержания растворённых примесей. Ущерб биоразнообразию выражается в изменении видового состава экосистем, снижении их продуктивности, смещении ареалов отдельных видов и развитии процессов экологической деградации.

Особую опасность представляют аварийные разливы нефти и нефтепродуктов, поскольку они формируют кратковременные, но интенсивные пики антропогенного воздействия, локализованные в зоне происшествя. В труднодоступных районах негативные последствия таких аварий усиливаются из-за сложности своевременной доставки сорбентов и специализированного оборудования к месту загрязнения [5]. В этих условиях традиционная схема ликвидации разливов, основанная на транспортировке готовых сорбционных материалов со стационарных производств или складов, не всегда обеспечивает необходимую оперативность и экономическую эффективность.

Одним из перспективных направлений в решении названной проблемы является организация производства сорбентов непосредственно вблизи места аварийного разлива [6]. Это позволяет сократить время реагирования, снизить логистические затраты и адаптировать свойства сорбента к конкретным условиям загрязнения. Такой подход особенно актуален для удалённых территорий, куда доставка готовых материалов требует значительных временных и финансовых ресурсов.

В научной литературе достаточно подробно рассмотрены вопросы разработки сорбентов различного состава и назначения, включая биосорбенты [7], модифицированные полимерные материалы [8], композитные сорбенты и материалы, предназначенные для поглощения лёгких углеводородов, тяжёлых масел, эмульсий и многокомпонентных стоков [9]. Вместе с тем анализ существующих методов стационарного производства и последующей транспортировки готовых сорбентов показал, что они имеют ряд существенных ограничений. К ним относятся высокая стоимость доставки, которая в отдельных случаях может составлять до 60–80 % от конечной стоимости материала, ограниченный срок хранения некоторых сорбентов, особенно биосорбентов и модифицированных полимеров, сложность выбора материала под конкретный тип загрязнения, а также риск вторичного загрязнения при хранении, перевозке и последующем обращении с отработанными сорбентами [10].

Альтернативой традиционной модели является мобильное производство сорбентов, при котором к месту применения доставляется не готовый материал, а исходные реагенты или прекурсоры, из которых сорбент формируется непосредственно в полевых условиях. Такой подход позволяет уменьшить объём перевозимых материалов, повысить адаптивность технологического процесса и обеспечить получение материала с заданными характеристиками в зависимости от типа нефтепродукта, температуры окружающей среды, особенностей поверхности загрязнения и требований к последующей регенерации или утилизации.

Авторы ряда исследований предлагают технические решения, направленные на получение сорбентов в условиях, приближенных к полевым. Так, в работе Л. Хименко и соавторов описан способ получения сорбента на основе терморасширенного графита с использованием сорбентной шашки, состоящей из двух герметичных сообщающихся ёмкостей [11]. В одной из них размещаются интеркалированный графит и нагревательная смесь, обеспечивающая быстрое выделение тепла в результате высокоэкзотермической реакции и последующее расширение графита. Вторая ёмкость содержит иницирующий элемент, соединённый с автономным или мобильным источником тока. Такое устройство позволяет получать сорбент непосредственно на месте применения, что снижает зависимость процесса ликвидации разлива от централизованных поставок готового материала.

Перспективным направлением также является получение полиуретановых сорбентов, поскольку жидкие исходные компоненты при вспенивании обеспечивают значительное увеличение объёма конечного материала: из одной тонны жидких компонентов может быть получено 30–50 м³ пенополиуретана [12]. Кроме того, технология получения полиуретановых сорбентов позволяет изменять их ключевые свойства — плотность, соотношение открытых и закрытых пор, гидрофобность, олеофильность и механическую прочность. Эти параметры могут регулироваться изменением рецептуры, в том числе количеством воды и катализатора, а также введением кремнийорганических модификаторов или фторсодержащих добавок.

Подобный подход реализован в работе А.В. Мухамедшина и соавторов, где предложен сорбент на основе полиуретановой матрицы и растительного наполнителя [13]. Сочетание указанных компонентов обеспечивает высокую сорбционную возможность материала, способность быстро поглощать нефтепродукты и длительно удерживать поглощённый объём — от 15 минут до нескольких суток. Это облегчает транспортировку насыщенного сорбента к месту дальнейшей переработки. Кроме того, повышенная механическая прочность материала создаёт предпосылки для его многократной регенерации и извлечения поглощённой нефти. Авторы также отмечают возможность организации производства не только на стационарном предприятии, но и непосредственно на месте аварии с использованием мобильного комплекса, что позволяет сократить время реагирования и снизить логистические затраты.

Следовательно, мобильный технологический модуль может быть использован для получения сорбентов с различными физико-химическими и эксплуатационными характеристиками, адаптированными к конкретным видам нефтепродуктов и условиям проведения работ. Возможность оперативного изменения рецептуры и технологических параметров является важным преимуществом такого подхода, по сравнению с использованием заранее изготовленных и складированных материалов.

Практическая реализуемость мобильного производства сорбентов подтверждена исследованиями, посвящёнными получению сорбционного материала с использованием мобильного генератора [14]. По мнению их авторов, такое оборудование может применяться при ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов как на водной поверхности, так и на суше. Кроме того, мобильные модули могут оснащаться узлами регенерации сорбентов, включая системы механического отжима, центрифугирования, пароциклической десорбции и сушки в сорбере [15].

Авторами статьи [16] предложена установка для регенерации промасленных сорбентов, таких как цеолит и силикагель. Она включает в себя сорбер с нагревательными элементами, вакуумный насос, бак рабочей жидкости, накопительную ёмкость для масла и радиатор охлаждения, объединённые в едином металлическом корпусе. Такая конструкция обеспечивает извлечение нефтепродуктов из сорбционного материала и создаёт условия

для его повторного использования. Применение подобных технических решений позволяет снизить объём отходов, подлежащих утилизации, до 90 %, что повышает экологическую и экономическую эффективность ликвидационных мероприятий.

Несмотря на наличие разработок в области мобильного получения и регенерации сорбентов, их анализ показывает, что проблема создания эффективного мобильного комплекса для работы в труднодоступных районах остаётся недостаточно изученной. В частности, в литературе ограничено представлены сведения о переносе технологических схем получения композитных сорбентов на мобильный носитель, а также о конструктивно-технологических параметрах таких установок. Кроме того, многие известные решения характеризуются сложностью и трудоёмкостью производства, не предусматривают использования проходимой колёсной базы, необходимой для доставки оборудования и материалов непосредственно к месту аварийного разлива.

Таким образом, можно сделать вывод, что существует пробел в научных знаниях, заключающийся в недостаточной проработанности конструктивно-технологических решений, обеспечивающих мобильное производство композитного сорбента для оперативной ликвидации разливов нефтепродуктов в труднодоступных местах. Для заполнения этого пробела необходимо адаптировать ранее разработанные технологические схемы к мобильному исполнению, определить параметры используемого оборудования и дать оценку возможности его применения в полевых условиях.

Целью настоящего исследования является перенос ранее разработанной технологической схемы получения композитного сорбента на мобильный носитель и определение конструктивно-технологических параметров мобильного технологического модуля, предназначенного для оперативной ликвидации разливов нефтепродуктов.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать ранее разработанную технологическую схему получения композитного сорбента (растворение пенополистирола, введение наполнителя, сушка) и адаптировать её к мобильному исполнению — подобрать оптимальные режимы процесса (температура, продолжительность стадий, соотношения компонентов) с учётом ограничений по энергопотреблению, габаритам оборудования и условиям полевой эксплуатации.

2. Сформировать состав и компоновочную схему мобильного технологического модуля — определить перечень необходимого оборудования, его расположение, требования к несущей раме и крепёжным элементам, а также обеспечить соответствие габаритов модуля стандарту EUR-палеты для удобства транспортировки и развёртывания.

3. Определить конструктивно-технологические параметры МТМ — рассчитать и обосновать распределение нагрузки на транспортное средство, допустимые значения массы модуля, площади размещения, а также требования к транспортному носителю (на примере УАЗ 23632) для интеграции и безопасной эксплуатации оборудования.

4. Выполнить валидацию предложенного решения — с помощью математического моделирования и сопоставления с данными по аналогичным установкам подтвердить воспроизводимость технологии на оборудовании со сопоставимыми характеристиками, а также оценить возможность масштабирования и тиражирования модуля для использования другими исследовательскими и эксплуатационными коллективами.

Материалы и методы. Ранее авторами были разработаны алгоритм [17] и стационарная схема получения композитного сорбента [18] (рис. 1).

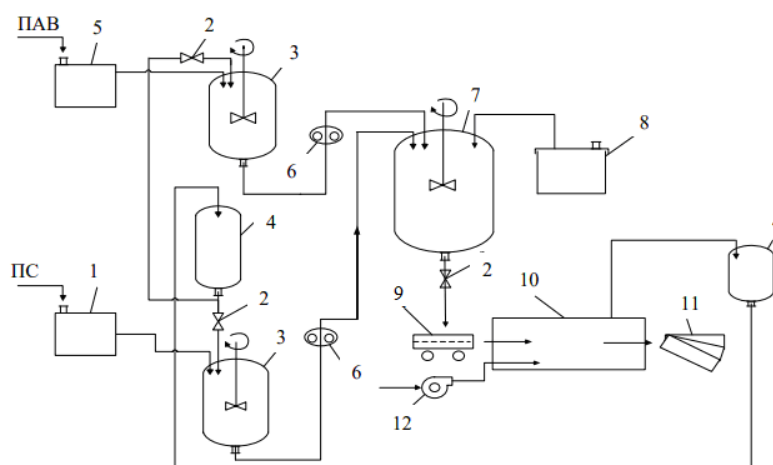


Рис. 1. Технологическая схема получения композитного сорбента: 1 — емкость для хранения пенополистирола (ПС); 2 — клапан, регулирующий подачу; 3 — смесители (дихлорэтан, пенополистирол) и (поверхностно-активное вещество (ПАВ), дихлорэтан); 4 — емкость для растворителя; 5 — емкость для хранения ПАВ; 6 — насос для подачи смеси; 7 — емкость для смешивания (поочередно подаются раствор ПАВ, минеральный наполнитель и дихлорэтан + пенополистирол); 8 — емкость для хранения минерального наполнителя; 9 — заготовка композитного сорбента; 10 — сушильная установка; 11 — пластины композитного сорбента; 12 — фен строительный [18]

Для получения композитного сорбента использовались следующие компоненты: дихлорэтан, ПАВ (цетиламин), вермикулит и измельченный пенополистирол. После утилизации композитного сорбента минеральный наполнитель использовался повторно. Количество циклов повторного использования равно трем. Установлено, что после третьего цикла происходит значительная потеря сорбционных свойств, которая составляет 35 %.

Для определения необходимой для размещения компонентов модуля площади произведен ряд расчётов: время производственного цикла, общая масса модуля и площадь, занимаемая мобильным технологическим модулем:

1. Расчёт времени производственного цикла проводился по формуле 1. Была выбрана формула для последовательного метода производства (когда операции выполняются одна за другой):

$$T_{\text{ц}} = n \times (t_1 + t_2 + \dots + t_n) + T_{\text{обсл.}} + T_{\text{прост.}}, \quad (1)$$

где n — размер партии (количество изделий); $t_1, t_2, \dots, t_n$ — время выполнения каждой операции, мин.; $T_{\text{обсл.}}$ — время обслуживания модуля, мин.; $T_{\text{прост.}}$ — время простоя, время, затрачиваемое на смену эксплуатационных жидкостей, расходного материала (замена фильтров и т. д.).

Таким образом, $T_{\text{ц}} = 1 \times (20 + 20 + 40 + 180) + 20 + 20 = 300$ мин., или 5 час.

Расчёт производился для партии, состоящей из 20 листов сорбента размером 210×297×5 мм. Время технологического цикла рассчитывалось при сушке при температуре 22 °С. При введении в схему строительного фена для просушивания листов композитного сорбента время сокращалось до четырех часов.

2. Расчет общей массы модуля. Его компоненты собирались из фторопласта (ПТФЭ) и пластин 2×300×300 мм марки Ф 4 по ТУ 6-05-810-88. В таблицах 1, 2 приведены характеристики этих пластин, предоставленные производителем.

Таблица 1

Характеристика пластин для производства емкостей объёмом до пяти литров и жёлоба

Технические характеристики из каталога производителя	
Толщина, мм	2
Ширина, мм	200
Длина, мм	300
Вес, кг	0,45
ГОСТ	ТУ 6-05-810-88 ³
Марка	Ф 4

Таблица 2

Характеристика пластин для производства емкостей объёмом до 20 литров

Технические характеристики из каталога производителя	
Толщина, мм	2
Ширина, мм	1000
Длина, мм	1000
Вес, кг	2,5
ГОСТ	ТУ 6-05-810-88 ⁴
Марка	Ф 4

Количество листов, используемых при сборе МТМ, представлено в таблице 3.

Таблица 3

Характеристики элементов модуля, собранных из ПТФЭ пластин

Название элемента	Количество листов	Вес элемента, кг
Емкость для хранения ПС	6	2,7
Емкость для растворителя	6	2,7
Смеситель (дихлорэтан, ПС)	6	2,7
Смеситель (ПАВ, дихлорэтан)	6	2,7
Емкость для хранения ПАВ	1	0,45
Емкость для смешивания всех компонентов	6	15
Емкость для хранения минерального наполнителя	6	2,7
Сушильная камера	8	20
Общий вес элементов, изготовленных из ПТФЭ пластин		49

³ ТУ 6-05-810-88. Заготовки из фторопласта-4. URL: <https://ftoroplast.com.ru/tu-6-05-810-88/> (дата обращения 10.06.2026)

⁴ Там же.

Кроме того, учитывалась еще масса насосов для подачи смеси (шестерёнчатый насос BYD NYP-3.6), строительного фена (Greenworks, G24HG, 24V без АКБ и ЗУ) и конденсатора. В сумме вес основных элементов мобильного технологического модуля без учёта компонентов композитного сорбента составил 65 кг.

Вес компонентов композитного сорбента из расчёта на объём пятилитровой емкости: дихлорэтан — 6,25 кг, вермикулит — 0,6 кг, пенополистирол измельчённый — 0,6 кг.

Таким образом рабочий вес МТМ — 78 кг.

3. Площадь, занимаемая МТМ, состоит из суммы площадей компонентов модуля (таблица 4) и допусков на размещение желобов и гидравлической арматуры.

Таблица 4

Площадь, занимаемая элементами модуля, собранными из ПТФЭ пластин

Название элемента	Площадь, см ²
Емкость для хранения ПС	450
Емкость для растворителя	900
Смеситель (дихлорэтан, ПС)	900
Смеситель (ПАВ, дихлорэтан)	900
Емкость для хранения ПАВ	56
Емкость для смешивания всех компонентов	2500
Емкость для хранения минерального наполнителя	900
Сушильная камера	1800
Общая площадь	8450

В рамках решения задачи по оперативной локализации и ликвидации разливов нефтепродуктов в труднодоступных районах критически важным является не только подбор эффективного сорбционного материала, но и обеспечение его доставки. В связи с этим авторами был рассмотрен для размещения мобильного технологического модуля автомобиль УАЗ 23632 (пикап). Данный тип транспортного средства был определён как оптимальный с точки зрения совокупности эксплуатационных характеристик: повышенная проходимость позволяет преодолевать участки со сложными рельефом и грунтами, типичными для отдалённых и труднопроходимых территорий, при этом грузоподъёмность и габариты грузовой платформы обеспечивают возможность размещения на ней технологического оборудования, необходимого для получения композитного сорбента в полевых условиях.

Результаты исследования. В ходе проведенных экспериментов получен композитный сорбент в соответствии с ранее разработанной авторами технологической схемой. Процесс включал в себя следующие последовательные стадии: перевод пенополистирола в вязкотекучее состояние посредством воздействия растворителя, введение минерального наполнителя в сформированный полимерный студень и последующая сушка полученной композиции до стабилизации массы и достижения требуемых физико-механических характеристик.

Производственный цикл для партии, состоящей из 20 листов сорбента номинальным размером $210 \times 297 \times 5$ мм, составил четыре часа при использовании в качестве источника нагрева строительного фена. Указанная продолжительность отражает суммарное время, включающее в себя стадии растворения пенополистирола, равномерного распределения наполнителя в матрице, формования листов и их сушки. Контроль за завершением сушки осуществлялся путем гравиметрического анализа по стабилизации массы образцов при выдержке в течение 15 минут.

Масса мобильного технологического модуля в полной комплектации, включающей в себя конструктивные элементы, технологическое оборудование, расходные материалы и прекурсоры, необходимые для производства сорбента, составила 78 кг. Данный показатель учитывает массу несущей рамы, нагревательных устройств, ёмкостей для растворителя и прекурсоров, а также средств фиксации и транспортировки оборудования. Распределение массы по осям транспортного средства (УАЗ 23632) при размещении МТМ на грузовой платформе соответствует допустимым нормативам и не превышает 30 % от максимальной грузоподъёмности автомобиля.

Габаритные характеристики МТМ обеспечивают его компактное размещение: занимаемая площадь соответствует стандарту EUR-палеты и составляет $0,9 \text{ м}^2$ (1200×800 мм). Такая компоновка позволяет эффективно использовать рабочее пространство грузовой платформы, обеспечивает удобство погрузочно-разгрузочных операций и возможность быстрой развёртки модуля в полевых условиях. При этом сохраняется доступ к его основным узлам для технического обслуживания и контроля параметров процесса.

Дополнительно были зафиксированы вспомогательные параметры технологического процесса: температура нагрева при сушке поддерживалась в диапазоне $60\text{--}70^\circ\text{C}$, что исключало термическую деструкцию полимерной матрицы и обеспечивало равномерное удаление растворителя. Степень однородности распределения наполнителя в объёме полимерной матрицы оценивалась визуально и методом оптической микроскопии — отмечено отсутствие крупных агломератов и равномерное распределение частиц минерального наполнителя по сечению листа.

Обсуждение. Полученные в ходе исследования результаты подтверждают реализуемость предложенного авторами способа получения композитного сорбента в мобильном исполнении, а также демонстрируют соответствие характеристик МТМ требованиям транспортировки и эксплуатации в условиях ограниченного пространства и сложной дорожной инфраструктуры.

Доказана техническая реализуемость размещения всех компонентов сорбционного комплекса на платформе выбранного транспортного средства (УАЗ 23632). При компоновке учитывались не только габаритные размеры оборудования, но и требования к устойчивости при транспортировке, балансировке нагрузки на оси автомобиля, а также к обеспечению доступа для обслуживания агрегатов в условиях ограниченного пространства. Результаты расчётов свидетельствуют о том, что суммарная масса оборудования, включая расходные материалы и элементы крепления, не превышает допустимую грузоподъёмность УАЗ 23632, а распределение нагрузки соответствует требованиям безопасной эксплуатации.

Важным аспектом исследования стали результаты проведенной валидации разработанного МТМ с позиции его воспроизводимости и масштабируемости. Проверка возможности использования модуля проводилась в два этапа: посредством математического моделирования рабочих режимов оборудования и путём сопоставления результатов с данными, полученными на аналогичных образцах техники. Моделирование позволило оценить устойчивость технологических параметров (в том числе производительности и качества получаемого сорбента), это позволяет в будущем рассматривать различные варианты эксплуатации в различных климатических зонах и дорожных условиях.

Сопоставление с экспериментальными данными по существующим установкам подтвердило воспроизводимость ключевых показателей процесса при использовании оборудования с сопоставимыми техническими характеристиками.

Расчётные данные свидетельствуют о том, что для достижения целевых показателей работы МТМ достаточно воспроизвести установку с соблюдением заданных технических параметров — производительности, энергопотребления, температурно-временных режимов и соотношений компонентов сырья. При этом установлено, что технологический процесс получения композитного сорбента не является критичным для конструктивных особенностей отдельных агрегатов, входящих в состав модуля, определяющими факторами здесь выступают именно выходные параметры оборудования (расход, температура, давление, время контакта фаз), а не их конкретная реализация. Это существенно расширяет потенциал тиражирования предложенной схемы: исследователи и эксплуатационные службы могут адаптировать состав оборудования под имеющиеся ресурсы при условии сохранения регламентированных технологических режимов.

Авторами доказано, что выбор платформы УАЗ 23632 в сочетании с модульным принципом компоновки оборудования и воспроизводимостью технологического процесса обеспечивает высокую операционную гибкость МТМ и подтверждает его пригодность для применения в условиях, где традиционные методы ликвидации разливов оказываются неэффективными или технически невыполнимыми.

Заключение. В ходе проведенного исследования были рассчитаны время производства композитного сорбента, общая масса мобильного модуля и площадь, занимаемая технологическим оборудованием. Применение МТМ на практике обеспечит мобильность, исключит затраты на доставку сорбента, снизит логистические издержки и минимизирует экологическую нагрузку за счёт сокращения числа транспортных рейсов и связанных с ними выбросов CO₂. Переработка отходов пенополистирола также позволит уменьшить негативное влияние на окружающую среду. Эти выводы подтверждают полученный результат: разработанный авторами мобильный технологический модуль может быть использован для ликвидации разливов нефтепродуктов в труднодоступных районах и может быть рекомендован в качестве оборудования для ликвидации аварийных ситуаций.

Список литературы / References

1. Невская М.А., Беляев В.В., Пастернак С.Н., Виноградова В.В., Шагидулина Д.И. Оценка потенциального ущерба почвам от аварийных разливов нефти и нефтепродуктов на территории Арктического региона. *Север и рынок: формирование экономического порядка*. 2024;27(3):107–122. <https://doi.org/10.37614/2220-802X.3.2024.85.007>
2. Мелкозеров В.М., Ковалёва М.А. Ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов на водных акваториях Арктики. *Цифровое моделирование экономики*. 2024;3:65–70. URL: <https://scholar.sfu.ru/author/0572277> (дата обращения: 10.06.2026).
3. Melkozerov VM, Kovaleva MA. Elimination of Emergency Oil and Petroleum Product Spills in the Arctic Waters. *Tsifrovoe Modelirovanie Ekonomiki*. 2024;3:65–70. (In Russ.) URL: <https://scholar.sfu.ru/author/0572277> (accessed: 10.06.2026).

3. Захарова Е.А., Мурко Е.В. Влияние современных методов интенсификации добычи углеводородов на состояние окружающей среды. *Актуальные вопросы развития науки и технологий*. 2024;106–132. URL: <https://clck.ru/3VG2Ya> (дата обращения: 10.06.2026).

Zakharova EA, Murko EV. The Influence of Modern Methods of Intensification of Hydrocarbon Production on the State of the Environment. *Current Issues in the Development of Science and Technology*. 2024;106–132. (In Russ.) URL: <https://clck.ru/3VG2Ya> (accessed: 10.06.2026).

4. Коваль Ю.Н., Мартинович Н.В. Оптимизация и автоматизация производства сорбирующих средств и их внесения на загрязнённые и рекультивируемые почвы. *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2026;2(329):19–26. URL: <https://journal.gubkin.ru/journals/protection/2026/2-329/19-26/> (дата обращения: 10.06.2026).

Koval YuN, Martinovich NV. Optimization and Automation of Sorbents Production and Application at Contaminated and Reclaimed Soils. *Environmental Protection in Oil and Gas Complex*. 2026;2(329):19–26. (In Russ.) URL: <https://journal.gubkin.ru/journals/protection/2026/2-329/19-26/> (accessed: 10.06.2026).

5. Наумова Т., Наумов А., Котов Ю. Обзор основных методов борьбы с разливами нефти в водной среде и оценка их эффективности. *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2023;6:16–29. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2023_6_2_16

Naumova TA, Naumov AG, Kotov YuS. Overview of Major Water Oil Spill Management Techniques and Evaluation of Their Efficiency. *Aquatic Bioresources & Environment*. 2023;6:16–29. (In Russ.) https://doi.org/10.47921/2619-1024_2023_6_2_16

6. Васильева Ж.В., Тришина А.С. Оценка эффективности органических материалов в качестве сорбентов для ликвидации аварийных разливов нефти в условиях арктической акватории. *Вестник МГТУ*. 2024;27(2):142–157. URL: <https://vestnik.mauniver.ru/show.shtml?art=2217> (дата обращения: 10.06.2026).

Vasileva ZhV, Trishina AS. Assessing the Effectiveness of Local Organic Materials as Sorbents for Oil Spill Response in Arctic Waters. *MSTU Vestnik*. 2024;27(2):142–157. (In Russ.) URL: <https://vestnik.mauniver.ru/show.shtml?art=2217> (accessed: 10.06.2026)

7. Давлетшин Р.Р., Соколов А.В. Способ получения пенополиуретанового сорбента для сбора нефти и нефтепродуктов. Патент РФ, № 2732185. 2020.

Davletshin RR, Sokolov AV. Method for Producing Polyurethane Foam Sorbent for Collecting Oil and Petroleum Products. RF Patent, No. 2732185. 2020. (In Russ.)

8. Sirviö JA. Fabrication of Regenerated Cellulose Nanoparticles by Mechanical Disintegration of Cellulose after Dissolution and Regeneration from a Deep Eutectic Solvent. *Journal of Materials Chemistry A*. 2019;7(2):755–763. <https://doi.org/10.1039/C8TA09959F>

9. Толстов А.М., Наумова Ю.А. О перспективах применения полимерных материалов для сорбентов, предназначенных для очистки воды от нефтепродуктов. *Вестник ВГУИТ*. 2023;85(1):240–248. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2023-1-240-248>

Tolstov AM, Naumova YA. On the Prospects for the Use of Polymeric Materials for Sorbents Intended for Water Purification from Oil Products. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2023;85(1):240–248. (In Russ.) <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2023-1-240-248>

10. Гудыма В.Я., Майоренко Д.И. Сорбенты при очистке нефтяного загрязнения на участке моделируемой аварии на 995 км перегона ст. Дельбичинда — ст. Дабан ВСЖД. *Молодой ученый*. 2019;15(253):166–170. URL: <https://moluch.ru/archive/253/57993> (дата обращения: 10.06.2026).

Gudyma VYa, Maiorenko DI. Sorbents Used for Cleaning Up Oil Contamination at the Site of a Simulated Accident on the 995-km Section Between Delbichinda Station and Daban Station on the Eastern Siberian Railway. *Molodoi Uchenyi*. 2019;15(253):166–170. (In Russ.) URL: <https://moluch.ru/archive/253/57993> (accessed: 10.06.2026).

11. Хименко Л.Л., Ильин А.Н., Минченко Л.А., Язев А.С., Смирнов Д. В., Исаев О. Ю. Способ получения сорбента в полевых условиях и устройство для его реализации. Патент РФ, № RU 2771413C1. 2021.

Khimenko LL, Il'in AN, Minchenko LA, Yazev AS, Smirnov DV, Isaev OYu. A Method for Producing a Sorbent in Field Conditions and a Device for Implementing It. RF Patent, No. RU 2771413C1. 2021. (In Russ.)

12. Васильева В.С., Выдумчик С.В., Гавриленко О.О., Ксенофонов М.А. Сорбент Пенопурм — инновационный продукт коммерческого назначения. В: *Сборник материалов 2-го Белорусско-Латвийского форума «Наука, инновации, инвестиции»*. Минск, 11–12 декабря 2014 года. Минск: Белорусский национальный технический университет; 2014. С. 67–69. URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/41488> (дата обращения: 10.06.2026).

Vasileva VS, Vydumchik SV, Gavrilenko OO, Ksenofontov MA. Penopurm Sorbent — An Innovative Commercial Product. In: *Proceeding the 2nd Belarusian-Latvian Forum “Science, Innovation, Investment”*. Minsk, 11–12 December, 2014. Minsk: Belarusian National Technical University; 2014. P. 67–69. (In Russ.) URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/41488> (accessed: 10.06.2026).

13. Зенитова Л.А., Мухамедшин А.В., Огородникова А.В., Чикина Н.С. *Полиуретановый сорбент углеводородов и способ очистки водных сред и твердых поверхностей от углеводородных загрязнений*. Патент РФ, № 2345836 С1. 2009.

Zenitova LA, Mukhamedshin AV, Ogorodnikova AV, Chikina NS. *Polyurethane Sorbent for Hydrocarbons and a Method for Cleaning Aqueous Media and Solid Surfaces from Hydrocarbon Contaminants*. RF Patent, No. 2345836 C1. 2009. (In Russ.)

14. Терещенко М.Д., Хименко Л.Л., Язев А.С., Исаев О.Ю., Минченко Л.А., Ильин А.Н. Мобильный генератор сорбента, применяемый для ликвидации аварийных разливов нефти. *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*. 2022;(71):182–190. URL: <https://clck.ru/3VG3Pk> (дата обращения: 10.06.2026).

Tereshchenko MD, Khimenko LL, Yazev AS, Isaev OYu, Minchenko LA, Ilyin AN. Mobile Sorbent Generator Used for Oil Spill Response. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*. 2022;(71):182–190. (In Russ.) URL: <https://clck.ru/3VG3Pk> (accessed: 10.06.2026).

15. Скидан В.И., Бойчук В.И., Даниленко А.П. *Установка для регенерации сорбента*. Патент РФ, № 75958U1, 2008.

Skidan VI, Boichuk VI, Danilenko AP. *Sorbent Regeneration Unit*. RF Patent, No. 75958U1, 2008. (In Russ.)

16. Васильев С.И., Мелкозеров В.М., Вельп А.Я., Гарбунова Л.Н., Саначева Г.С., Федотова А.С. Технология сорбционной и биологической очистки биосферы от загрязнений нефтепродуктами. *Системы. Методы. Технологии*. 2011;11:168–179. URL: <https://clck.ru/3VG3Z9> (дата обращения: 10.06.2026).

Vasiliev SI, Melkozerov VM, Velp AY, Gorbunova LN, Sanacheva GS, Fedotova AS. Technique of Sorption and Biological Cleaning of Biosphere from Oil Products Pollution. *Systems. Methods. Technologies*. 2011;11:168–179. (In Russ.) URL: <https://clck.ru/3VG3Z9> (accessed: 10.06.2026).

17. Исаева И.Ю., Одиноква И.В., Остаева Г.Ю., Моренко И.В. Композитный сорбент из природного сырья и полимерного отхода: оптимизация состава. В: *Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные проблемы региональной экологии»*. Бирск: Уфимский университет науки и технологий; 2024. С. 12–16.

Isaeva IYu, Odinokova IV, Ostaeva GYu, Morenko IV. Composite Sorbent from Natural Raw Materials and Polymer Waste: Composition Optimization. In: *Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation “Modern Problems of Regional Ecology”*. Birsk: Ufa University of Science and Technology; 2024. P. 12–16. (In Russ.)

18. Isaeva IYu, Odinokova IV, Ostaeva GYu, Eliseeva EA. Combustion Products of Polymer Waste as a Source of Environmental Pollution. *Polymer Science, Series D*. 2023;16:627–630. <https://doi.org/10.1134/S1995421223030127>

Об авторах:

Виталий Валентинович Гаевский, доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобили» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (125319, Российская Федерация, г. Москва, Ленинградский проспект, 64), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), vit-life@rambler.ru

Ирина Вячеславовна Одиноква, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (125319, Российская Федерация, г. Москва, Ленинградский проспект, 64), [SPIN-код](#), [ORCID](#), odinokova_iv@mail.ru

Ирина Юрьевна Исаева, старший преподаватель кафедры ДСМ и ХТ Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (125319, Российская Федерация, г. Москва, Ленинградский проспект, 64), [SPIN-код](#), [ORCID](#), irina-razumova-xim@yandex.ru

Галина Юрьевна Остаева, кандидат химических наук, доцент кафедры ДСМ и ХТ Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (125319, Российская Федерация, г. Москва, Ленинградский проспект, 64), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), galinaostaeva@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

В.В. Гаевский: формулирование замысла / идеи исследования, его целей и задач.

И. В. Одиноква: критический анализ черновика рукописи, формулировка замечаний и уточнений, проверка данных исследования.

И.Ю. Исаева: написание черновика рукописи, перевод ее на иностранный язык.

Г.Ю. Остаева: проверка воспроизводимости результатов экспериментов и исследования в рамках основных или дополнительных задач работы.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

About the Authors:

Vitaly V. Gaevskiy, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Automobiles, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) (64, Leningradsky Ave., Moscow, 125319, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), vit-life@rambler.ru

Irina V. Odnokova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Hydraulics, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) (64, Leningradsky Ave., Moscow, 125319, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), odinokova_iv@mail.ru

Irina Yu. Isaeva, Senior Lecturer of the Department of Road and Construction Materials and Chemical Technologies, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) (64, Leningradsky Ave., Moscow, 125319, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), irina-razumova-xim@yandex.ru

Galina Yu. Ostaeva, Associate Professor of the Department of Road and Construction Materials and Chemical Technologies, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) (64, Leningradsky Ave., Moscow, 125319, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), galinaostaeva@mail.ru

Claimed Contributorship:

VV Gaevskiy: conceptualization.

IV Odnokova: writing — review & editing, comments and clarifications, data verification.

IYu Isaeva: writing — original draft preparation and its translation into a foreign language.

GYu Ostaeva: verification of the reproducibility of experimental results, research.

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 19.05.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 17.06.2026

Принята к публикации / Accepted 01.07.2026

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



УДК 669.1:66.04

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-3-277-284>

Геометрические параметры структуры стали 14Г2 как материала с высокой баллистической стойкостью

В.Н. Пустовойт , Ю.В. Долгачев , И.В. Иванков

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

✉ ydolgachev@donstu.ru

EDN: GBFWHH

Аннотация

Введение. Повышение баллистической стойкости броневых материалов представляет собой актуальную научно-техническую задачу, обусловленную необходимостью разработки защитных материалов, способных эффективно сопротивляться высокоскоростному ударному воздействию. При высокоскоростном нагружении порядка 10^3 м/с гомогенные изотропные стали, обеспечивающие защитные свойства за счёт сочетания твёрдости и вязкости, демонстрируют ограниченную эффективность: как правило, наблюдается либо хрупкое разрушение, либо сквозное пробитие без существенного рассеяния энергии. Перспективным альтернативным подходом является применение гетерогенных и анизотропных материалов, имеющих более сложную организованную структуру, способную изменять траекторию распространения трещин и повышать энергоёмкость разрушения. К таким материалам относятся естественные феррито-мартенситные композиты, формируемые в сталях при закалке из межкритического интервала температур (ЕФМК). В настоящее время активно исследуются ЕФМК-стали, получаемые закалкой из межкритического температурного интервала. Показано, что варьирование температуры закалки изменяет объёмное соотношение слоёв пластичного феррита и высокопрочного мартенсита, что, в свою очередь, оказывает влияние на механические свойства материала. Однако существующие исследования выполнены преимущественно в условиях статического растяжения или изгиба. При баллистическом нагружении, характеризующемся экстремально высокими скоростями деформации, механизмы торможения трещины могут принципиально отличаться. При этом на первый план выходят не столько прочностные характеристики фаз, сколько геометрические параметры структуры: ориентация, длина и толщина слоёв, а также их соотношение. В настоящее время отсутствуют систематические данные о том, какие именно структурные характеристики ЕФМК являются определяющими для баллистической стойкости и каковы их оптимальные значения. В связи с этим цель настоящего исследования заключается в определении геометрических параметров структуры ЕФМК-сталей, обеспечивающих эффективное применение данного материала в устройствах броневой защиты.

Материалы и методы. Образцами для исследования служили пластины из стали 14Г2 размером $140 \times 70 \times 7$ мм. Формирование структуры ЕФМК осуществляли путём закалки из межкритического температурного интервала, при этом исходной являлась строчечная феррито-перлитная структура. Оценку пулестойкости проводили при обстреле мишеней из указанного материала с дистанции 50 м из винтовки СВД патронами калибра 7,62 мм (термоупрочнённый сердечник, начальная скорость пули составляла порядка 10^3 м/с). Геометрические параметры структуры изучали металлографическим методом на микроскопе Neophot 21 с количественной обработкой изображений в программе TourView.

Результаты исследования. Показана микроструктура исследованного естественного феррито-мартенситного композита, представляющая собой композиционный материал с упрочняющими волокнами дискретной длины. Представлены результаты определения характерных параметров геометрии стального композита в соответствии

с ГОСТ Р 54570–2011¹. Угол разориентировки в структуре составил 7–11°. Объемная доля мартенсита при закалке с температуры 735 °С составила 28,37 %. Измерены средняя ширина пластин упрочняющей фазы $\bar{h} = 0,0051$ мм и средний свободный путь $\bar{\lambda}_1$, соответствующий ширине ферритных пластин $\bar{c} = 0,0131$ мм; при этом соотношение c/h составило 2,57. Расчётная критическая длина мартенситного слоя в ЕФМК, определенная из условия равновесия нормальных и касательных напряжений в нём, для ЕФМК с суммарным обжатием при прокатке 70 % составила 18,3 мкм. Приведены данные распределения величины мартенситных слоев в стали 14Г2 со структурой ЕФМК.

Обсуждение. Полученные данные о геометрических параметрах структуры стали 14Г2, закалённой из межкритического интервала температур (735 °С) и характеризующейся формированием естественного феррито-мартенситного композита, соответствуют требованиям, предъявляемым к композиционным материалам. В слоистом композите с оптимальной геометрией при последовательном прохождении трещины из одного слоя в другой по поверхности раздела, а также при приближении её вершины к данной границе, возможно образование расслоения, затрудняющего дальнейшее распространение исходной трещины. Поверхности раздела феррит-мартенсит, длина которых превышает критическое значение, являются эффективными барьерами на пути её движения.

Заключение. Установлено, что высокая баллистическая стойкость естественного феррито-мартенситного композита достигается при оптимальном сочетании геометрических параметров структуры данного композиционного материала. При этом получение оптимальных характеристик ЕФМК как броневой защиты может быть обеспечено за счёт рациональной технологии горячей прокатки — суммарного обжатия 70 % и выше — и выбора оптимальной температуры закалки в межкритическом интервале.

Ключевые слова: композит, сталь, мартенсит, феррит, строчечность, баллистическая стойкость

Благодарности. Авторы благодарят редакцию журнала за ценные замечания и сотрудников кафедры «Материаловедение и технологии металлов» ДГТУ: заведующего кафедрой М.С. Егорова и профессора Ю.М. Домбровского за помощь в получении и обсуждении результатов.

Для цитирования. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В., Иванков И.В. Геометрические параметры структуры стали 14Г2 как материала с высокой баллистической стойкостью. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2026;10(3):277–284. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-3-277-284>

Original Empirical Research

Geometrical Parameters of 14G2 Steel Structure as a Material with High Ballistic Resistance

Viktor N. Pustovoyt^{id}, Yuri V. Dolgachev^{id}✉, Ivan V. Ivankov^{id}

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

✉ ydolgachev@donstu.ru

Abstract

Introduction. Increasing the ballistic resistance of armor materials is a pressing scientific and technical challenge driven by the need to develop protective materials that can effectively resist high-speed impacts. Homogeneous isotropic steels, which provide protection through a combination of hardness and toughness, have limited effectiveness under high-speed stress of approximately 10³ m/s. These materials typically undergo brittle fracture or complete penetration without significant energy dissipation. A promising alternative approach is the use of heterogeneous and anisotropic materials with a more complex, organized structure that can alter crack propagation trajectories and increase fracture energy intensity. Natural ferrite-martensitic composites (NFMCS), formed in steels quenched from the intercritical temperature range, are an example of such materials. NFMCS steels, produced by quenching from the intercritical temperature range, are currently being actively researched. It has been shown that changing the quenching temperature affects the volume ratio of ductile ferrite and high-strength martensite layers, which in turn influences the mechanical properties of the material. However, existing studies have been conducted primarily under static tension or bending conditions. When subjected to ballistic loading with extremely high strain rates, the mechanisms of crack arrest may differ significantly. In this context, the geometric parameters of the structure such as the orientation, length, and thickness of the layers, as well as their ratios, become more important than the strength properties of individual phases. Currently, there is a lack of systematic data on which specific structural characteristics of NFMCS are crucial for ballistic resistance, and what optimal values should be. Therefore, the aim of this research is to determine the geometric parameters of NFMCS steel structures that ensure effective use in armor protection systems.

¹ ГОСТ Р 54570-2011. *Сталь. Методы оценки степени полосчатости или ориентации микроструктур*. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/51810/> (дата обращения 17.05.2026).

Materials and Methods. The study was conducted on 14G2 steel samples measuring 140×70×7 mm. The NFMC structure was obtained by quenching the steel from the intercritical temperature range with an initial banded ferrite-pearlite structure. Bullet resistance tests were performed by shooting targets of this material at a distance of 50 m from a Dragunov sniper rifle with 7.62 mm cartridges with a heat-strengthened core at a bullet velocity of approximately 10³ m/s. The geometric parameters of the structure were assessed using a metallographic method on a Neophot 21 microscope using ToupView software to obtain a quantitative assessment.

Results. The microstructure of the studied natural ferritic-martensitic composite, which was a composite material with reinforcing fibers of discrete length, was shown. The results of determining the characteristic parameters of the steel composite geometry in accordance with GOST R 54 570–2011² were presented. The misorientation angle in the structure was 7±11°. The volume fraction of martensite was 28.37% when quenched from a temperature of 735°C. The average width of the plates of the strengthening phase $\bar{h} = 0.0051$ mm and the average free path $\bar{\lambda}_{\perp}$ corresponding to the width of ferrite plates $\bar{c} = 0.0131$ mm were measured. The ratio c/h was 2.57. The calculated critical length of the martensite layer in NFMC from the condition of equilibrium of normal and shear stresses in it, in NFMC with a total rolling reduction of 70% was 18.3 μm. The data on the distribution of the size of martensite layers in 14G2 steel with the NFMC structure were shown.

Discussion. The obtained data on geometric parameters of the structure of 14G2 steel, quenched from the intercritical temperature range (735°C) and having NFMC organization, meet the requirements for the composite material. In a layered composite with optimal geometry, as a crack propagates successively from one layer to another along the interface and the crack tip approaches it, delamination can form, hindering the initial crack's propagation. Existing ferrite-martensite interfaces with a length greater than the critical value act as an effective barrier to crack propagation.

Conclusion. It was found that high ballistic resistance of the natural ferrite-martensite composite was achieved with an optimal combination of geometric parameters of the composite material structure. At the same time, achieving such an NFMC optimum as armor protection can be ensured by the correct hot rolling technology (total reduction of 70% and higher) and choosing the optimal quenching temperature in the intercritical range.

Keywords: composite, steel, martensite, ferrite, banding, ballistic resistance

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board for their valuable comments and the staff of the Department of Materials Science and Technology of Metals, DSTU: Head of the Department M.S. Egorov and Professor Yu.M. Dombrovsky for their help in obtaining and discussing the research results.

For Citation. Pustovoit VN, Dolgachev YuV, Ivankov IV. Geometrical Parameters of 14G2 Steel Structure as a Material with High Ballistic Resistance. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(3):277–284. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-3-277-284>

Введение. Повышение баллистической стойкости бронезащиты — актуальная проблема конструирования современной военной техники [1]. При высоких скоростях ударного воздействия помимо базовых механических характеристик к сплавам предъявляются строгие требования касательно специфической геометрической организации их внутреннего строения [2]. Для однородных изотропных металлических преград одним из ключевых факторов выступает формирование мелкодисперсного состояния. Основная сложность состоит в том, что традиционные однородные стали с изотропной структурой (например, мартенсит отпуска) реализуют защитные функции преимущественно за счет показателей твердости и ударной вязкости. Однако при высокоэнергетическом динамическом нагружении (порядка 10³ м/с) эффективность подобных преград существенно снижается: происходит либо хрупкое разрушение, либо сквозное пробивание мишени без значительного диссипирования кинетической энергии индентора [3]. Альтернативная концепция предполагает применение гетерогенных анизотропных материалов, обладающих гораздо более сложной структурной организацией [4]. В настоящей статье подробно проанализированы микроструктурные признаки, присущие сталям, которые обладают строением естественного феррито-мартенситного композита (ЕФМК) и рассматриваются в качестве перспективного средства броневой защиты.

На протяжении последних десятилетий ведется активное изучение материалов со структурой ЕФМК, образующейся посредством термической обработки из межкритического температурного интервала [5]. Использование дефиниции «композит» применительно к данным системам объясняется существенным различием свойств двух формирующих их фазовых составляющих. В рамках подобной композиции высокопластичные и относительно мягкие ферритные прослойки закономерно чередуются с высокопрочными мартенситными пластинами. Образуется структура с ярко выраженной текстурой, ориентированной вдоль прокатки. Технология получения рассмотренного многослойного композита подробно описана в нашем патенте [6]. Данные сплавы

² GOST R 54570-2011. *Steel. Methods for assessing the degree of banding or orientation of microstructures*. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/51810/> (Accessed: 17.05.2026). (In Russ.).

демонстрируют способность эффективно замедлять распространение трещин посредством инициирования процессов межслоного деламинирования вдоль межфазных границ [7–9]. Ранее авторами публикаций [10, 11] было установлено, что целенаправленное регулирование температуры нагрева под закалку напрямую изменяет объемные пропорции мягкой и твердой составляющих, детерминируя итоговый уровень эксплуатационных свойств. Однако подавляющее большинство проведенных испытаний базировалось на методах статического растяжения либо изгиба [12–14]. В случае баллистического нагружения, отличающегося экстремально высокими интенсивностями деформации, механизмы торможения трещин принципиальным образом отличаются: доминирующее влияние начинают оказывать инерционные эффекты, а также волновые процессы [3, 15]. При таком режиме воздействий определяющую роль играют не абсолютные показатели прочности отдельных фаз, а пространственные параметры структуры: ориентация, длина и толщина слоев, их соотношение, а также предельная длина упрочняющего слоя. До настоящего времени в научной литературе не представлены исчерпывающие сведения касательно того, какие именно структурные параметры в архитектуре ЕФМК выступают критически важными критериями обеспечения пулестойкости, равно как не определены их оптимальные диапазоны.

Целью данного исследования является комплексный анализ геометрических параметров структуры ЕФМК-сталей (угол разориентировки, размерные пропорции поперечных сечений слоев, критическая длина мартенситного слоя и прочие метрики), оптимизация которых позволит максимизировать эффективность применения рассматриваемых сталей в конструкциях систем бронезащиты. Актуальность выбора перечисленных факторов обосновывается следующими причинами: величина разориентации непосредственно определяет уровень сдвиговых напряжений, достаточных для разрушения высокопрочной фазы; соотношение толщин структурных элементов определяет предрасположенность к межфазному расслоению; критическая длина мартенситного слоя позволяет оценить эффективность передачи нагрузки от матрицы к упрочняющей фазе. Для успешного достижения поставленной цели потребовалось последовательно решить следующие задачи:

- оценить степень ориентированности структуры ЕФМК-сплавов;
- измерить объемную долю фаз, усредненную ширину сечения пластин, а также средний свободный путь упрочняющей фазы в мягкой ферритной основе;
- выполнить теоретический расчет критической длины мартенситного слоя;
- проанализировать соотношение толщин чередующихся ферритных и мартенситных пластин, обеспечивающее стабильную реализацию механизма погашения кинетической энергии растущей трещины за счет локального межслоного расслоения при интенсивном высокоскоростном ударе.

Материалы и методы. Исследование проводилось на образцах стали марки 14Г2, имеющих габариты $140 \times 70 \times 7$ мм. Формирование структуры ЕФМК осуществлялось посредством термической обработки — закалки из межкритического интервала температур стали, изначально обладавшей строчечной феррито-перлитной структурой. Оценка баллистической стойкости реализовывалась сравнительным методом: сопоставлялись характеристики образцов стали со структурой ЕФМК и той же стали с гомогенной структурой мартенсита отпуска.

Баллистические испытания мишеней, изготовленных из указанных материалов, выполнялись с дистанции 50 м с применением снайперской винтовки Драгунова (СВД). Для отстрела использовались боеприпасы калибра 7,62 мм, оснащенные термоупрочненным сердечником, скорость полета поражающего элемента 10^3 м/с. По каждому типу преград производилось 10 выстрелов.

В результате испытаний зафиксировано сквозное пробитие всех мишеней с гомогенной структурой, тогда как при попадании в пластины со структурой ЕФМК наблюдался рикошет пуль — на поверхности оставались лишь деформационные углубления (вмятины) в диапазоне от 1,5 до 2,0 мм.

Оценку геометрических параметров структуры проводили металлографическим методом с использованием микроскопа Neophot 21 и программного обеспечения TopView для получения количественных данных. При этом задействовали стандартные функции подготовки изображений к последующему анализу: кадрирование, настройку яркости, регулировку контрастности и другие базовые инструменты. Кроме того, применяли встроенные алгоритмы нанесения измерительной сетки и масштабной шкалы, тогда как истинный размер микроструктур устанавливали путем калибровки по снимку объект-микрометра. Автоматический расчет объемных долей структурных составляющих осуществляли посредством программного комплекса «Система КОИ-1», где стереологические операции реализовывались на основе задания яркостных интервалов. Изучение рассматриваемых характеристик выполняли на 15–20 полях зрения для каждого отдельного образца. Микрофотографии фиксировали с помощью 10Мр цифровой окулярной камеры TopCam UA1000CA при оптическом разрешении 3584×2748 пикселей. На базе полученных микроструктурных сведений устанавливали характерные геометрические показатели стального композиционного материала согласно стандартизированным методикам, регламентированным ГОСТ Р 54 570–2011.³

³ ГОСТ Р 54570-2011. *Сталь. Методы оценки степени полосчатости или ориентации микроструктур*. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/51810/> (дата обращения 17.05.2026).

Результаты исследования. По результатам баллистических испытаний установлена высокая пулестойкость материала со структурой естественного ферритно-мартенситного композита (ЕФМК): зафиксирован исключительно рикошет поражающих элементов. Данный показатель выгодно отличается от характеристик металла аналогичного химического состава, обладающего гомогенной структурой мартенсита отпуска, образцы которого пробивались насквозь. В связи с этим ниже представлены результаты (рис. 1) исследования микроструктуры указанного ЕФМК, представляющего собой композиционный материал [7], армированный упрочняющими волокнами дискретной длины [8].

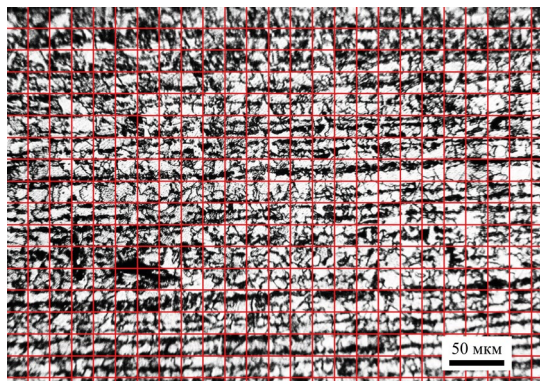


Рис. 1. Микроструктура стали 14Г2, ориентированной как естественный феррито-мартенситный композит (закалка с 735 °С)

Результаты определения характерных параметров геометрии стального композита согласно ГОСТ Р 54 570–2011⁴ представлены в таблице 1. В соответствии с методикой упомянутого стандарта были осуществлены расчёты на основе данных, полученных методом наложения сетки (рис. 1) и последующего подсчёта количества точек пересечения её линий с исследуемой фазой.

Таблица 1

Данные расчёта для стали 14Г2 по рис. 1

$N_{L\perp}(\text{мм}^{-1})$	$N_{L\parallel}(\text{мм}^{-1})$	$Al(N_{L\perp}/N_{L\parallel})$	Ω_{12}	$P_{L\perp}(\text{мм}^{-1})$	$P_{L\parallel}(\text{мм}^{-1})$	$Al(P_{L\perp}/P_{L\parallel})$	Ω_{12}
54,92	29,62	1,85	0,352	109,83	59,24	1,84	0,352
$V = 28,37$		$SB_{\perp} = 0,0182 \text{ мм}$		$\lambda_{\perp} = 0,0131 \text{ мм}$			

В таблице 1: $N_{L\perp}$ — число пересечений частиц на единицу длины линии, перпендикулярной к оси деформации; $N_{L\parallel}$ — число пересечений частиц на единицу длины линии, параллельной оси деформации; $P_{L\perp}$ — число пересечений границ на единицу длины линии, перпендикулярной к оси деформации; $P_{L\parallel}$ — число пересечений границ на единицу длины линии, параллельной оси деформации; Al — коэффициент анизотропии; Ω_{12} — степень ориентации линейных элементов структуры; V — объемная доля мартенсита; $SB_{\perp}$ — среднее расстояние (от центра до центра) для ориентированной фазы; $\lambda_{\perp}$ — средний свободный путь (от края до края) для ориентированной фазы.

Угол разориентировки упрочняющей фазы (рис. 1), определенный методом наложения секущих линий вдоль оси ориентации мартенситных полос, составил 7–11°.

Объемная доля мартенсита, вычисленная путем стереологического анализа микроструктуры с использованием программного обеспечения «Система КОИ-1», достигла 28,37 % после проведения закалки от температуры 735 °С.

В настоящей работе, с использованием рекомендаций ГОСТ Р 54 570–2011, были оценены такие параметры как среднее расстояние от центров фаз $SB_{\perp}$ и средний свободный путь $\lambda_{\perp}$ (расстояние между границами фаз) в структуре, приведённой на рис. 1. В результате проведенных расчетов установлено, что средняя ширина пластин упрочняющей фазы составляет $\bar{h} = 0,0051 \text{ мм}$, а средний свободный путь $\bar{\lambda}_{\perp}$, представляющий собой ширину ферритных пластин, равняется $\bar{c} = 0,0131 \text{ мм}$. Таким образом, соотношение толщин ферритной и мартенситной фаз составило $c/h = 2,57$.

Важнейшим фактором для любого композита, армированного дискретным упрочняющим волокном, выступает продольная длина данного волокна, которая обязательно должна превышать некоторое критическое значение $l_{кр}$. Указанное условие — это строго необходимый критерий для обеспечения режима полного нагружения мартенситных слоев исследуемой композиции. Критическая длина мартенситного слоя в естественно-композиционных ферритно-мартенситных материалах (ЕФМК) была рассчитана исходя из условия равновесия возникающих в нем нормальных и касательных напряжений [11]:

$$\sigma_B \cdot h \cdot b = \tau \cdot l_{кр} (b + h), \quad (1)$$

⁴ Там же.

где h , b — толщина и ширина армирующего слоя; $\tau = \sigma_T / 2$ — касательные напряжения на границе феррит-мартенсит. Откуда:

$$l_{кр} = \frac{\sigma_B \cdot h \cdot b}{\tau(b+h)}. \quad (2)$$

По результатам расчёта по уравнению (2) с учётом величин h и b , измеренных в ЕФМК с суммарным обжа-тием при прокатке 70 %, было получено значение $l_{кр} = 18,3$ мкм. Гистограмма распределения величины l в ста-ли 14Г2 со структурой ЕФМК показана на рис. 2.

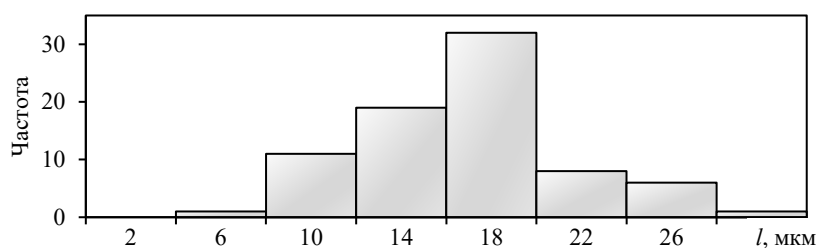


Рис. 2. Гистограмма распределения длин мартенситных пластин в образце стали 14Г2, структура которой изображена на рис. 1

Обсуждение. Полученные данные о геометрических параметрах структуры стали 14Г2, закалённой из межкритического интервала температур (735 °С) и имеющей организацию ЕФМК, соответствуют современным требованиям, предъявляемым к композиционным материалам. Высокая степень ориентированности структуры, длина армирующих пластин выше их критического значения, соотношение толщин матрицы и армирующего слоя находятся в пределах оптимальных значений.

Совпадение значений степени ориентации Ω_{12} (таблица 1), найденных двумя различными способами, подтверждает достоверность результатов, а условие $\Omega_{12} > 0$ количественно свидетельствует о высокой степени ориентированности структуры. При ударном воздействии, направленном ортогонально плоскости прокатки стального композита, разориентировка упрочняющей фазы играет важнейшую роль. Данный факт обусловлен зависимостью от угла разориентирования величины сдвиговых напряжений, требуемых для разрыва «волока». С целью достижения высоких показателей сопротивления удару разориентировка должна быть минимальной, что обеспечивается значительной степенью обжатия при горячей прокатке (не менее 70 %). Максимально допустимым уровнем разориентировки [9] для подобных композитов выступает значение 15° [10]. В микроструктуре исследованного материала угол разориентировки варьировался в диапазоне 7–11°.

В процессе варьирования температуры закалки соотношение объёмных долей в системе мартенсит-феррит способно изменяться. В частности, при термической обработке стали с нагревом до более низких температур объёмная доля мартенситной составляющей сплава сокращается, однако параллельно возрастает концентрация углерода, что предоставляет ценную возможность целенаправленно регулировать механические свойства композита.

В многочисленных научных трудах, посвящённых изучению причин высокой прочности композиционных материалов [11], убедительно продемонстрирована значимость величины критического объёма ($V_{кр}$) упрочняющей составляющей композита [12]. Вычисления данного параметра осуществлялись с учётом пределов прочности матрицы и упрочняющей фазы — абсолютное значение критического объёма оценивалось приблизительно в 50 % [13]. При этом подобные оценки выполнялись для условий статического нагружения композита при растяжении (вдоль упрочняющего волокна) или изгибе [14], а также при динамическом изгибе при испытаниях на ударную вязкость [16]. Оценка баллистической стойкости ЕФМК производилась в условиях ортогонального удара большой мощности при соударении со скоростью $\sim 10^3$ м/с. Было показано [15], что при таких скоростях механические свойства составляющих композита могут совсем не оказывать влияния на динамическое сопротивление, а резко возрастает роль инерционных сил, путей и способов распространения ударных волн [17]. В этом случае понятие о $V_{кр}$ утрачивает первоначальный физический смысл, а пропорция объёмных долей феррита и мартенсита принимается примерно равной 80/20, что однозначно обуславливает отношение толщин ферритной (c) и мартенситной (h) пластин на уровне $c/h \geq 3$.

При указанном соотношении растущая трещина тормозится вследствие расслоения материала внутри ферритной матрицы, что существенно повышает общую баллистическую стойкость [5]. Измеренное соотношение для исследованной структуры составляет 2,57. Данное значение несколько меньше упомянутого выше порога, что закономерно снижает вероятность расслоения при скоростном движении трещины и уменьшает возможность рикошета при высокоскоростном ударном воздействии. Для получения оптимального отношения c/h в рассматриваемом случае целесообразно изменить температуру закалки из межкритического интервала до уровня ниже 735 °С.

При проведении баллистических испытаний пластин толщиной 7 мм согласно ранее изложенной методике образец-мишень, обладающий изотропной структурой мартенсита отпуска, пробивается насквозь, тогда как от мишени со структурой ЕФМК неизменно наблюдался рикошет снаряда. Это объясняется тем, что слоистый композит, по всем параметрам отвечающий оптимальным геометрическим характеристикам, способен при рас-

пространении в нём трещины [12] последовательно из одного слоя в другой по поверхности раздела и по мере приближения к ней вершины трещины образовывать локальные расслоения [5]. Как показано на рис. 3, подобные расслоения создают условия для продвижения исходной трещины в новое положение, не способствующее её развитию. Таким образом, поверхности раздела фаз феррит-мартенсит длиной $l > l_{кр}$ могут служить эффективным барьером на пути движения трещины. На рис. 3 а показано как меняется траектория движения трещины в ЕФМК, когда имеет место рикошет. При этом на тыльной стороне мишени образуется выпучина и может возникнуть трещина (рис. 3 б), но выноса материала за тыльную сторону не происходит.

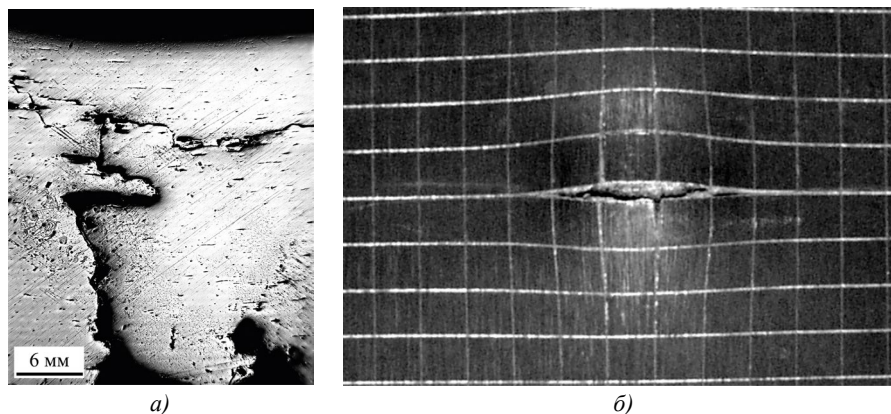


Рис. 3. Траектория движения трещины в композите: а — при скоростном ударе; б — трещина на тыльной стороне мишени [5]

Заключение. Установлено, что структура ЕФМК стали обладает высокой степенью ориентированности ($\Omega_{12} = 0,352$), а данное обстоятельство играет важную роль при мощном ударном воздействии.

Отношение среднего значения ширины пластин мартенсита и феррита составляет 2,57, что даёт веское основание рекомендовать уменьшить температуру закалки из межкритического интервала ниже 735°C с целью обеспечения оптимального структурного соотношения. Полученные данные о распределении длин мартенситных пластин имели максимум совпадающий с расчётным значением критической длины упрочняющего волокна (18,3 мкм). Это значимый показатель, так как границы раздела феррит-мартенсит длиной больше критической могут служить эффективным барьером на пути движения трещины.

Доказано, что превосходная баллистическая стойкость естественного феррито-мартенситного композита обеспечивается исключительно при оптимальном сочетании всех геометрических параметров микроструктуры рассматриваемого композиционного материала. При этом успешное достижение описанного конфигурационного оптимума ЕФМК (в качестве специализированной броневой защиты) может быть гарантировано лишь за счёт применения правильной технологии горячей прокатки (суммарное обжатие заготовки должно составлять 70 % и выше), а также тщательного выбора оптимальной температуры закалки в межкритическом интервале.

Список литературы / References

1. Crouch I. (ed.) *The Science of Armour Materials*. Woodhead Publishing; 2016. 722 p.
2. El Messiry M. *Protective Armor Engineering Design*. Apple Academic Press; 2019. 356 p.
3. Hazell PJ. *Armour: Materials, Theory, and Design*. CRC press; 2022. 498 p.
4. Бхатнагар А. (ред.) *Легкие баллистические материалы*. Москва: Техносфера; 2011. 392 с.
Bkhatnagar A. (ed.) *Lightweight Ballistic Materials*. Moscow: Tekhnosfera; 2011. 392 p. (In Russ.)
5. Pustovoi VN, Dolgachev YuV, Dombrovskii YuM, Duka VV. Structural Organization and Properties of a Natural Ferrite-Martensite Steel Composite. *Metal Science and Heat Treatment*. 2020;62(5–6):369–375. <https://doi.org/10.1007/s11041-020-00570-9>
6. Пустовойт В.Н., Домбровский Ю.М., Желева А.В., Зайцева М.В. *Способ получения естественного феррито-мартенситного композита*. Патент РФ, № 2495141 С1. 2013. 7 с.
Pustovoi VN, Dombrovskii YuM, Zheleva AV, Zaitseva MV. *A Method for Obtaining a Natural Ferrite-Martensitic Composite*. RF Patent, No. 2495141 C1. 2013. 7 p. (In Russ.)
7. Kelly A. (ed.) *Concise Encyclopedia of Composite Materials*. Elsevier; 2012. 380 p.
8. Vasiliev VV, Morozov EV. *Advanced Mechanics of Composite Materials and Structures*. Elsevier; 2018. 882 p.
9. Qing Quan Liang. *Analysis and Design of Steel and Composite Structures*. CRC Press; 2018. 458 p.
10. Gay D. *Composite Materials: Design and Applications*. CRC Press; 2022. 640 p.
11. Лизунов В.И. *Композиционные стали*. Москва: Металлургия; 1978. 150 с.
Lizunov VI. *Composite Steels*. Moscow: Metallurgiya; 1978. 150 p. (In Russ.)
12. Бернштейн М.Л. *Прочность стали*. Москва: Металлургия; 1974. 199 с.
Bernshtein ML. *Steel Strength*. Moscow: Metallurgiya; 1974. 199 p. (In Russ.)

13. Grange RA. Fibrous Microstructures Developed in Steel by Thermomechanical Processing. In: *2nd International Conference of Strength of Metals and Alloys. Conference Proceedings*. 1970. P. 861–863.

14. Бернштейн М.Л., Одесский П.Д., Грюнвальд Т.М. Особенности процесса разрушения строительных сталей, упрочненных по схеме ТМО с деформацией в межкритическом интервале температур. *Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия*. 1985;(1):85–90.

Bernshtein ML, Odesskii PD, Gryunval'd TM. Features of the Destruction Process of Construction Steels Hardened According to the TMT Scheme with Deformation in the Intercritical Temperature Range. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1985;(1):85–90. (In Russ.)

15. Pustovoyt VN, Dolgachev YuV, Inankov IV. Deformation and Fracture Resistance of Steel with a Structure of a Natural Ferrite-Martensite Composite under High-Speed Impact. *Metal Science and Heat Treatment*. 2024;66(1–2):1–4. <https://doi.org/10.1007/s11041-024-01009-1>

16. Sharma Rajan TV, Ashok Kumar Sharma, Sharma CP. *Heat Treatment: Principles and Techniques*. PHI Learning Pvt. Ltd.; 2023. 376 p.

17. Pustovoyt VN, Dolgachev YuV, Dombrovskii YuM. Ballistic Resistance of Steel with the Structure of a Natural Ferrite-Martensitic Composite. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2022;(3):54–59. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-3-54-59>

Об авторах:

Виктор Николаевич Пустовойт, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), pustovoyt45@gmail.com

Юрий Вячеславович Долгачев, доктор технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), ydolgachev@donstu.ru

Иван Вениаминович Иванков, аспирант кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета, (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), yanya.ivankov.99@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

В.Н. Пустовойт: формирование основной концепции, цели и задач исследования, научное руководство, корректировка выводов.

Ю.В. Долгачев: анализ результатов исследований, доработка текста.

И.В. Иванков: получение экспериментальных данных, расчеты, подготовка текста, формулирование выводов.

Конфликт интересов, авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Viktor N. Pustovoyt, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Materials Science and Metal Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), pustovoyt45@gmail.com

Yuri V. Dolgachev, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Materials Science and Metal Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), ydolgachev@donstu.ru

Ivan V. Ivankov, Postgraduate Student of the Materials Science and Metal Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#), yanya.ivankov.99@gmail.com

Claimed Contributorship:

VN Pustovoyt: conceptualization, supervision, writing – review & editing.

YuV Dolgachev: analysis, writing – review & editing.

IV Ivankov: experimental data acquisition, calculations, 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 19.05.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 22.06.2026

Принята к публикации / Accepted 30.06.2026