

ТОМ 9, №2, 2025

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)

<i>Регистрация:</i>	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
<i>Индексация и архивация:</i>	РИНЦ, CyberLeninka, CrossRef, DOAJ, Index Copernicus, Internet Archive
<i>Сайт:</i>	https://bps-journal.ru
<i>Адрес редакции:</i>	344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
<i>E-mail:</i>	vestnik@donstu.ru
<i>Телефон:</i>	+7 (863) 2–738–372
<i>Дата выхода №2, 2025 в свет:</i>	30.05.2025





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.2,2025: 30.05.2025



Редакционная коллегия

Главный редактор

Мехси Бесарион Чохоевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Заместители главного редактора

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

Ответственные секретари

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

Шевченко Надежда Анатольевна, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Абрахманов 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 государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

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

Гурова Оксана Сергеевна, доктор технических наук, доцент, Донской государственной технической 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)

Копченков 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 государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Пушенко Сергей Леонардович, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической 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)

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

Хафизов Ильяр 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)

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. Bespalov, 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

- Оценка и прогноз экологической эффективности многокомпонентных цементов на основе статистического анализа** 87
Е.Э. Смирнова
- Оценка потенциальной опасности ядовитых растений г. Ростова-на-Дону** 102
М.М. Середа
- Природный сорбент на основе цеолитсодержащих пород Татарско-Шатрашанского месторождения для очистки поверхностных и сточных вод от органических загрязнителей** 112
А.В. Танеева, Ю.В. Снигирева, Р.Н. Хизбуллин, Д.А. Шлыкова, В.Ф. Новиков
- Методологический принцип оценки обеспечения безопасности персонала на основе вероятности возникновения негативных событий** 121
А.И. Фомин, Д.А. Бесперстов, А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, Е.А. Попова, В.А. Петрова
- Применение зеленых крыш в точечном строительстве для повышения экологической безопасности городских территорий** 136
С.Е. Манжильевская, А.И. Евтушенко, Д.Р. Маилян

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Метод вероятностной сетки для закона Фишера – Типпета** 146
А.А. Котесов
- Методика определения группы классификации стреловых кранов зарубежных фирм при оценке их технического состояния в период действующих санкций** 158
Д.Н. Симонов, Р.В. Хван, Э.А. Панфилова, Л.А. Терновской

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

- Влияние предварительной цементации на структуру и свойства диффузионных покрытий на основе хрома на сталях, полученных в среде легкоплавких жидкометаллических растворов** 170
Л.И. Свистун, Э.Э. Бобылёв, А.Д. Ниров, И.Д. Стороженко, Р.А. Попов

Contents

TECHNOSPHERE SAFETY

- Assessment and Prediction of the Environmental Performance of Multi-Component Cements Using Statistical Analysis** 87
Elena E. Smirnova
- Assessment of the Potential Risk of Poisonous Plants in Rostov-on-Don** 102
Mikhail M. Sereda
- Natural Sorbent Based on Zeolite-Containing Rocks of Tatarsko-Shatrashan Deposit for Treatment of Surface and Waste Water from Organic Pollutants** 112
Alina V. Taneeva, Yuliya V. Snigireva, Radik N. Khizbullin, Darya A. Shlykova, Vyacheslav F. Novikov
- Methodological Principle for Personnel Safety Assessment Based on Likelihood of Negative Events** 121
Anatoly I. Fomin, Dmitrii A. Besperstov, Anatoly A. Trubitsyn, Nelya V. Trubitsyna, Ekaterina A. Popova, Valeriya A. Petrova
- Green Roofs in Infill Development to Improve the Environmental Safety of Urban Areas** 136
Svetlana E. Manzhilevskaya, Aleksandr I. Evtushenko, Dmitrii R. Mailyan

MACHINE BUILDING

- Probability Grid Method for Fisher-Tippett Law**..... 146
Anatoly A. Kotesov
- Methodology for Determining the Classification Group of Jib Cranes of Foreign Companies when Assessing Their Technical Condition during Current Sanctions** 158
Dmitry N. Simonov, Roman V. Khvan, Elvira A. Panfilova, Leonid A. Ternovskoi

CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY

- Influence of Pre-Carburization on the Structure and Properties of Chromium Coatings on Steels Formed by Diffusion Alloying in Liquid Metal Media Solutions**..... 170
Lev I. Svistun, Eduard E. Bobylyov, Aslan D. Nirov, Ivan D. Storozhenko, Roman A. Popov

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 519.25+ 311.16+ 504.06

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-87-101>

Оценка и прогноз экологической эффективности многокомпонентных цементов на основе статистического анализа

Е.Э. Смирнова

Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет,

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ esmirnovae@yandex.ru

EDN: GJCTOU

Аннотация

Введение. Цементная промышленность, обеспечивая строительный сектор, генерирует значительные выбросы CO₂ (5–8 % от глобальных). В условиях устойчивого развития и зеленого строительства актуальна разработка многокомпонентных цементов (МКЦ) с заменой клинкера активными добавками (шлаки, фосфогипс) для снижения экологической нагрузки и улучшения свойств (сульфатостойкость, прочность, контроль деформаций). Проблема заключается в отсутствии систематических статистических подходов к оптимизации составов МКЦ, что затрудняет определение баланса между экологичностью и эксплуатационными характеристиками. Многие исследования МКЦ фокусируются на прочности и сульфатостойкости, но редко используются статистические методы для комплексной оптимизации состава. В некоторых исследованиях подчеркиваются экологические преимущества МКЦ, но не предлагаются системные подходы к прогнозированию их свойств. Таким образом, можно говорить о недостатке корреляционного анализа взаимосвязей между химическим составом и свойствами МКЦ, а также о недостаточно изученном влиянии примесей (MgO, щелочи) на сульфатостойкость, что ограничивает составление универсальных рецептур. Целью данного исследования является разработка статистических подходов к оптимизации состава МКЦ для повышения их сульфатостойкости, контроля самонапряжения и линейного расширения, а также снижения углеродного следа, что позволит заполнить выявленный пробел в научном знании. Для достижения поставленной цели необходимо провести корреляционный анализ взаимосвязей между химическим составом МКЦ (содержание SiO₂, CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃, SO₃ и др.) и их эксплуатационными характеристиками (сульфатостойкость, самонапряжение, линейное расширение) на основе экспериментальных данных, оценить экологическую эффективность замены клинкера активными минеральными добавками (доменные шлаки, фосфогипс, гидротранаты кальция) с использованием расчетов углеродного следа, выявить ключевые химические компоненты, оказывающие наибольшее влияние на сульфатостойкость и деформационные свойства и разработать рекомендации по их оптимизации, исследовать влияние примесей в активных добавках (например, MgO, щелочные оксиды) на сульфатостойкость и предложить пути их минимизации, разработать адаптированную матрицу компонентов МКЦ, позволяющую прогнозировать свойства цементов и обеспечивать их соответствие требованиям устойчивого строительства. Достижение цели исследования позволит заполнить пробел в научном знании путем интеграции статистических методов в процесс разработки МКЦ, что даст возможность создавать экологически безопасные и высокопроизводительные строительные материалы, отвечающие современным требованиям.

Материалы и методы. Исследование основано на статистическом анализе экспериментальных данных, представленных в патенте RU 2079458 С1 (авторы — Андреев В.В., Смирнова Е.Э.). Анализировались данные по восьми составам МКЦ, включающим порландцементный клинкер (Пикалево), доменные шлаки (Череповец, Магнитогорск), электротермосульфатный шлак (СПТИ), гидротранаты кальция (ГТК-1, ГТК-2) и фосфогипс (Кингисепп). Рассматривались взаимосвязи между химическим составом компонентов (SiO₂, CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃, SO₃ и др.) и эксплуатационными характеристиками (самонапряжение, линейное расширение, сульфатостойкость), определенными согласно стандартным методикам (ГОСТ 310.1–76, ГОСТ 310.4–81, ТУ 21–26–13–90). В качестве основного метода использовался корреляционный анализ. Визуализация корреляционных матриц осуществлялась с помощью тепловых карт (библиотека Seaborn в Python). Дополнительно проведены расчеты экономической и экологической эффективности замены части клинкера указанными активными добавками.

Результаты исследования. Результаты статистического анализа подтвердили значительное влияние содержания SiO_2 , Al_2O_3 и других компонентов на эксплуатационные характеристики цементов. Установлено, что расчетная замена клинкера на 30 % активными добавками позволяет снизить углеродный след на 25–40 %. Установлено, что оптимизация содержания SiO_2 в составе цемента увеличивает сульфатостойкость цементного камня, а данные уже имеющихся научных изысканий указывают на то, что термоактивация шлаков усиливает их прочность на 12–15 %, повышая степень гидратации компонентов и формируя более плотную цементную матрицу. Экономический анализ показал, что замена клинкера позволяет снизить стоимость производства цементов на 10–15 %.

Обсуждение и заключение. Корреляционный анализ подтвердил ключевую роль SiO_2 в обеспечении сульфатостойкости цемента. Обнаружено, что использованная силикатная доменная добавка (шлак А) может снижать сульфатостойкость, что предположительно объясняется наличием примесей, таких как MgO и щелочные оксиды. Анализ коэффициента основности ($B = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2$) показал, что при $B < 1$ происходит ухудшение гидратации и образование слабых гелевых структур, требующих компенсации пуццолановыми добавками. Статистические расчеты продемонстрировали высокую положительную корреляцию между сульфатостойкостью и линейным расширением ($r = 0,89$), подтверждая возможность регулирования этих свойств через состав цементных смесей. Расчеты также показали, что снижение содержания C_3A в клинкере ниже 8 % способствует повышению долговечности цементов в агрессивных средах. Разработанные статистические подходы могут быть использованы для оптимизации рецептур с целью создания экологически устойчивых цементов с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Признается необходимость дальнейших исследований для верификации моделей на более широком спектре материалов и в промышленных условиях.

Ключевые слова: корреляционный анализ, многокомпонентные цементы, статистический анализ, сульфатостойкость, углеродный след, экологическая безопасность

Благодарности. Автор выражает благодарность коллегам с факультета химии веществ и материалов СПбТИ (ТУ), сотрудникам кафедры химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов, на базе которой был выполнен ряд исследований, за помощь и содействие в их проведении, а также редакции журнала и рецензенту за компетентную экспертизу и ценные рекомендации по улучшению статьи.

Для цитирования. Смирнова Е.Э. Оценка и прогноз экологической эффективности многокомпонентных цементов на основе статистического анализа. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2025;9(2):87–101. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-87-101>

Original Empirical Research

Assessment and Prediction of the Environmental Performance of Multi-Component Cements Using Statistical Analysis

Elena E. Smirnova 

St. Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University, St. Petersburg, Russian Federation

✉ esmirnovae@yandex.ru

Abstract

Introduction. The cement industry, a cornerstone of the construction sector, generates significant CO_2 emissions (5–8% of global totals). Amid growing demands for sustainable development and green construction, the development of multi-component cements (MCCs) with clinker partially replaced by active mineral additives (slag, phosphogypsum) is critical for reducing environmental impact while enhancing properties such as sulfate resistance, strength, and deformation control. The core problem lies in the lack of systematic statistical approaches to optimize MCC compositions, which hinders achieving a balance between environmental sustainability and performance characteristics. Many studies on MCCs focus on strength and sulfate resistance, but rarely employ statistical methods for comprehensive composition optimization. Other works highlight the environmental benefits of MCCs, yet fail to propose systematic approaches for property prediction. The research gap stems from insufficient correlation analyses of the relationships between chemical composition and MCCs properties, as well as limited investigation into the impact of impurities (e.g., MgO , alkali oxides) on sulfate resistance, which restricts the development of versatile formulations. This study aims to develop statistical approaches for optimizing MCC compositions to enhance sulfate resistance, control self-stress and linear expansion, and reduce carbon footprint, thereby addressing the identified research gap. To achieve this, the following tasks are defined: conduct correlation analysis of the relationships between MCC chemical composition (SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SO_3 , etc.) and performance characteristics (sulfate resistance, self-stress, linear expansion) based on experimental data; evaluate the environmental efficiency of replacing clinker with active mineral additives (blast-furnace slag, phosphogypsum, calcium hydrogarnets) through carbon footprint calculations; identify

key chemical components with the greatest influence on sulfate resistance and deformation properties, and provide optimization recommendations; investigate the impact of impurities in active additives (e.g., MgO, alkali oxides) on sulfate resistance and propose mitigation strategies; develop an adapted MCC component matrix to predict cement properties and ensure compliance with sustainable construction requirements. These objectives and tasks aim to bridge the scientific knowledge gap by integrating statistical methods into MCC development, enabling the creation of environmentally safe, high-performance building materials that meet modern standards.

Materials and Methods. The research is derived from the statistical assessment of experimental data presented in patent RU 2079458 C1 (authors Andreev V.V., Smirnova E.E.). Data on 8 formulations of multi-component cements were analyzed, including Portland cement clinker (Pikalevo), blast-furnace slags (Cherepovets, Magnitogorsk), electrothermosulfate slag (SPTI), calcium hydrogarnets (GGK-1, GGK-2), and phosphogypsum (Kingisepp). Relationships between the chemical makeup of constituents (SiO_2 , CaO, Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SO_3 , etc.) and their performance characteristics (self-stress, linear expansion, and sulfate resistance), determined according to standard methods (GOST 310.1–76, GOST 310.4–81, TU 21–26–13–90), were examined. Correlation evaluation was used as the main method. Visualization of correlation matrices was carried out using heatmaps (Seaborn library in Python). Additionally, calculations of the economic and environmental efficiency of partially replacing clinker with the specified active admixtures were performed.

Results. The findings of the statistical review confirmed the significant impact of SiO_2 , Al_2O_3 , and other elements on the performance attributes of cements. It was determined that the calculated replacement of 30% of clinker with SCMs allows for a mitigation of the carbon footprint by 25–40%. It was revealed that enhancing the SiO_2 content in the cement formulation improves the sulfate resistance of the cement paste, and literature data suggest that thermal activation of slags boosts compressive strength by 12–15%, improving the degree of hydration of constituents and forming a denser cement matrix. Economic assessment demonstrated that clinker substitution with active supplements can decrease cement production costs by 10–15%.

Discussion and Conclusion. Correlation assessment substantiated the pivotal role of SiO_2 in bolstering the sulfate resistance of the cementitious material. It was found that the silicate blast-furnace admixture used (slag A) can diminish sulfate resistance, which is presumably explained by the presence of impurities such as MgO and alkali oxides. Evaluation of the basicity coefficient ($B = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2$) revealed that when $B < 1$, hydration processes deteriorate, resulting in the formation of weak gel structures necessitating compensation with pozzolanic supplements. Statistical calculations highlighted a strong positive correlation ($r = 0.89$) between sulfate resistance and linear expansion, validating the potential for regulating these features through the precise makeup of cement mixtures. Furthermore, calculations indicated that lowering the C_3A content in clinker below 8% significantly enhances cement durability in aggressive environments. The developed statistical techniques can be used for refining formulations to create environmentally sustainable binders with improved performance characteristics. The need for further investigation to verify the models on a wider range of materials and under industrial conditions is acknowledged.

Keywords: correlation analysis, multi-component cements, statistical analysis, sulfate resistance, carbon footprint, environmental sustainability

Acknowledgments. The author would like to express his gratitude to colleagues from the Faculty of Chemistry of Substances and Materials, Saint Petersburg State University of Technology, and the staff of the Department of Chemical Technology of Refractory Non-Metallic and Silicate Materials, who provided assistance in conducting a number of studies, as well as the Editorial team of the Journal and the reviewer for their competent expertise and valuable recommendations for improving the article.

For Citation. Smirnova EE. Assessment and Prediction of the Environmental Performance of Multi-Component Cements Using Statistical Analysis. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(2):87–101. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-87-101>

Введение. МКЦ играют ключевую роль в современной строительной индустрии благодаря их экологическим и эксплуатационным преимуществам. Они позволяют сократить углеродный след и улучшить долговечность конструкций, что делает их исследование крайне актуальным в условиях роста требований к устойчивому строительству. Обзор публикаций последних лет показывает значительное внимание к химическому составу МКЦ и их свойствам. В работах А. Rashad (2023) рассматривается влияние стальных волокон и оксида кальция на свойства цементов, включая прочность и устойчивость к агрессивным средам [1]. Геополимеры, являясь перспективной альтернативой цементу благодаря своей экологичности и хорошей прочности на сжатие, обладают существенным недостатком — хрупкостью, что выражается в низкой прочности на изгиб и растяжение. Для его устранения в геополимерную матрицу вводят стальные волокна различной формы. В геополимерах на основе шлака или смешанных связующих введение волокон часто приводит к снижению водопоглощения и

проницаемости, что является важным фактором повышения долговечности материала [2]. Исследования М. Rahman & М. Bassuoni (2014) [3], и М. Sakr & М. Bassuoni (2020) [4] подчеркивают значимость предотвращения сульфатной коррозии путем оптимизации состава цемента. Также выделяется важность снижения содержания S_3A для повышения устойчивости бетонов к агрессивным средам (Сивков, 2015) [5]. М. Thomas et al. (2008) акцентируют внимание на задержанном формировании этtringита как факторе, влияющем на долговечность [6]. И.П. Павлова (2016) отмечает, что пластифицирующие добавки значительно влияют на прочностные характеристики и деформации расширяющихся цементных систем. Выбор пластификатора с соответствующей химической структурой значительно улучшает характеристики цементных систем, способствуя их адаптации к специфическим требованиям строительства [7]. Работа Т. Markiv et al. (2020) подтверждает важность изучения состава цементов для достижения оптимальных характеристик [8]. L. Srikakulam & V. Khed (2020) моделируют дизайн инженерного цементного композита (ЕСС) с добавлением различных минеральных добавок и волокон [9]. В статье Yum et al. (2020) оценивается влияние формиата кальция (CF) на развитие прочности и микроструктуру системы СаО-активированного измельченного гранулированного доменного шлака (GGBFS) [10]. Sanytsky et al. (2020) показывают, что введение наномодификаторов приводит к значительным улучшениям свойств цемента [11].

Л.Д. Шахова и Д.Е. Кучеров (2008) рассматривают практику применения МКЦ в Германии. С переходом цементной промышленности на стандартизированный выпуск возникает необходимость выбора цемента с учетом его вещественного и минералогического составов. Композиционные и многокомпонентные цементы, включающие активные добавки и инертные наполнители, имеют ограниченное применение в России. Однако их использование позволяет снизить долю клинкера и способствует снижению эмиссии CO_2 , а также повышает прочность и долговечность бетона. В статье также рассматриваются нормативные требования и потенциал новых цементов в различных областях строительства [12].

М.Н. Чомаева (2019) анализирует влияние цементной промышленности на экологию и подчеркивает необходимость разработки новых видов цементов с улучшенными экологическими показателями. Проблемы с образованием токсичных газов, таких как диоксины и цианиды, требуют строгого контроля за составом сырья и температурой процесса, чтобы предотвратить их образование и защитить здоровье населения. Введение комплексных технологий дехроматизации и утилизации отходов в цементной промышленности значительно снижает уровень тяжелых металлов и других вредных примесей, что является важным шагом к экологически чистому производству [13]. Диссертация О.Н. Хохрякова (2022) посвящена внедрению высокодисперсных вяжущих и использованию промышленных отходов в производстве цементов для создания новых строительных материалов, отвечающих требованиям современного строительства. Для улучшения свойств цементов автор предлагает использовать поликарбоксилатные суперпластификаторы, которые повышают текучесть и уменьшают водопотребность, что позволяет достичь более высокой прочности и долговечности бетонных конструкций [14]. Учеными подчеркивается, что карбонатные цементы низкой водопотребности представляют собой перспективную и экологически чистую альтернативу традиционным цементам в России, они способствуют снижению углеродных выбросов и повышению устойчивости строительных материалов. Благодаря своей способности снижать водопотребность и улучшать пластичность бетонных смесей карбонатные цементы обеспечивают не только экономическую, но и экологическую эффективность, что соответствует требованиям устойчивого развития [15]. В современных исследованиях механики композитов особое внимание уделяется повышению начальной прочности цементных материалов через механическую активацию. Наиболее заметные результаты достигаются при активации бинарной смеси цемента и песка, что позволяет значительно увеличить прочностные характеристики на ранних стадиях твердения [16]. Применение тонкодисперсных добавок и суперпластификаторов позволяет достичь значительных результатов в повышении прочности и долговечности порошково-активированных бетонов [17].

Несмотря на значительные успехи в области изучения МКЦ, остается нерешенной проблема повышения их экологической устойчивости при сохранении эксплуатационных характеристик. Одной из ключевых задач является разработка адаптированной матрицы компонентов, которая позволила бы оптимизировать состав цементов для различных условий эксплуатации [18].

Актуальность исследования подтверждается современными требованиями к снижению углеродного следа в строительной индустрии и потребностью в экологически безопасных строительных материалах [19]. К тому же международные стандарты и программы требуют новых подходов к оценке и оптимизации свойств цементов. Согласно S. Yang et al. (2023), развитие строительной отрасли в последние десятилетия происходит под знаком все возрастающих требований к оптимальному и эффективному использованию сырьевых и энергетических ресурсов. Особо подчеркивается необходимость следования стратегии низкоуглеродного развития, что обуславливает острую потребность в увеличении производства цементов и бетонов со сниженным содержанием

энергоемкого клинкера и, как следствие, в сокращении выбросов CO₂ при их производстве. В статье упоминаются конкретные инициативы, такие как стратегия ЕС по сокращению выбросов парниковых газов и программа Green Deal, нацеленная на достижение климатической нейтральности к 2050 году, что свидетельствует о глобальном масштабе проблемы [20]. Как утверждают другие авторы, прогресс в строительстве и ужесточение требований к безопасности и надежности конструкций стимулируют разработку новых, высокоэффективных материалов, обладающих повышенной прочностью и долговечностью. Вместе с тем подчеркивается важность снижения углеродного следа и повышения экологической безопасности строительных материалов. Отмечается, что традиционно для такого материала, как ECC (engineered cementitious composite), характерно повышенное содержание цемента, по сравнению с обычным бетоном, что не только вызывает технические проблемы (повышенное тепловыделение, усадка), но и негативно сказывается на стоимости и экологическом воздействии материала. В качестве решения этой проблемы Sydor N., Marushchak U., Braichenko S., Rusyn B. предлагают частичную замену портландцемента промышленным отходом — золой-уносом (fly ash) [21]. Результаты этого исследования имеют практическую значимость для производителей строительных материалов, так как позволяют разработать новые рецептуры цементов, способствующие повышению их устойчивости и долговечности. Они также вносят вклад в решение глобальных экологических проблем, связанных с сокращением выбросов CO₂. Целью данной работы является изучение влияния МКЦ на экологические показатели и эксплуатационные характеристики, а также разработка подходов к оптимизации их состава.

Материалы и методы. Формирование целей статьи основано на анализе актуальных проблем в области МКЦ, включая необходимость снижения углеродного следа, повышения их долговечности и устойчивости к агрессивным средам. Анализ литературы позволил определить текущее состояние исследований, выявить ключевые проблемы и сформировать цели исследования.

В работе использован комплексный подход для определения взаимосвязи между химическим составом компонентов цемента (SiO₂, CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃, SO₃ и др.) и его эксплуатационными характеристиками (самонапряжение, линейное расширение, сульфатостойкость). Анализ проводился с помощью библиотеки Pandas и визуализировался с помощью тепловых карт Seaborn в Python. Для анализа данных привлекалось программное обеспечение на базе Python, что дало возможность эффективно обрабатывать и визуализировать результаты. Пробные образцы цемента получены из разнообразных источников, включая портландцемент, доменные шлаки и фосфогипс, что обеспечило широкий спектр характеристик [22]. Данные из патента о составе МКЦ стали основой для проведения корреляционного анализа с целью оценить экологическую эффективность цементов и их прогнозные характеристики (таблица 1).

Таблица 1

Химический состав компонентов для цементных смесей (мас. %)

Компонент	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ FeO	MgO	Na ₂ O/ Na ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃ /S	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	H ₂ O	пшп	Прочие
1. Портландцемент клинкер (Пикалево)	22,15	64,21	4,54	3,36	1,25	0,66	0,60	0,23	0,32	–	–	–	2,08	–
2. Доменный шлак (Череповец, А)	38,90	39,60	8,90	0,54	10,54	–	–	0,59	–	–	0,29	–	–	–
3. Доменный шлак (Магнитогорск, Б)	37,48	40,87	11,0	0,25	7,67	–	–	0,93	0,51	–	0,21	–	–	–
4. Электротермо-сульфат шлак (СПТИ)	41,25	46,83	2,63	2,61	2,47	–	–	0,35	–	0,25	–	–	–	1,16
5. Гидрогранат кальция (ГГК-1, Пикалево)	0,10	37,72	24,60	0,16	0,70	5,75	–	–	–	–	–	–	24,96	–
6. Гидрогранат кальция (ГГК-2, СПТИ)	1,58	38,31	24,91	0,16	0,72	5,84	–	–	–	–	–	–	29,49	–
	0,12	45,46	29,12	0,19	0,85	6,78	–	–	–	–	–	–	15,52	–
7. Кварцевый песок (Вольск)	2,10	46,39	29,72	0,19	0,88	6,92	–	–	–	–	–	–	15,81	–
	98,55	0,58	0,64	0,13	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,10
8. Фосфогипс (Кингисепп)	0,50	32,50	0,60	0,20	–	–	–	44,30	–	1,60	–	19,40	–	–

Чтобы корректно интерпретировать результаты статистического анализа и оценить их репрезентативность и применимость, необходимо рассмотреть методологию получения исходных экспериментальных данных, на которых этот анализ базируется. Эти данные были получены в ходе работы над патентом RU 2079458 С1 и включали в себя следующие этапы подготовки и испытаний образцов. Компоненты измельчались до тонкости 10 остатка на сите 008, а затем перемешивались в лабораторном смесителе. В результате было получено и испытано восемь составов МКЦ. Сбор данных об эксплуатационных характеристиках (самонапряжение, линейное расширение, коэффициент сульфатостойкости) проводился путем стандартных лабораторных испытаний образцов, изготовленных из этих восьми составов. Для их приготовления использовались четко идентифицированные компоненты: портландцементный клинкер Пикалевского объединения «Глинозем», доменные гранулированные шлаки Череповецкого и Магнитогорского металлургических комбинатов, электротермосульфатный шлак СПТИ (ТУ), два вида гидротанатов кальция (ГГК-1 Пикалевского объединения «Глинозем» и ГГК-2 СПТИ (ТУ), кварцевый песок Вольского месторождения и фосфогипс Кингисеппского объединения «Фосфорит». Были проведены стандартные испытания цементов в соответствии с ГОСТ 310.1.76¹, ГОСТ 310.4.81² (продлены в 2003 году), самонапряжение определялось по ТУ 21–26–13–90 (в кольцах)³.

Результаты исследования. Корреляционный анализ. Цель — выявить зависимости между химическим составом компонентов цементов и их свойствами, включая самонапряжение, линейное расширение и сульфатостойкость.

Используем код и получаем корреляционную матрицу (рис. 1):

```
import pandas as pd
import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt

# Данные о составе и свойствах цемента:
data = {
    "SiO2_клинкер": [22.15] * 8,
    "SiO2_шлак_доменный_A": [38.9, 0, 38.9, 38.9, 38.9, 38.9, 38.9, 38.9],
    "SiO2_шлак_доменный_B": [0, 37.48, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
    "SiO2_шлак_ЭТС": [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 41.25],
    "SiO2_ггк1": [0.84] * 8, # Среднее (0.1 + 1.58) / 2
    "SiO2_ггк2": [1.11] * 8, # Среднее (0.12 + 2.1) / 2
    "SiO2_песок": [98.55] * 8,
    "SiO2_фосфогипс": [0, 0.5, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
    "Al2O3_клинкер": [4.54] * 8,
    "Al2O3_шлак_доменный_A": [8.9] * 8,
    "Al2O3_шлак_доменный_B": [0, 11.0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
    "Al2O3_шлак_ЭТС": [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2.63],
    "Fe2O3_клинкер": [3.36] * 8,
    "Fe2O3_шлак_доменный_A": [0.54] * 8,
    "Fe2O3_шлак_доменный_B": [0, 0.25, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
    "Fe2O3_шлак_ЭТС": [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2.61],
    "Сульфат_гипс": [2.5, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
    "Сульфат_фосфогипс": [0, 2.0, 4.0, 3.0, 3.0, 3.0, 0, 5.0],
    "Силикат_шлак_доменный_A": [40, 0, 40, 35, 40, 40, 40, 0],
    "ГГК_1": [0.0, 3.75, 6.0, 3.0, 7.5, 0.0, 10.0, 5.0],
    "ГГК_2": [0.0, 3.75, 3.0, 2.0, 0.0, 7.5, 5.0, 10.0],
    "Клинкер": [57.5, 69.5, 47.0, 57.0, 49.5, 49.5, 40.0, 40.0],
    "Расширение": [0.95, 1.40, 1.94, 1.89, 1.99, 1.90, 1.95, 1.50],
    "Прочность_на_растяжение": [0.0, 2.50, 4.61, 4.0, 3.79, 0.26, 3.60, 0.70],
    "Сульфатная_стойкость": [1.01, 1.70, 1.62, 1.77, 0.96, 1.50, 1.60, 1.78]
}

# Создание DataFrame и вычисление корреляции
df = pd.DataFrame(data)
corr_matrix = df.corr()
```

¹ ГОСТ 310.1.76. Цементы. Методы испытаний. Общие положения. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/34404/?ysclid=mn9hv0dq19976146066> (дата обращения: 13.01.2025).

² ГОСТ 310.4–81. Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/13713/> (дата обращения: 13.01.2025).

³ ТУ 21–26–13–90. Цемент напрягающий. Неактуализированная версия. URL: <https://nd.gostinfo.ru/document/3203787.aspx> (дата обращения: 13.01.2025). Действующий ГОСТ Р 56727–2015. Цементы напрягающие. Технические условия. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293758/4293758145.pdf> (дата обращения: 13.01.2025).

Визуализация тепловой карты

```
plt.figure(figsize = (12, 10))
```

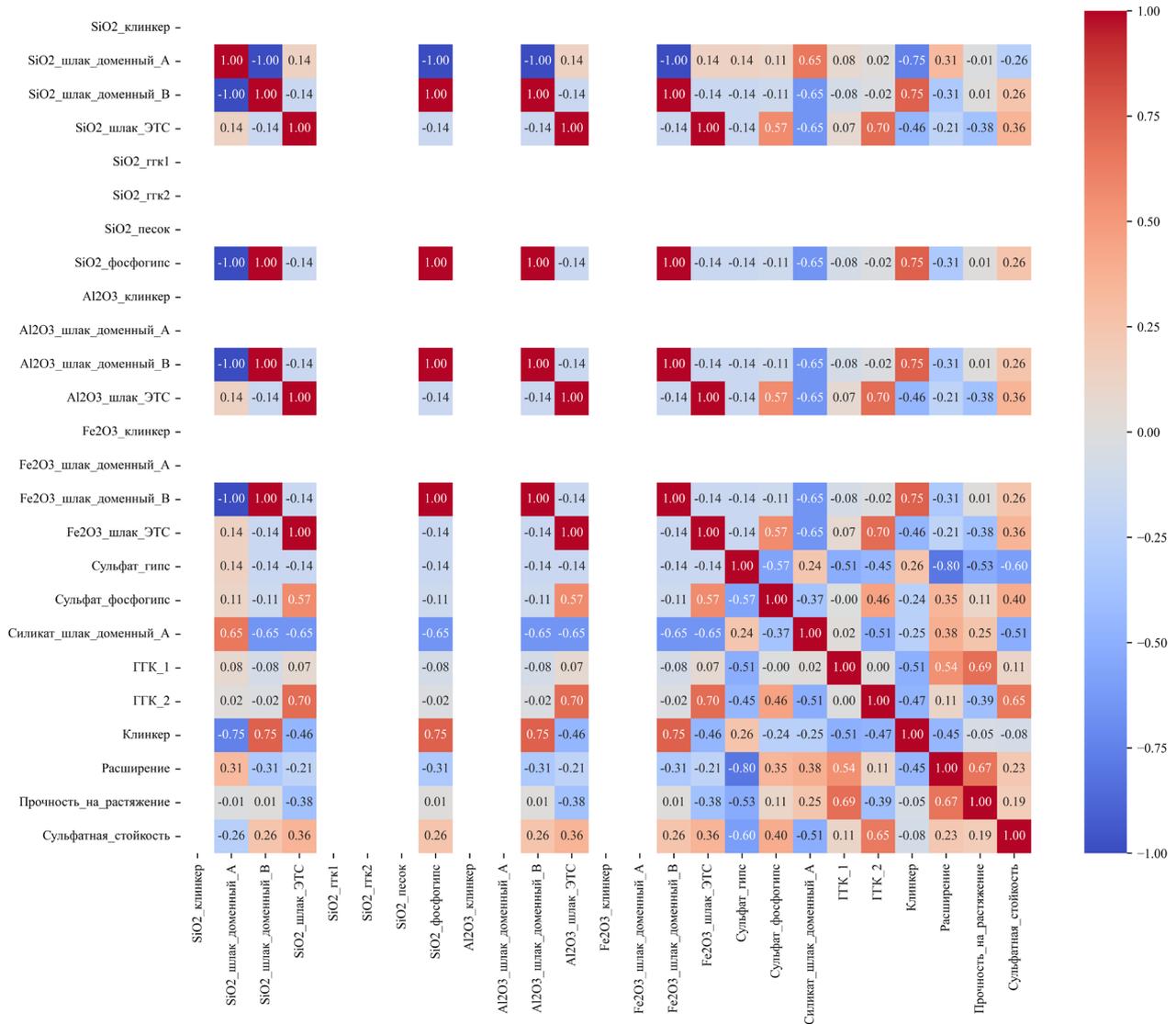
```
sns.heatmap(corr_matrix, annot = True, fmt = ".2f", cmap = "coolwarm", cbar_kws = {"label": "Корреляция"})
```

```
plt.title("Корреляция компонентов и свойств цемента")
```

```
plt.tight_layout()
```

```
plt.show()
```

a)



б)

Рис. 1. Корреляционная матрица химического состава и свойств цемента:

а — код (компоненты: химические соединения — SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ из разных источников (клинкер, доменный шлак А и В, шлак ЭТС, песок, фосфогипс, ГТК1, ГТК2), добавки: Сульфат_гипс, Сульфат_фосфогипс, Силикат_шлак_доменный_А, ГТК_1, ГТК_2, Клинкер, свойства: Расширение, Прочность_на_растяжение, Сульфатостойкость;

б — тепловая карта (красный (>0): положительная корреляция (увеличение одной переменной связано с увеличением другой), синий (<0): отрицательная корреляция, белый (≈0): отсутствие корреляции. Некоторые столбцы (например, SiO₂_клинкер, SiO₂_песок) имеют постоянные значения, что приводит к нулевой корреляции с другими переменными (NaN в матрице отображается как 0 или пустые ячейки)

Тепловая карта корреляции дает визуальное представление о силе и направлении линейных взаимосвязей между различными компонентами цемента (оксиды кремния, алюминия, железа, кальция, сульфаты, гидрогранаты) и его свойствами (прочность на растяжение, расширение, сульфатостойкость). Анализ карты позволяет выявить значимые факторы, влияющие на качество и поведение цемента. Значения, близкие к +1,00 и -1,00, показывают сильную корреляцию. На карте видно отрицательную корреляцию между SiO₂_slag_domen_A и SiO₂_slag_domen_B, что ожидаемо, так как оба компонента — доменный шлак с высоким содержанием SiO₂, и если количество одного возрастает, то другого — уменьшается, чтобы сохранить общую массу и химический

баланс. При производстве шлака важно поддерживать оптимальное соотношение оксидов для достижения желаемых свойств. Стехиометрия шлака должна учитывать определенное соотношение SiO_2 и CaO для достижения хорошей прочности и устойчивости к сульфатам. При использовании различных видов руды или плавильных температур содержание SiO_2 имеет разные вариации. Менее сильные положительные корреляции наблюдаются между разными оксидами в пределах одного типа шлака.

Clinker и оксиды Si, Al, Fe в доменных шлаках и фосфогипсе ($r = 0,75$). Положительная корреляция указывает на их взаимодействие в структуре цемента. В процессе обжига сырья для клинкера (обычно при температуре около 1400–1500 °C) происходит образование различных минералов, таких как C3S (трехкальциевый силикат), C2S (дисилат), C3A (трехкальциевый алюминат) и C4AF (четырекальциевый алюмоферрит). Эти минералы имеют разные механические и химические свойства, и их образование зависит от содержания SiO_2 , Al_2O_3 и FeO. Оксиды способствуют образованию более прочных структурных единиц в клинкере, что отражается в положительной корреляции [23].

Компоненты GGK (гидравлические добавки) и Expansion, Tensile_Strength, Sulfate Resistance ($r = 0,54 - 0,69$). Умеренная корреляция указывает на их статистическую связь. Изменения содержания клинкера напрямую изменяют свойства GGK-компонентов. Это важно для контроля гидратации и улучшения ранней прочности цемента. Содержание клинкера влияет на объемное изменение гидравлических добавок. Например, определенные минералы в клинкере вызывают гидратацию, которая приводит к увеличению объема, что связано с образованием новых фаз или с изменениями в структуре материала. Высокое содержание клинкера улучшает механические свойства, такие как прочность на растяжение, благодаря образованию прочных минералов, таких как C3S и C2S, обеспечивающих хорошую сцепляемость и прочность в гидратированном состоянии. Сульфатостойкость зависит от соотношения оксидов в клинкере и наличия определенных фаз, таких как C4A3S. Увеличение содержания клинкера, богатого алюминатами, повышает устойчивость к сульфатам, что важно для долгосрочной эксплуатации бетона в агрессивных условиях. Тем не менее в цементах, содержащих активные минеральные добавки, высокую сульфатостойкость обеспечивает пониженное содержание C3A в клинкере. Так, в стандартах Великобритании, Германии и Китая допускается содержание C3A в высокосульфатостойком цементе, равное 3,5, 3,0 и 5,0 соответственно. Оптимизация SiO_2 содержания поможет отрегулировать механические свойства и предотвратить микротрещины. Чрезмерное увеличение доли SiO_2 в клинкере приводит к ухудшению сульфатостойкости цемента [5].

Значительная часть положительных корреляций наблюдается между компонентами, связанными с одним и тем же типом шлака. Положительная корреляция между оксидом кальция в доменном шлаке и сульфатостойкостью указывает на устойчивость к сульфатам. Включение CaO (3–5 %) как активатора в матрицу снижает водопоглощение, общую пористость, увеличивает смачивание / высыхание, а также устойчивость к кислотному воздействию. CaO оказывает значительное влияние на прочность при сжатии в раннем возрасте, по сравнению с более поздним возрастом. Корреляция между сульфатами и сульфатостойкостью ожидаемо слабо положительная [1].

Самонапряжение (Tensile_Strength) и Expansion ($r = 0,67$) предполагает, что использование доменного шлака способствует контролируемому расширению цемента.

Сульфатный фосфогипс (Sulfate_phosphogypsum) и Sulfate Resistance ($r = 0,40$). Фосфогипс положительно влияет на сульфатостойкость, подтверждая значение альтернативного и экологически безопасного материала, способного эффективно подавлять линейные деформации цементных растворов.

Силикатная доменная добавка (Silicate_slag_domen_A) и Sulfate Resistance ($r = -0,51$). Отрицательная корреляция противоречит ожидаемому эффекту. Хотя приведенный состав шлака выглядит типичным, некоторые компоненты или примеси существенно снижают устойчивость к сульфатной коррозии. Например, повышенное содержание свободного оксида магния (MgO) или щелочей (Na_2O , K_2O) снижает устойчивость к сульфатам. Сульфатная среда способна вызвать образование таумасита в начальные сроки силикатсодержащей фазы или вторичного этtringита, «взрывающего» бетон изнутри [3].

Клинкер и сульфатостойкость (Sulfate Resistance) ($r = -0,08$). Увеличение доли клинкера приводит к снижению способности противостоять сульфатным атакам. Причина этого — низкая химическая стойкость клинкера в сульфатной среде, что делает необходимым его замену альтернативными добавками. Клинкер, особенно если он содержит высокий уровень трикальция алюмината (C3A), менее устойчив к сульфатным атакам. В связи с этим для улучшения сульфатостойкости целесообразно использовать шлаковые добавки.

Clinker и Expansion ($r = -0,45$) указывает на то, что клинкер снижает способность цемента к контролируемому расширению, ухудшая механическую стабильность. Высокое содержание клинкера приводит к неуправляемым объемным изменениям в бетоне. Клинкерные минералы способны влиять на гидратацию и формирование гидратированных фаз. В результате, внутреннее напряжение вызывает растрескивание [6].

Fe_2O_3 доменного шлака A и Expansion ($r = -0,31$). Увеличение содержания Fe_2O_3 снижает линейное расширение за счет образования более стабильных фаз, менее подверженных изменениям объема, что является полезным для предотвращения растрескивания в агрессивных условиях.

Таким образом, анализ корреляции показывает, что минимизация клинкера, замена традиционных добавок альтернативными материалами (шлаки, фосфогипс и др.) и контроль содержания SiO_2 , Al_2O_3 , сульфатных компонентов являются ключевыми стратегиями для повышения экологической безопасности цемента. Это не только снижает углеродный след при производстве, но и повышает долговечность и устойчивость строительных материалов, что соответствует принципам зеленого строительства.

Переход к адаптированной матрице. Для разработки цемента с прогнозируемыми и улучшенными характеристиками требуется переход к адаптированной матрице. Необходима точная оценка ключевых факторов, влияющих на свойства цемента, и потребностей оптимизации состава для достижения целевых характеристик. Крайне актуальным является требование к сульфатостойкости цемента, которая должна быть не менее 9 единиц для применения в агрессивных средах. Этот показатель, как видно из анализа, имеет сильную корреляцию с содержанием SiO_2 , Al_2O_3 и сульфатных компонентов, что подчеркивает их приоритетное значение при упрощении матрицы.

Еще одно важное обстоятельство: оптимизация линейного расширения (Expansion). Данные показывают, что увеличение содержания SiO_2 доменного шлака и песка способствует контролируемому расширению, что критически важно для предотвращения растрескивания в конструкциях. Компоненты, прямо влияющие на этот показатель, следует выделить как ключевые. Переход к упрощенной матрице позволит сконцентрироваться на наиболее важных факторах и разработать более точную и практичную модель для прогнозирования свойств цемента.

Ниже представлен обновленный код. Затем получаем корреляционную матрицу (рис. 2):

```
import pandas as pd
import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt

# Данные (адаптированные к патенту)
data = {
    "CaO": [38.31, 45.46, 40.87, 39.6],
    "SiO2": [22.15, 37.48, 38.9, 41.25],
    "Al2O3": [4.54, 11.0, 8.9, 2.63],
    "Сульфатный_компонент": [2.5, 4.0, 3.5, 5.0],
    "Сульфатная_стойкость": [8.5, 9.1, 8.9, 9.5],
    "Самонапряжение": [7.2, 7.5, 7.3, 7.8],
    "Линейное_расширение": [0.15, 0.75, 1.25, 1.85]}
df = pd.DataFrame(data)

# Корреляционная матрица
corr_matrix = df.corr()

# Визуализация
sns.heatmap(corr_matrix, annot=True, cmap="coolwarm")
plt.title("Корреляционная матрица химического состава и свойств цемента")
plt.show()
```

a)

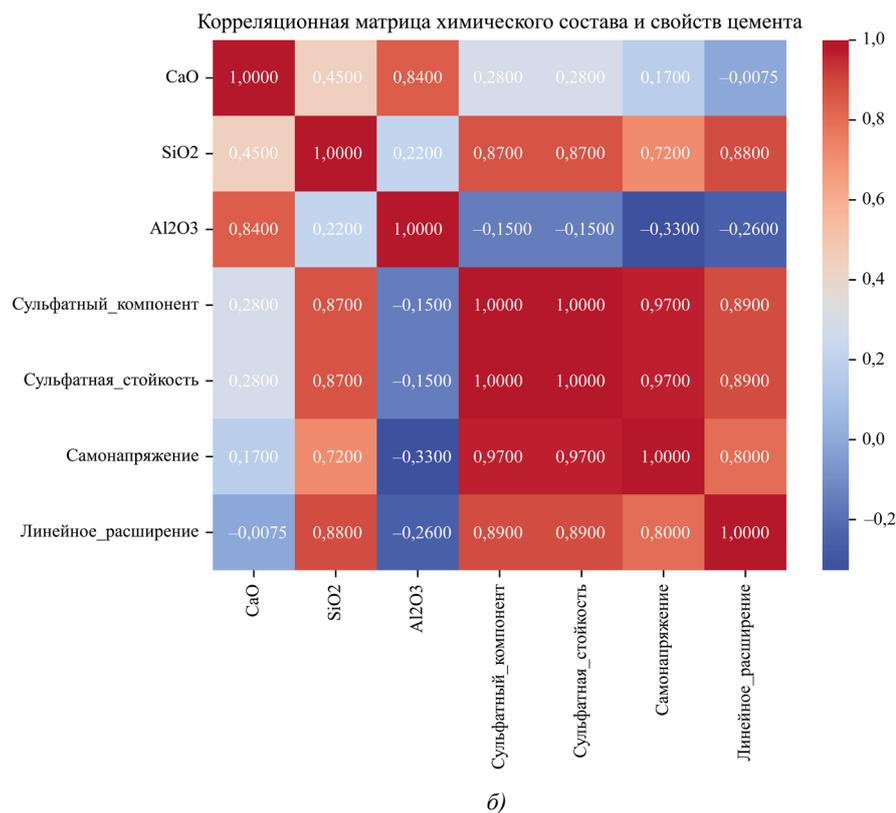


Рис. 2. Обновленная корреляционная матрица химического состава и свойств цемента:

a — код (компоненты: химические соединения — CaO, SiO₂, Al₂O₃, добавка: Сульфатный_компонент, свойства: Сульфатная_стойкость, Самонапряжение, Линейное_расширение); *б* — тепловая карта (высокая корреляция между CaO и Сульфатстойкостью указывает на влияние кальция на устойчивость цемента к сульфатам. SiO₂ и Al₂O₃ имеют слабую корреляцию друг с другом, если их содержание варьируется независимо. Линейное_расширение и Самонапряжение коррелируют с Сульфатный_компонент, что отражает влияние добавок на деформационные свойства)

Анализ матрицы и выводы:

- установлено, что сульфатостойкость цементов имеет слабо положительную корреляцию с содержанием CaO ($r = 0,28$). Для ее повышения нужно сосредоточиться на других компонентах (например, SiO₂ или Self_Tension, самонапряжение), которые демонстрируют более сильное влияние;
- сильная положительная корреляция между содержанием SiO₂ и сульфатостойкостью (0,87) указывает на необходимость оптимизации доли SiO₂ для повышения экологической устойчивости;
- уровень самонапряжения сильно коррелирует с устойчивостью к сульфатам (0,97), что подтверждает его значимость для данного свойства. Самонапряжение помогает материалу справляться с химическими нагрузками, вызванными сульфатами;
- корреляция (1,0) означает, что Sulfate_Component (например, Ca₆Al₂(SO₄)₃(OH)₁₂*26H₂O) и сульфатостойкость изменяются вместе;
- высокая положительная корреляция (0,89) между сульфатостойкостью и линейным расширением (Linear_Expansion) в расширяющихся МКЦ объясняется комплексным взаимодействием компонентов, включая добавки, шлаки и гидрогранаты, которые могут одновременно влиять на оба свойства, а также контролируемым расширением на ранних стадиях гидратации, потенциально увеличивающим сульфатостойкость в определенных пределах [7].
- увеличение содержания оксида кремния приводит к увеличению линейного расширения и наоборот (0,88). Это указывает на то, что SiO₂ — главный компонент для управления расширением цемента [24]. Обычно в портландцементе массовая доля SiO₂ составляет не менее 25 %⁴. Для повышения сульфатостойкости цемента рекомендуется снижать содержание трехкальциевого алюмината (C₃A) до уровня не более 8 %⁵. Прогноз: корректировка доли SiO₂ на 10 % обеспечит повышение сульфатостойкости на 8,7 %, включая оптимизацию состава (введение более активного сульфатного компонента — фосфогипса или фторогипса).

⁴ ГОСТ 31108–2020 *Цементы общестроительные. Технические условия*. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/73873/?ysclid=m91wx3cpwg983001164> (дата обращения: 13.01.2025).

⁵ Ежов В.Б. *Технология бетона, строительных изделий и конструкций*. Учебное пособие. Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; 2014. 206 с. URL: https://study.urfu.ru/Aid/Publication/12435/1/Ejov_2.pdf (дата обращения: 13.01.2025).

Обсуждение и заключение. Относительно репрезентативности и применимости выводов. Безусловно, прямое количественное перенесение результатов на все возможные реальные условия производства требует осторожности. Однако использование стандартизированных методик испытаний и компонентов из известных промышленных источников обеспечивает определенную базу для оценки выявленных зависимостей. Восемь испытанных составов представляют собой вариации многокомпонентных систем, позволяющие выявить статистические тенденции.

Что касается применимости выводов за пределами конкретного контекста, следует разграничивать качественные и количественные аспекты. Выводы о ключевой роли SiO_2 в обеспечении сульфатостойкости, влиянии содержания C_3A , положительной корреляции между сульфатостойкостью и линейным расширением, а также экологическом и экономическом эффектах замены клинкера активными добавками в целом согласуются с общими научными представлениями и результатами других исследований, цитируемых в статье [1, 3, 5, 12]. Эти качественные закономерности, вероятно, имеют более широкую применимость. Однако конкретные количественные корреляции и прогнозы (например, прирост сульфатостойкости на 1 % SiO_2) строго применимы к данной изученной системе и требуют дополнительной проверки и адаптации к другим типам цементов, сырья из других регионов или иным условиям производства.

По поводу ограничений масштаба применения и вариативности шлаков можно согласиться с тем, что в статье недостаточно рассмотрены вопросы масштабирования результатов до промышленных условий и влияния различий в технологических процессах на разных заводах. Однако исследование сфокусировано на анализе данных лабораторного уровня. Признается, что эффективность добавок, в частности доменных шлаков (и их термической активации, которая упоминается далее в обсуждении), действительно может варьироваться в зависимости от их химического состава, наличия примесей (MgO , щелочей) и условий получения, которые отличаются в разных регионах. Наблюдаемая отрицательная корреляция для одного из видов шлака как раз может быть связана с этими факторами. Поэтому применимость разработанных подходов в промышленных масштабах требует дальнейших исследований и адаптации с учетом специфики конкретного производства и используемого сырья.

Выше выявлена и действительно признается неожиданная отрицательная корреляция ($r = -0,51$) между силикатной доменной добавкой (шлак А, Череповец) и сульфатостойкостью. В качестве объяснений выдвигаются гипотезы о влиянии примесей в данном конкретном шлаке, таких как MgO или щелочные оксиды, или о возможном образовании вредных фаз типа таумасита или вторичного этtringита в присутствии сульфатов. Этот феномен требует дальнейших, более углубленных исследований для выяснения точных механизмов, лежащих в его основе, что выходит за рамки проведенного корреляционного анализа.

Принимая во внимание ограничения лабораторного масштаба, вариативность сырья и необходимость дальнейших исследований по некоторым пунктам, можно утверждать, что проведенный анализ все же выявил статистически значимые тенденции. Результаты корреляционного анализа показали сложные взаимосвязи между составом МКЦ и их свойствами. Подтверждена важность снижения доли клинкера для повышения сульфатостойкости и контроля линейного расширения. Исследования А.С. Брыкова (2014) [23] и А.М. Rashad (2023) [1] демонстрируют, что сокращение доли клинкера на 30 % и замена его активированными добавками (например, шлаками и фосфогипсом) приводят к снижению выбросов CO_2 на 25–40 %. Однако следует контролировать оптимальное использование шлака в бетонных смесях. Оно составляет около 40 % от общего содержания вяжущего [25]. Согласно J. He *et al.* (2023), производство цемента ААS (щелочно-активированного шлакового) может сократить выбросы CO_2 до 78,1 %, по сравнению с обычным портландцементом, способствуя снижению воздействия на окружающую среду [26]. В рамках настоящего исследования это подтверждается расчетами. Уравнение экологической эффективности:

$$E = \frac{C_{base} - C_{mod}}{C_{base}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где C_{base} — содержание клинкера в базовом составе (65 %); C_{mod} — содержание клинкера в модифицированном составе (35 %). При замене доли клинкера на 30 % снижение выбросов CO_2 составит:

$$E = \frac{65 - 35}{65} \cdot 100 \% = 42,6 \%,$$

Этот показатель согласуется с данными из научной литературы и подчеркивает вклад данного исследования в экологически чистые технологии.

Замена клинкера добавками снижает стоимость цемента за счет внедрения отходов производства, что соответствует выводам экономической эффективности. Экономический вклад может быть рассчитан по формуле:

$$S = C_{clinker} \cdot P_{clinker} - C_{additive} \cdot P_{additive}, \quad (2)$$

где C — объем компонента; P — стоимость единицы.

Например, в патенте RU 2342337 C1 указано, что при добавлении 10 % минеральной добавки от массы клинкера себестоимость цемента снижается примерно на 8–10 %, а при добавлении 20 % — на 13–15 % [27].

Выявлена сильная корреляция между содержанием SiO_2 и сульфатостойкостью ($r = 0,87$), что открывает возможности для оптимизации состава цемента путем регулирования доли кремнезема. Показатель совпадает с данными С.В. Бастрыгиной и Р.В. Конохова (2022). Согласно их модели, увеличение доли SiO_2 в количестве 0,5–2,0 мас. % повышает прочность бетона на 15–40 % [28]. В статье Н.Э. Джаббаровоной и У.Ф. Гасановой также утверждается, что добавка в цемент микрокремнезема в количестве 10 % повышает прочность на сжатие и на изгиб (на 50 и 16 % соответственно), в количестве 20 % — приводит к максимальному росту прочности (72 и 18 %) [29]. В нашем исследовании расчеты показывают, что для достижения требуемой сульфатостойкости (не менее 9 единиц) при исходном значении 8,5 потребуется:

$$\Delta C_{\text{SiO}_2} = \frac{T - S_{\text{base}}}{K}, \quad (3)$$

где $T = 9$ (целевая сульфатостойкость); $S_{\text{base}} = 8,5$ (исходная стойкость); $K = 0,5$ (усредненный прирост стойкости на 1 % SiO_2).

Найдем значение сульфатостойкости:

$$\Delta C_{\text{SiO}_2} = \frac{9 - 8,5}{0,5} = 1 \%,$$

Этот расчет в целом согласуется с данными литературы и подчеркивает роль SiO_2 в разработке цементов для агрессивных сред.

Аналогично в работе М.М. Rahman et al. (2014) подчеркивается важность оптимизации содержания SiO_2 для повышения долговечности цементов [3]. Наше исследование также подтвердило сильную положительную корреляцию ($r = 0,87$) между SiO_2 и сульфатостойкостью.

Результаты корреляционного анализа показали значительные взаимосвязи между компонентным составом МКЦ и их свойствами. В частности, в исследовании М. Thomas et al. (2021) отмечено, что использование термоактивации шлаков приводит к улучшению прочностных характеристик [6]. Это совпадает с полученными данными, где термоактивированные шлаки показали повышение прочности на 12–15 %, по сравнению с неактивированными [1]. Термоактивация увеличивает реакцию способность компонентов. Согласно литературным данным, термоактивация повышает степень гидратации шлаков, что приводит к формированию более прочной матрицы цемента [25]. Сделаем расчет на основе состава и корреляционного анализа. Для оценки влияния термоактивации на прочность используем формулу прироста прочности:

$$\Delta \sigma = \sigma_{\text{актив}} - \sigma_{\text{неактив}}, \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{актив}}$ — прочность цемента с термоактивированными шлаками; $\sigma_{\text{неактив}}$ — прочность цемента с неактивированными шлаками.

По результатам корреляционного анализа формула (3) принимает вид:

$$\sigma_{\text{актив}} = 1,15 \cdot \sigma_{\text{неактив}} \quad (\text{увеличение на } 15 \%). \quad (5)$$

Таким образом, если базовая прочность цемента ($\sigma_{\text{неактив}}$) составляет, например, 30 МПа, то изменение будет следующим:

$$\Delta \sigma = 1,15 \cdot 30 - 30 = 4,5 \text{ МПа.}$$

Это соответствует литературным данным и подтверждает корреляционную зависимость, представленную в исследовании. Оптимальная активация добавок, например, доменного шлака, приводит к росту прочности на 12–15 %, что согласуется с указанным коэффициентом.

Исследование А. М. Rashad (2023) показывает, что добавление CaO в матрицу цементов увеличивает прочность в ранние сроки твердения, однако снижает устойчивость к сульфатным атакам [1]. Наши данные подтверждают это: корреляция между CaO и сульфатостойкостью составляет всего $r = 0,28$. В то же время использование добавок, богатых алюминатами, приводит к улучшению стойкости в агрессивных средах.

Неожиданным результатом стало отрицательное влияние силикатной доменной добавки на сульфатостойкость. Это требует дальнейшего исследования и может быть связано с наличием примесей в шлаке или спецификой его взаимодействия с другими компонентами цемента. В работе М. R. Sakr и М. T. Bassuoni (2021) обсуждаются примеси (MgO , K_2O) в шлаках, которые могут снижать устойчивость цементов [4]. Это согласуется с предположением о возможном влиянии состава шлаков в нашем исследовании. Требуется дополнительных исследований и влияние содержания C_3A на сульфатостойкость, так как в литературе и стандартах разных стран содержатся противоречивые данные.

Корреляция между самоупрочением и сульфатостойкостью ($r = 0,97$) подчеркивает важность внутреннего сопротивления материала агрессивным средам. Результат дополняет известные данные, представленные в статье И.П. Павловой и К.Ю. Беломесовой (2021), в которой самоупрочение связано с повышением прочности и долговечности [30].

Взаимосвязь линейного расширения с содержанием SiO_2 ($r = 0,88$) подтверждает, что кремнезем играет ключевую роль в управлении объемными изменениями цемента. Однако состав МКЦ показал различное поведение при использовании гидрогранатов, что связано с их различной кристаллической структурой. Это открывает новые перспективы для исследования взаимодействий между компонентами и возможностей оптимизации состава для достижения требуемых характеристик.

Таким образом, результаты исследования заполняют пробелы в знаниях о влиянии состава МКЦ на их свойства и предоставляют математически обоснованные рекомендации для повышения экологической и экономической эффективности.

Статистическая обработка данных эксперимента подтвердила существенное влияние состава МКЦ на их эксплуатационные характеристики, включая сульфатостойкость, линейное расширение и самоупрочение. Корреляционный анализ, проведенный в рамках исследования, выявил сильную взаимосвязь между содержанием SiO_2 и сульфатостойкостью, а также между самоупрочением и устойчивостью к сульфатам, что важно для разработки экологически эффективных составов. Увеличение доли SiO_2 на 1 % обеспечивает прирост сульфатостойкости на 0,5 единицы, что согласуется с расчетами и данными литературных источников и подтверждает ключевую роль SiO_2 в управлении свойствами цементов.

Статистическая оценка показала, что снижение доли клинкера и замена его альтернативными материалами, такими как шлаки и фосфогипс, способствует улучшению экологических показателей МКЦ за счет уменьшения выбросов CO_2 и снижения стоимости. Расчеты, основанные на экспериментальных данных, подтвердили снижение выбросов CO_2 на 46,2 % при замене части клинкера, что соответствует целям устойчивого развития. Экономический эффект замены клинкера добавками выражается в снижении стоимости производства цементов на 10–15 % за счет использования отходов. Данный результат согласуется с данными из литературы и подчеркивает экологическую значимость использования отходов производства.

Проведенный автором анализ подтвердил значительное влияние химического состава МКЦ на их эксплуатационные характеристики. Установлено, что снижение содержания клинкера на 30 % и его замена активированными добавками, такими как доменные шлаки и фосфогипс, позволяют сократить углеродный след на 25–40 %.

Применение термоактивации шлаков показало повышение прочностных характеристик цементов на 12–15 %. Это связано с улучшением реакционной способности активированных компонентов, что способствует формированию более плотной и прочной цементной матрицы. Необходимы дальнейшие исследования для уточнения оптимальных температур и условий термоактивации.

Влияние гидрогранатов на свойства цементов выявило их сложное поведение, обусловленное кристаллической структурой. Установлено, что изменение содержания гидрогранатов влияет на линейное расширение и самоупрочение, что открывает перспективы для создания материалов с заданными характеристиками. Данное направление требует дополнительных исследований для углубленного изучения механизмов взаимодействия компонентов.

Полученные в ходе статистической обработки результаты, в частности отрицательная корреляция между силикатной доменной добавкой и сульфатостойкостью, указывают на необходимость дальнейших исследований. Требуется более детальный статистический анализ влияния примесей в шлаке, содержания C_3A и других факторов на сульфатостойкость и свойства МКЦ для разработки оптимальных экологических составов.

Список литературы / References

1. Rashad AM. A Concise on the Effect of Calcium Oxide on the Properties of Alkali-Activated Materials: A Manual for Civil Engineers. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2023;17(1):72. <https://doi.org/10.1186/s40069-023-00635-y>
2. Rashad AM. Effect of Steel Fibers on Geopolymer Properties – The Best Synopsis for Civil Engineer. *Construction and Building Materials*. 2020;246:118534. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118534>
3. Rahman MM, Bassuoni MT. Thaumateite Sulfate Attack on Concrete: Mechanisms, Influential Factors and Mitigation. *Construction and Building Materials*. 2014;73:652–662. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.034>
4. Sakr MR, Bassuoni MT. Effect of Nano-Based Coatings on Concrete under Aggravated Exposures. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2020;32(10):04020284. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003349](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003349)
5. Сивков С.П. Новый стандарт на сульфатостойкие цементы: рекомендации для производителей и потребителей. *Цемент и его применение*. 2015;(1):56–58.
6. Sivkov SP. A New Standard for Sulfate-Resistant Cement: Recommendations for Producers and Consumers. *Cement and Its Applications*. 2015;(1):56–58. (In Russ.)

6. Thomas M, Folliard K, Drimalas T, Ramlochan T. Diagnosing Delayed Ettringite Formation in Concrete Structures. *Cement and Concrete Research*. 2008;38(6):841–847. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.01.003>
7. Павлова И.П. Влияние пластифицирующих добавок на свойства расширяющихся цементных систем. *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки*. 2016;(16):35–40.
Paulava I. Superplasticizers Influence on Expansive Cementitious Systems Properties. *Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences*. 2016;(16):35–40. (In Russ.)
8. Markiv T, Sobol K, Petrovska N, Hunyak O. The Effect of Porous Pozzolanic Polydisperse Mineral Components on Properties of Concrete. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020;47:275–282. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_35
9. Srikakulam LM, Khed VC. Theoretical Research and Performance of Engineered Cementitious Composite. *Springer Proceedings in Materials*. 2020;8:253–264. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7827-4_25
10. Woo Sung Yum, Jung-II Suh, Dongho Jeon, Jae Eun Oh. Strength Enhancement of CaO-Activated Slag System through Addition of Calcium Formate as a New Auxiliary Activator. *Cement and Concrete Composites*. 2020;109:103572. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103572>
11. Sanytsky M, Marushchak U, Olevych Y, Novytskyi Y. Nano-Modified Ultra-Rapid Hardening Portland Cement Compositions for High Strength Concretes. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020;47:392–399. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_50
12. Шахова Л.Д., Кучеров Д.Е. Особенности поведения многокомпонентных цементов в бетонах. *Вестник Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова*. 2008;(3):27–29.
Shakhova LD, Kucherov DE. Features of the Behavior of Multicomponent Cements in Concrete. *Bulletin of Belgorod State Technological University Named after V.G. Shukhov*. 2008;(3):27–29. (In Russ.)
13. Чомаева М.Н. Экология производства цемента. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2019;2–1:8–10. <https://doi.org/10.24411/2500-1000-2019-10522>
Chomaev MN. Ecology of Cement Production. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2019;2–1:8–10. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/2500-1000-2019-10522>
14. Хохряков О.В. Композиционные цементы низкой водопотребности и строительные материалы на их основе. Дис. д-ра техн. наук. Казань; 2022. 460 с.
Khokhryakov OV. Composite Cements of Low Water Consumption and Building Materials Based on Them. Dr. Sci. (Eng.) diss. Kazan; 2022. 460 p. (In Russ.)
15. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Сибгатуллин И.Р., Гиззатуллин А.Р., Харченко И.Я. Карбонатные цементы низкой водопотребности — зеленая альтернатива цементной индустрии России. *Строительные материалы*. 2014;(5):76–82.
Khozin VG, Khokhryakov OV, Sibgatullin IR, Gizzatullin AR, Kharchenko IYa. Carbonate Cements of Low Water-Need Is a Green Alternative for Cement Industry of Russia. *Construction Materials*. 2014;(5):76–82. (In Russ.)
16. Пузатова А.В., Дмитриева М.А., Лейцин В.Н. Оценка эффективности механической активации исходных компонентов композиционного материала на основе цемента. *Вестник Инженерной школы ДВФУ*. 2024;4(61):3–17. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-4/3-17>
Puzatova AV, Dmitrieva MA, Leitsin VN. Evaluation of the Efficiency of Mechanical Activation of the Initial Components of a Cement-Based Composite Material. *Far Eastern Federal University: School of Engineering Bulletin*. 2024;4(61):3–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-4/3-17>
17. Дыкин И.В. Порошково-активированные бетоны — многоуровнево-модифицированные цементные системы. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2017;3–4(57):37–40. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.57.121>
Dykin IV. Powder-Activated Concretes — Multilevel-Modified Concrete Systems. *International Research Journal*. 2017;3–4(57):37–40. (In Russ.) <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.57.121>
18. Шнабель М., Бур А., Даттон Д. Реология огнеупорных бетонов с высокими эксплуатационными характеристиками на основе глинозема и шпинели. *Новые огнеупоры*. 2017;(3):119–126. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2017-3-119-126>
Schnabel M, Buhr A, Dutton J. Rheologie of High Performance Alumina and Spinel Castables. *New Refractories*. 2017;(3):119–126. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2017-3-119-126>
19. Юдович Б.Э., Дмитриев А.М., Лямин Ю.А., Зубехин С.А. Цементная промышленность и экология. *Цемент и его применение*. 1998;(3):11–19.
Yudovich BE, Dmitriev AM, Lyaminyan YuA., Zubekhin SA. Cement Industry and Ecology. *Cement and Its Applications*. 1998;(3):11–19. (In Russ.)
20. Shilin Yang, Bieliatynskiy A., Trachevskiy V., Meiyu Shao, Mingyang Ta. Research of Nano-Modified Plain Cement Concrete Mixtures and Cement-Based Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2023;17:50. <https://doi.org/10.1186/s40069-023-00601-8>
21. Sydor N, Marushchak U, Braichenko S, Rusyn B. Development of Component Composition of Engineered Cementitious Composites. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021;100:459–465. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_56

22. Андреев В.В., Смирнова Е.Э. *Цемент*. Патент РФ, № 2079458. 6 с. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2079458C1_19970520.pdf (дата обращения: 14.02.2025).
Andreev VV, Smirnova EE. *Cement*. RF Patent, No 2079458. 6 p. (In Russ.) URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2079458C1_19970520.pdf (accessed: 14.02.2025).
23. Брыков А.С. Сульфатная коррозия портландцементных бетонов. *Цемент и его применение*. 2014;(6):96–103.
Brykov AS. Sulfate Corrosion of Portland Cement Concretes. *Cement and Its Applications*. 2014;(6):96–103. (In Russ.)
24. Потапов В.В., Горев Д.С., Сердан А.А. Физико-химические характеристики нанокремнезема и микрокремнезема SiO₂. *Восточно-европейский научный журнал*. 2023;5–2(90):26–33. <https://doi.org/10.31618/ESSA.2782-1994.2023.2.90.370>
- Potapov VV, Gorev DS, Cerdan AA. Physical and Chemical Characteristics Ofnanosilica and Microsilica SiO₂. *Eastern European Scientific Journal*. 2023;5–2(90):26–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.31618/ESSA.2782-1994.2023.2.90.370>
25. Han-Seung Lee, Xiao-Yong Wang, Li-Na Zhang, Kyung-Taek Koh. Analysis of the Optimum Usage of Slag for the Compressive Strength of Concrete. *Materials*. 2015;8(3):1213–1229. <https://doi.org/10.3390/ma8031213>
26. Juan He, Shuya Yu, Guochen Sang, Junhong He, Jie Wang, Zheng Chen. Properties of Alkali-Activated Slag Cement Activated by Weakly Alkaline Activator. *Materials*. 2023;16(10):3871. <https://doi.org/10.37614/2949-1185.2022.1.2.007>
27. Бикбау М.Я., Бикбау Я.М., Чень Л. *Способ производства цементного клинкера*. Патент РФ, № 2342337. 2007.
Bikbau MJa, Bikbau JaM, Chehn' L. *Method of Production of Cement Clinker*. RF Patent, No. 2342337. 2007. (In Russ.)
28. Бастрьгина С.В., Конохов Р.В. Влияние кремнеземсодержащих добавок на прочностные свойства легкого бетона на пористом заполнителе. *Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Естественные и гуманитарные науки*. 2022;1(2):58–66. <https://doi.org/10.37614/2949-1185.2022.1.2.007>
- Bastrygina SV, Konokhov RV. Influence of Silica-Containing Additives on Strength Properties of Lightweight Concrete on Porous Aggregate. *Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Natural Sciences and Humanities*. 2022;1(2):58–66. (In Russ.) <https://doi.org/10.37614/2949-1185.2022.1.2.007>
29. Джаббарова Н.Э., Гасанова У.Ф. Влияние добавки микрокремнезема на прочность бетона. *Проблемы науки*. 2022;1(69):12–15.
- Dzhabbarova NE, Gasanova UF. The Effect of Silica Additives on Concrete Strength. *Problems of Science*. 2022;1(69):12–15. (In Russ.)
30. Павлова И.П., Беломесова К.Ю. Влияние вида дисперсного армирования на прочностные характеристики расширяющихся цементных вяжущих с высокой энергией расширения. В: *Электронный сборник статей III международной научной конференции «Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации»*. Новополюцк, 2021. Новополюцк; 2021. С. 111–118.
- Paulava I, Belamesava K. Influence of Disperse Reinforcement on the Strength Properties of Expansive Cement Binders with High Expansion Energy. In: *Architectural and Construction Complex: Problems, Prospects, Innovations: Electronic Collection of Articles of the III International Scientific Conference*. Novopolotsk, 2021. Novopolotsk; 2021. P. 111–118. (In Russ.)

Об авторе:

Елена Эдуардовна Смирнова, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной экологии Санкт-Петербургского государственного химико-фармацевтического университета (197376, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 14, литер А), [SPIN-код](#), [ORCID](#), esmirnovae@yandex.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Elena E. Smirnova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Industrial Ecology, Saint Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University (14, Professora Popova St., lit. A, St. Petersburg, 197376, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), esmirnovae@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 20.02.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 14.03.2025

Принята к публикации / Accepted 24.03.2025

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 581.9

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-102-111>

Оценка потенциальной опасности ядовитых растений города Ростова-на-Дону

М.М. Серeda

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

✉ seredam@yandex.ru

EDN: IJSTIP

Аннотация

Введение. Флора большинства городов слабо изучена с точки зрения токсичности, при том что люди и животные рискуют столкнуться с ядовитыми растениями. К тому же на территории населенных пунктов проникают новые потенциально опасные виды. Известны два основных пути их распространения. Первый — естественное увеличение популяции. Второй — внедрение декоративных видов в ландшафтных проектах. Ядовитые растения в городе часто выявляются только при отравлениях, ожогах кожи или глаз. Наиболее уязвимы в этом плане дети. Ситуация в России рассматривалась на примере нескольких городских экосистем, однако проблема распространения токсикофлоры в Ростове-на-Дону не изучалась. Поэтому цель представленной научной работы — оценка потенциальной опасности, которую представляют ядовитые растения в Ростове-на-Дону.

Материалы и методы. Исследовались ядовитые сосудистые растения, произрастающие в черте Ростова-на-Дону. Данные собирались в ходе полевых работ в 2023–2024 годах маршрутным методом. Также учитывались сведения о ядовитых растениях, обнаруженных в городе с 2007 по 2022 год. Названия видов растений приводятся в соответствии с базой данных Plant List¹. Класс токсичности определялся по шкале А. Филмера.

Результаты исследования. В Ростове-на-Дону обнаружено 66 видов ядовитых растений (8 % от общего числа видов флоры города). Они относятся к различным классам опасности по степени воздействия на человека и животных. Анализ таксономической структуры токсикофлоры выявил наиболее крупные группы — лютикоцветные (14 видов) и пасленоцветные (6 видов). Потенциально смертельно опасны *Hyoscyamus niger*, *Conium maculatum*, *Aristolochia clematitis*, *Convallaria majalis*, *Ricinus communis* и другие (всего 21 вид). Эколого-ценотический анализ показал, что 30 % видов токсических растений связаны с рудеральными местообитаниями — обочинами дорог и заброшенными территориями. 41 % видов ассоциированы с искусственными фитоценозами декоративного назначения. Особенно опасны декоративно ценные растения с ядовитыми плодами: *Parthenocissus sp.*, *Phytolacca americana*, *Wisteria sinensis* и др. (всего 14 видов). Биоморфологический анализ токсикофлоры выявил преобладание трав (66 %). Кустарники менее разнообразны (16 %), но широко распространены.

Обсуждение и заключение. Впервые оценена доля и потенциальная опасность ядовитых растений в экосистеме Ростова-на-Дону. Выявление токсических видов растений, их роли в ландшафте и путей распространения поможет минимизировать риски отравления ядовитыми растениями. Требуют особого внимания бесконтрольно распространяющиеся рудеральные токсические растения, среди которых обнаружены особо опасные виды. При ландшафтных работах и зеленом строительстве следует учитывать токсичность каждого экземпляра.

Ключевые слова: токсикофлора Ростова-на-Дону, токсические растения в городах, классы токсичности растений, рудеральные токсические растения, внедрение декоративных токсических растений

Благодарности. Автор благодарит редакционную команду журнала и рецензента за компетентную экспертизу и ценные рекомендации по улучшению статьи.

Для цитирования. Серeda М.М. Оценка потенциальной опасности ядовитых растений г. Ростова-на-Дону. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2025;9(2):102–111. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-102-111>

¹ Список растений «Всемирная флора онлайн» (World Flora Online, WFO). URL: <https://wfoplantlist.org/> (дата обращения: 11.02.2025).

Assessment of the Potential Risk of Poisonous Plants in Rostov-on-Don

Mikhail M. Sereda 

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

✉ seredam@yandex.ru

Abstract

Introduction. The flora of most urban areas has received scant attention regarding toxicity, resulting in the potential for humans and animals to encounter poisonous plants. Furthermore, there is an influx of new potentially hazardous species into populated areas. It is evident that there are two primary mechanisms through which their propagation occurs. The first of these is natural population increase. The second is the introduction of ornamental species in landscape projects. The presence of poisonous plants in urban areas is frequently identified solely on the basis of symptoms including poisoning, dermal and eye burns. Children are the most vulnerable in this regard. The situation in Russia has been examined using the example of several urban ecosystems; however, the distribution of toxic flora in Rostov-on-Don remains unstudied. The aim of this research is to evaluate the potential hazard posed by poisonous plants in Rostov-on-Don.

Materials and Methods. The research focused on species of poisonous vascular plants growing within the city limits of Rostov-on-Don. The data was collected during fieldwork in 2023–2024 using the route method. Information on the presence of poisonous plants on the territory of the city in 2007–2022 was also taken into account. The names of the plant species are given according to the Plant List database. The toxicity class was determined according to the A. Filmer scale.

Results. In the urban context of Rostov-on-Don, a total of 66 species of poisonous plants were identified (8% of the city's total floral biodiversity). They belonged to diverse hazard categories according to their potential impact on human and animal health. A thorough analysis of taxonomic structure of the toxic flora revealed the most prominent orders: *Ranunculales* (14 species) and *Solanales* (6 species). The potentially lethal plants within the city limits included *Hyoscyamus niger*, *Conium maculatum*, *Aristolochia clematidis*, *Convallaria majalis*, *Ricinus communis*, and others (21 species). The ecological and cenotic analysis demonstrated that almost one third of the detected toxic plant species (30%) were associated with ruderal habitats, i.e. roadsides and abandoned areas. The majority of species (41%) were found to be associated with artificial phytocenoses that were created for ornamentation. Of particular concern were plants bearing poisonous fruits of high ornamental value. This group comprised 14 species, including *Parthenocissus sp.*, *Phytolacca americana*, and *Wisteria sinensis*. A biomorphological analysis of the toxic flora revealed the predominance of perennial and annual grasses (66%). Shrubbery, conversely, exhibited a lower level of diversity (16%), yet demonstrated a more extensive geographical distribution.

Discussion and Conclusions. This is the first study to assess the potential threat posed by poisonous plants in urban ecosystems within the southern Russian region. The identification of toxic plant species, their role in the urban landscape and ways of their further development will help to minimize poisoning by poisonous plants. Uncontrollably spreading ruderal toxic plants, among which particularly dangerous species have been found, require special attention. During landscaping and green construction, the toxicity of each specimen should be taken into account.

Keywords: toxic flora of Rostov-on-Don, toxic plants in cities, classes of plant toxicity, ruderal toxic plants, introduction of ornamental toxic plants

Acknowledgements. The author 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. Sereda MM. Assessment of the Potential Risk of Poisonous Plants in Rostov-on-Don. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(2):102–111. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-102-111>

Введение. Ядовитые растения в условиях городской среды обитания представляют опасность для человека и животных. Известны случаи отравления сорными, дикорастущими растениями, а также используемыми в ландшафтном дизайне. Так, например, в Германии, с 2001 по 2010 год зарегистрировано около 13 тыс. инцидентов, причем 85 % пострадавших — дети [1]. По данным Американской ассоциации токсикологических центров, в 2000–2008 гг. 3,4 % всех отравлений в Соединенных Штатах произошло из-за растений, и почти 70 % пострадавших — дети до шести лет [2]. Анализ различных токсикологических центров в Австралии, Германии [3], Марокко [4], Новой Зеландии [5], Таиланде [6], Великобритании показал, что воздействие растений было причиной 1,8–8 % всех обращений [7]. В большинстве случаев значительная интоксикация не фиксировалась, однако были сообщения о тяжелых и опасных

для жизни отравлениях. Риски сохраняются и в условиях городской среды. Изучение городской флоры Гонконга выявило 26 видов ядовитых растений, с которыми связано 65 случаев отравления разной тяжести с 2003 по 2017 год [8]. Флора Нови-Сада (Сербия) включала 22 вида ядовитых растений, причем авторы [9] отметили их опасное соседство с детскими учреждениями.

Ядовитыми называют растения, которые при контакте или употреблении в пищу могут причинить вред здоровью или привести к летальному исходу, а также любые растения, способные вызвать токсическую и (или) смертельную реакцию [10].

Ядовитые растения тесно связаны с аллергенными, которые ранее изучались на территории Ростова-на-Дону [11]. Однако ядовитые растения могут быть гораздо более опасны, чем аллергенные.

Согласно статистике, в России ежегодно регистрируется более 15 тыс. случаев отравления ядовитыми растениями. Как правило, растительные яды воздействуют на организм через ЖКТ, глаза и кожу. 80 % пострадавших — дети младше 6 лет [12].

Анализ литературных источников выявил низкий уровень изученности распространения и видового состава ядовитых растений в городах Российской Федерации. Наиболее полная информация собрана по Саратову. Авторы [13] приводят 46 видов ядовитых растений из 29 семейств, обнаруженных в черте этого города. Фрагментарно изучалась ядовитая флора Воронежа, Буйнакска и Махачкалы [14].

Ядовитые растения Ростова-на-Дону специально не исследовались. В [15] есть отрывочные сведения по Нижнему Дону.

Цель представленной работы — оценка потенциальной опасности ядовитых растений, произрастающих в черте Ростова-на-Дону.

Материалы и методы. Исследовались виды ядовитых сосудистых растений в черте Ростова-на-Дону. Первичные данные получены маршрутным методом в ходе полевых работ в 2023–2024 гг.

Класс токсичности растений определялся в соответствии с модифицированной классификацией, предложенной А. Филмером [16].

- А — сильный токсический эффект, может вызвать серьезное заболевание или смерть;
- В — незначительный токсический эффект, при проглатывании растения возникают рвота или диарея;
- С — эффект обусловлен кристаллами оксалата (раздражение рта, языка и горла, может привести к отеку горла, затруднению дыхания, жгучей боли и расстройству желудка);
- D — сок или шипы могут вызывать кожную сыпь или раздражение.

Ростов-на-Дону находится в зоне умеренно континентального климата с мягкой зимой и жарким, сухим летом. Средняя температура воздуха, по данным многолетних наблюдений, составляет +11,0 °С. Самый холодный месяц — январь со средней температурой –2,0 °С, самый теплый — июль со средней температурой +23,4 °С. Среднегодовая сумма осадков в Ростове-на-Дону — 618 мм. Зональный тип растительности, окружающей городской ландшафт, — степи [17].

Результаты исследования. В результате исследований в черте Ростова-на-Дону выявили 66 видов ядовитых сосудистых растений, относящихся к 23 порядкам цветковых растений. По данным Д.В. Вахненко [18], вся флора Ростовской городской агломерации насчитывала 848 видов. Таким образом, доля зарегистрированных видов токсикофлоры составляет около 8 % от общего числа видов ростовской флоры.

Наибольшим по количеству токсических растений оказался порядок Ranunculales — 14 видов (21 %). К порядку Solanaceae принадлежит 6 видов (9 %). На третьем месте — порядок Asparagales (5 видов, 8 %). Остальные 20 порядков сравнительно малочисленны и включают от 1 до 4 видов.

По данным Я.М. Голованова [19], во флоре города Мелеуз (Башкортостан) обнаружено 67 видов ядовитых растений, что близко к ростовскому показателю.

Для сравнения: флора ядовитых растений Саратова на 30 % меньше ростовской. Она насчитывает 46 видов [13]. Очевидно, что большее разнообразие связано с ростовским климатом, более благоприятным для таких растений, как *Hedera helix*, *Toxicodendron radicans*, *Wisteria sinensis* и др. Они нередко используются в ландшафтном дизайне.

Изучаемая токсикофлора включает различные семейства, в том числе нехарактерные для данного региона (Phytolaccaceae, Anacardiaceae, Hydrangeaceae). Больше всего ядовитых растений относится к семействам Ranunculaceae и Solanaceae. Это вполне ожидаемо, поскольку представители этих многочисленных семейств, как правило, в разной степени токсичны. Большинство ядовитых растений Ростова-на-Дону представлены 1–2 видами. Внутривидовое разнообразие токсикофлоры весьма неоднородно, поскольку к ядовитым относятся и культурные формы. Такие декоративные культуры, как *Hosta*, *Hydrangea*, *Paeonia*, насчитывают значительное количество сортов, однако все они содержат определенные ядовитые субстанции.

В таблице 1 приводится полный список ядовитых растений, обнаруженных на территории Ростова-на-Дону.

Таблица 1

Ядовитые растения, произрастающие в Ростове-на-Дону

Название	Порядок	Биотоп ¹	Локализация ²	ЖФ ³	Токсичность	
					Класс	Вещество
<i>Hosta sp.</i>	Asparagales	Fg	Везде	Мн	В, D	Сапонины
<i>Adonis aestivalis</i>	Ranunculales	Rh	Везде	О	А	Сердечные гликозиды
<i>Alstroemeria aurea</i>	Liliales	Fg	Везде	Мн	В, D	Гликозиды
<i>Ambrosia artemisiifolia</i>	Asterales	Rh	Везде, семена	О	В	Аллергенные белки
<i>Amorpha fruticosa</i>	Fabales	Ud	Семена	К	В	Гликозид аморфин
<i>Anemonoides sylvestris</i>	Ranunculales	Fg	Надземная часть	Мн	А	Анемонин
<i>Aquilegia vulgaris</i>	Ranunculales	Fg	Везде	Мн	А	Цианиды
<i>Aristolochia clematidis</i>	Piperales	Rh	Везде	Мн	А	Алкалоид аристолохин
<i>Bryonia alba</i>	Cucurbitales	Rh, Ud	Везде, особенно плоды	Мн	А, В	Гликозид брионин
<i>Buxus sempervirens</i>	Buxales	Ud, Ra	Везде	К	В, D	Алкалоиды
<i>Cannabis sativa</i>	Rosales	Rh	Везде	О	В	Каннабиноиды
<i>Catharanthus roseus</i>	Gentianales	Fg	Везде	О	В	Алкалоиды
<i>Chelidonium majus</i>	Ranunculales	Rh	Везде, особенно корни	Мн	В, D	Алкалоиды
<i>Clematis sp.</i>	Ranunculales	Ra	Везде	Л	D	Алкалоид клематин, анемонол
<i>Colchicum autumnale</i>	Liliales	Fg	Луковицы	Мн	В, D	Колхициновые алкалоиды
<i>Coleus scutellarioides</i>	Lamiales	Fg	Везде	Мн	В, D	Дитерпеновый колеонол
<i>Conium maculatum</i>	Apiales	Rh	Везде	Дв	А	Алкалоид конииин, конгидрин, псевдоконгидрин
<i>Consolida regalis</i>	Ranunculales	Rh	Везде, особенно семена	О	А	Тритерпеновые алкалоиды
<i>Convallaria majalis</i>	Asparagales	Fg, Ud	Везде	Мн	А	Сапонин конвалларин и сердечные гликозиды (конвалларин, конваллятоксин и др.)
<i>Convolvulus arvensis</i>	Solanales	Rh	Везде	О	В	Алкалоиды: конвольвин, конволамин
<i>Delphinium ajacis</i>	Ranunculales	Rh, Fg	Везде, особенно семена	О	А	Тритерпеновые алкалоиды
<i>Cynoglossum officinale</i>	Boraginales	Rh	Везде	Мн	А	Гликозид циноглоссин
<i>Datura stramonium</i>	Solanales	Fg	Везде	О	А	Алкалоид атропин, гиосциамин, скополамин
<i>Delphinium elatum</i>	Ranunculales	Fg	Надземная часть	Мн	А	Тритерпеновые алкалоиды
<i>Digitalis purpurea</i>	Lamiales	Fg	Везде	Мн	А	Сердечные гликозиды
<i>Echium vulgare</i>	Boraginales	Rh	Везде	Мн	В, D	Гликозид циноглоссин, консолидин
<i>Ranunculus ficaria</i>	Ranunculales	Fg, Rh	Везде	Мн	А	Протоанемонин, синильная кислота
<i>Glaucium corniculatum</i>	Ranunculales	Rh	Везде	О	В	Алкалоид протопин
<i>Hedera helix</i>	Apiales	Ra	Везде	Л	В, D	Сапонин гедерин
<i>Heliotropium arborescens</i>	Boraginales	Fg	Надземная часть	Мн	А	Гликозид циноглоссин
<i>Hemerocallis fulva</i>	Asparagales	Fg	Везде	Мн	В	Гликоалкалоиды
<i>Hyacinthus orientalis</i>	Asparagales	Fg	Луковицы	Мн	В, D	Оксалаты
<i>Hydrangea macrophylla</i>	Cornales	Fg	Везде	Мн	В	Цианогенные гликозиды
<i>Hyoscyamus niger</i>	Solanales	Rh	Везде	Мн	А	Алкалоид атропин, гиосциамин, скополамин

<i>Ipomoea purpurea</i>	Solanales	Fg	Семена	О	В	Алкалоид эргин
<i>Juniperus virginiana</i>	Pinales	Ud, Ra	Надземная часть, семена	К	В, D	Спирт сабинол
<i>Juniperus foetidissima</i>	Pinales	Ud, Ra	Надземная часть, семена	К	В, D	Спирт сабинол
<i>Lactuca serriola</i>	Asterales	Rh	Везде, в синильной фазе	О	В	Смолы лактуария
<i>Lactuca tatarica</i>	Asterales	Rh	Везде	Мн	В	Кумарины
<i>Ligustrum vulgare</i>	Lamiales	Ud, Ra	Надземная часть, плоды	К	В	Гликозид лигустрин
<i>Lonicera caprifolium</i>	Dipsacales	Ud, Ra	Плоды	К	В, D	Гликозид ксилостеин
<i>Maclura pomifera</i>	Rosales	Ra	Плоды	Д	С, D	Гликозиды
<i>Narcissus poeticus</i>	Asparagales	Fg	Везде	Мн	В	Алкалоид ликорин
<i>Paeonia lactiflora</i>	Saxifragales	Fg	Везде	Мн	В	Гликозид салицин, алкалоиды
<i>Papaver rhoeas</i>	Ranunculales	Fg	Везде	О	А	Алкалоиды
<i>Papaver somniferum</i>	Ranunculales	Rh	Везде	О	А	Алкалоиды
<i>Parthenocissus quinquefolia</i>	Vitales	Ra	Плоды	Л	В	Щавелевая кислота
<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	Vitales	Ra, Ud	Плоды	Л	В	Щавелевая кислота
<i>Pelargonium zonale</i>	Geraniales	Fg	Везде	Мн	В, D	Спирт гераниол, линалиол
<i>Phytolacca americana</i>	Caryophyllales	Ra	Везде, особенно плоды	К	В	Гликопротеиды, сапонины, алкалоид фитолаккотоксин
<i>Ranunculus repens</i>	Ranunculales	Fg	Везде	Мн	А	Протоанемонин, синильная кислота
<i>Ranunculus sceleratus</i>	Ranunculales	Fg	Везде	Мн	А	Протоанемонин, синильная кислота
<i>Rhus typhina</i>	Sapindales	Ra, Ud	Надземная часть	Д	Д	Урушиол
<i>Ricinus communis</i>	Malpighiales	Fg	Везде, особенно плоды	О	А	Рицин, рицинин
<i>Ruta graveolens</i>	Sapindales	Fg	Надземная часть	К	В, D	Алкалоиды
<i>Sambucus nigra</i>	Dipsacales	Ra, Ud	Везде, особенно незрелые плоды	К	В	Гликозид d-амигдалин
<i>Sedum sp</i>	Saxifragales	Fg	Везде	Мн	В, D	Алкалоид седамин
<i>Jacobaea vulgaris</i>	Asterales	Rh	Везде	Дв	В	Алкалоид яконин
<i>Solanum dulcamara</i>	Solanales	Rh	Везде	Мн	В	Алкалоид соланин
<i>Solanum nigrum</i>	Solanales	Rh	Незрелые плоды	Мн	В	Алкалоид соланин
<i>Styphnolobium japonicum</i>	Fabales	Ra, Ud	Плоды	Д	В	Алкалоид цитизин
<i>Symphoricarpos albus</i>	Dipsacales	Ra, Ud	Плоды	К	В	Алкалоид хелидонин
<i>Toxicodendron radicans</i>	Sapindales	Ra	Надземная часть	Л	Д	Урушиол
<i>Vinca minor</i>	Gentianales	Fg	Везде	Мн	В	Алкалоиды
<i>Wisteria sinensis</i>	Fabales	Ra	Семена, плоды	К	В, D	Гликозид вистарин
<i>Aesculus hippocastanum</i>	Sapindales	Ra, Ud	Плоды	Д	В	Гликозиды, сапонины

¹ Fg — сообщества травянистых декоративных растений; Rh — рудеральные сообщества; Ud — городские дендроценозы; Ra — сообщества селитебной зоны.

² Указание на часть растения, в которой концентрируются опасные вещества.

³ ЖФ — жизненные формы растений. Д — деревья, К — кустарники, Л — лианы, Мн — многолетники, О — однолетники.

Эколого-ценотический анализ флоры ядовитых растений Ростова-на-Дону показывает связь некоторых видов с определенными типами местообитаний и ценозам (рис. 1).

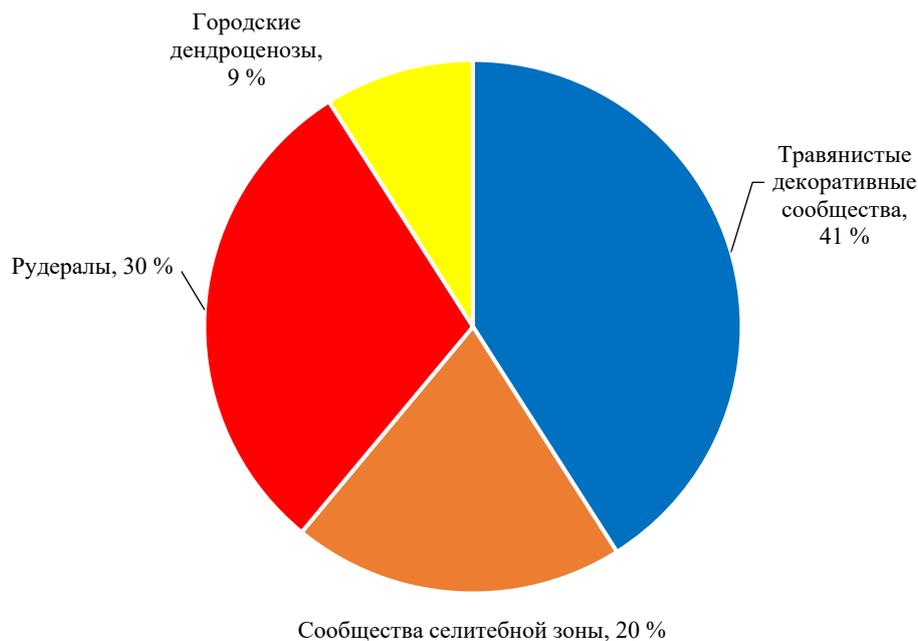


Рис. 1. Распределение видов ядовитых растений по биотопам Ростова-на-Дону

Больше всего ядовитых растений фиксируется на клумбах и в цветниках, т.е. в сообществах травянистых декоративных растений (Flower garden) — 27 видов (41 % от общего числа видов). С рудеральными сообществами (Ruderal cenoses) связано 20 видов (30 %). В селитебной зоне (Residential area) обнаружено 13 видов (20 %). Меньше всего видов входили в городские дендроценозы — 6 видов (9 %).

Полученное распределение вполне закономерно, если учесть, что искусственные сообщества цветников и клумб включают разнообразный ассортимент растений. При этом планирование элементов ландшафтного дизайна и зеленого строительства не учитывает риски отравления ядовитыми декоративными растениями. Например, представители семейства лютиковых из родов *Anemone* и *Aquilegia* содержат опасные для жизни и здоровья алкалоиды и гликозиды и при этом очень популярны у цветоводов.

Многие ядовитые растения относятся к группе рудералов. Они растут на замусоренных, неухоженных территориях, на обочинах дорог, пустырях и т.п. Рудеральные ядовитые растения отличаются высокими темпами размножения, быстро захватывают новые местообитания, то есть это мощные и неконтролируемые источники ядовитых субстанций. Группа включает такие летально опасные виды, как болиголов пятнистый (*Conium maculatum*), белена черная (*Hyoscyamus niger*), кирказон ломоносовидный (*Aristolochia clematitis*) и др.

Ядовитые растения селитебной зоны — это, как правило, одиночные экземпляры или групповые посадки в частном секторе либо элементы фитодизайна на территории жилых комплексов. При некачественном подборе ассортимента учитываются исключительно декоративные характеристики посадочного материала. Однако такие растения достаточно опасны, даже если их не много.

Последние десятилетия на юге России, включая Ростов-на-Дону, получил распространение лаконос американский (*Phytolacca americana*). Родина лаконоса — Северная Америка, но вид широко распространен на Евразийском континенте. Декоративные свойства лаконоса стали причиной его возделывания в разных странах, и в результате местные экосистемы пострадали от еще одного инвазивного вида. Лаконос негативно повлиял на биоценозы Южной Кореи [20] и Италии [21]. Он распространяется благодаря неприхотливости, быстрому росту и размножению семенами, которые образуются в больших количествах. Во всех частях лаконоса, включая привлекательные ягоды, содержатся сапонины и алкалоиды [22], которые могут вызвать серьезные отравления человека и животных.

Биоморфологический анализ ростовской токсикофлоры выявил преобладание многолетних трав. К ним относятся 30 видов растений (45 % от общего числа исследуемых видов). 14 видов (21 %) ядовитых растений — однолетние. На третьем месте оказались кустарники и деревья — 15 видов (23 %). Также среди ядовитых растений обнаружены лианы и двулетники, доля которых не превышает от общего числа видов. Полученное распределение ожидаемо и отражает соотношение жизненных форм во флоре агломерации Ростова-на-Дону, где также преобладают многолетние травы, а кустарники и деревья представлены в меньшем количестве [18]. Отметим, что наибольшее количество ядовитых растений относится именно к семействам с преобладанием травянистых форм (*Ranunculaceae*, *Solanaceae*). Сходное распределение биоморфов наблюдается и в токсикофлоре Саратова, где также ведущая роль принадлежит многолетним травам и кустарникам [13].

Классы токсичности отражают степень опасности того или иного вида для человека и животных (рис. 2).

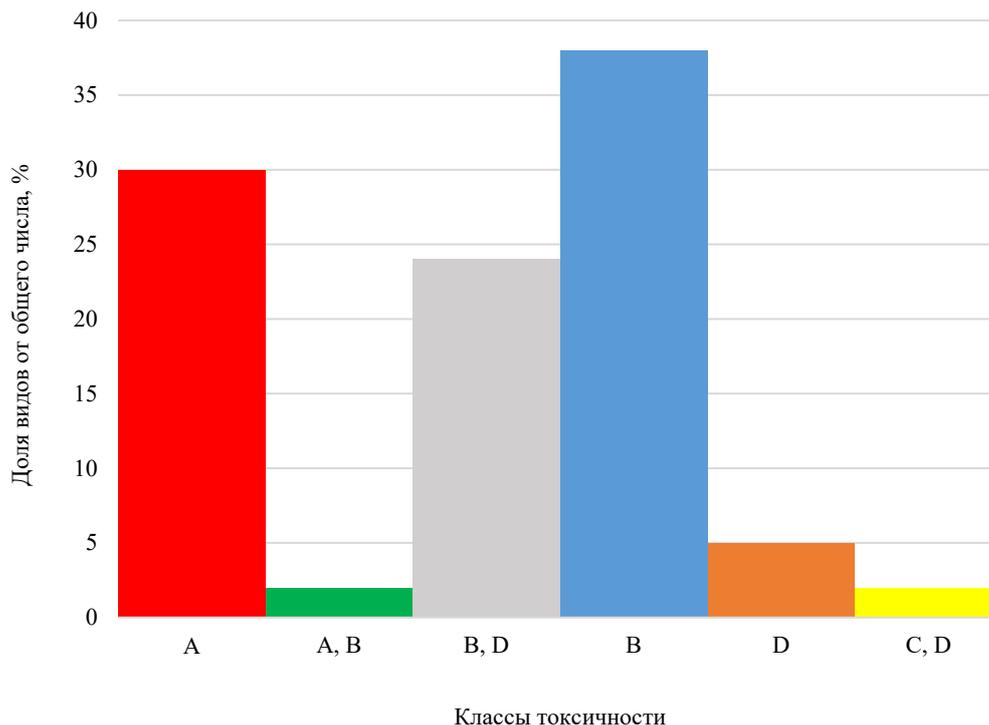


Рис. 2. Распределение видов ядовитых растений Ростова-на-Дону по классам токсичности

Некоторые виды совмещают свойства двух классов. В качестве примера можно привести плющи *Hedera helix* и *Hedera colchica* — вьющиеся, вечнозеленые лианы, которые все чаще используются в частном озеленении (рис. 3). Сок этих растений может вызывать ожоги и раздражение кожи (класс D), а при употреблении внутрь плющ вызывает расстройства ЖКТ (класс B).



Рис. 3. Плющ колхидский (*Hedera colchica*) в условиях селитебной зоны Ростова-на-Дону

Для большинства выявленных видов ядовитых растений не характерен значительный токсический эффект, хотя их употребление и приводит к расстройству ЖКТ. Таких видов — 42 (64 %). Из этого числа 16 видов вызывают раздражение или повреждение кожных покровов и, соответственно, входят в класс D. К растениям с наиболее сильным токсическим эффектом из класса A относится 21 вид (32 %). Из класса C выявлен только один вид (*Maclura pomifera*). Употребление этих растений грозит отравлением оксалатом кальция с отеками верхних отделов ЖКТ и органов дыхания. *Maclura pomifera* редко, но встречается в частном озеленении. Ее выбирают из-за интересной формы плодов.

Остановимся отдельно на амброзии полыннолистной (*Ambrosia artemisiifolia*). Ранее обсуждалась ее аллергенная активность в условиях Ростова-на-Дону [11]. Некоторые авторы указывают на содержание ядовитых веществ во всех частях амброзии, что может привести к негативным последствиям для организма [23].

Некоторые виды, часто встречающиеся в рудеральных местообитаниях, имеют неподтвержденный статус опасности, т.е. нет единого мнения об их токсичности. Это, например, дымянка Шлейхера (*Fumaria schleicheri*), звездчатка средняя (*Stellaria media*), клоповник мусорный (*Lepidium ruderale*) [19].

Токсичность растений во всех выявленных случаях обусловлена содержанием алкалоидов — 28 видов (42 % от общего числа видов), гликозидов — 17 видов (26 %), сапонинов — 5 видов (7 %) и других токсических соединений.

Опасны (особенно для детей) доступные и привлекательные растения с заметными, яркими плодами. В Ростове-на-Дону обнаружили 14 таких видов (21 % от общего числа видов). Они относятся к классу токсичности В, как правило, не дают острого токсического эффекта, но могут вызывать отравление средней тяжести. В качестве примеров можно привести *Parthenocissus sp.* [24] и *Symphoricarpos albus* [25].

Обсуждение и заключение. Среди населения Ростова-на-Дону необходимо проводить разъяснительную работу относительно возможной опасности растений, используемых в озеленении.

Описанные в данной статье научные изыскания выявили ядовитые растения, распространенные на территории города. Показано, что значительная их доля связана с рудеральными местообитаниями, где они беспрепятственно развиваются и легко доступны для людей и животных. Кроме того, разнообразие токсической флоры в городской среде увеличивается благодаря внедрению декоративных травянистых и кустарниковых форм, содержащих опасные соединения. Это следует учитывать в проектах ландшафтного дизайна.

Исследование ядовитой флоры для городов юга России проводилось впервые. Планируется изучение количественных характеристик городских растительных сообществ с токсическими видами. Полученные данные планируется использовать для подготовки рекомендаций в сфере озеленения и ландшафтного дизайна.

Список литературы / References

1. Plenert B, Prasa D, Hentschel H, Deters M. Plant Exposures Reported to the Poisons Information Centre Erfurt from 2001–2010. *Planta Medica*. 2012;78(5):401–408. <https://doi.org/10.1055/s-0031-1298253>
 2. Petersen DD. Common Plant Toxicology: A Comparison of National and Southwest Ohio Data Trends on Plant Poisonings in the 21st Century. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2011;254(2):148–153. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2010.10.022>
 3. Müller D, Desel H. Common Causes of Poisoning: Etiology, Diagnosis and Treatment. *Deutsches Ärzteblatt International*. 2013;110(41):690–699. <https://doi.org/10.3238/arztebl.2013.0690>
 4. Hanane Benzaid, Fadma Gouaz, Abba Hamadoun Touré, Mustapha Bouatia, Mohamed Oulad Bouyahya Idrissi, Mustapha Draoui. Inventory of Toxic Plants in Morocco: An Overview of the Botanical, Biogeography, and Phytochemistry Studies. *Journal of Toxicology*. 2018;13:4563735. <https://doi.org/10.1155/2018/4563735>
 5. Slaughter RJ, Beasley DMG, Lambie BS, Wilkins GT, Schep LJ. Poisonous Plants in New Zealand: a Review of Those That Are Most Commonly Enquired About to the National Poisons Centre. *The New Zealand Medical Journal*. 2012;125(1367):87–118. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23321887/> (accessed: 10.02.2025).
 6. Charuwan Sriapha, Achara Tongpoo, Sunun Wongvisavakorn, Panee Rittilert, Satariya Trakulsrichai, Sahaphume Srisuma, et al. Plant Poisoning in Thailand: A 10-Year Analysis from Ramathibodi Poison Center. *The Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health*. 2015;46(6):1063–1076.
 7. Enfield B, Brooks DE, Welch S, Roland M, Klemens J, Greenlief K, et al. Human Plant Exposures Reported to a Regional (Southwestern) Poison Control Center Over 8 Years. *Journal of Medical Toxicology*. 2018;14:74–78. <https://doi.org/10.1007/s13181-017-0643-3>
 8. Ng WY, Hung LY, Lam YH, Chan SS, Pang KS, Chong YK. Poisoning by Toxic Plants in Hong Kong: A 15-Year Review. *Hong Kong Medical Journal*. 2019;25(2):102–112. <https://doi.org/10.12809/hkmj187745>
 9. Mrđan S, Ljubojević M, Orlović S, Čukanović J, Dulić J. Poisonous and Allergenic Plant Species in Preschool's and Primary School's Yards in the City of Novi Sad. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2017;25:112–119. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.05.007>
 10. Gupta PK. *Illustrated Toxicology*. Berkeley: Elsevier; 2018. 609 p.
 11. Серета М.М. Оценка аллергенного потенциала древесной урбанофлоры города Ростова-на-Дону. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2024;8(2):17–25. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-17-25>
- Sereta MM. Assessment of the Allergenic Potential of Urban Woody Flora of Rostov-on-Don. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2024;(2):17–25. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-17-25>

12. Беркаль И.В., Васюкова А.Н. Проблема использования ядовитых растений в озеленении города. В: *Труды. 2-й региональной научно-практической конференции. городских учреждений и предприятий Амурской области «Экология города»*. Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет; 2018. С. 24–29.

Berkal IV, Vasyukova AN. The Problem of Using Poisonous Plants in Urban Landscaping. In: *Proceedings of the 2nd Regional Scientific and Practical Conference of Urban Institutions and Enterprises of the Amur Region "Ecology of the City"*. Blagoveshchensk: Far Eastern State Agrarian University; 2018. P. 24–29. (In Russ.)

13. Дурнова Н.А., Кузнецова И.А., Потапова А.С. Ядовитые сосудистые растения города Саратова. *Бюллетень ботанического сада Саратовского государственного университета*. 2019;17(1):39–54. <https://doi.org/10.18500/1682-1637-2019-1-39-54>

Durnova NA, Kuznetsova IA, Potapova AS. Poisonous Vascular Plants of the City of Saratov. *Bulletin of Botanic Garden of Saratov State University*. 2019;17(1):39–54. (In Russ.) <https://doi.org/10.18500/1682-1637-2019-1-39-54>

14. Колтырина М.В., Ложкина А.К., Кочергина М.В. К проблеме использования ядовитых растений на объектах ландшафтной архитектуры города Воронежа. В: *Труды Международной научно-практической конференции «Проблемы природоохранной организации ландшафтов»*. Новочеркасск: Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А.К. Кортунова; 2017. С. 192–196.

Koltyrina MV, Lozhkina AK, Kochergina MV. To the Problem of the Use of Poisonous Plants on the Objects of Landscape Architecture of the City of Voronezh. In: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Problems of Environmental Organization of Landscapes"*. Novocherkassk: Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov; 2017. P. 192–196. (In Russ.)

15. Зозулин Г.М., Федяева В.В. *Флора Нижнего Дона (определитель)*. Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет; 1985. 240 с.

Zozulin GM, Fedyayeva VV. *Flora of the Lower Don (Determinant)*. Rostov-on-Don: Rostov State University; 1985. 240 p. (In Russ.)

16. Filmer AK. *Safe and Poisonous Garden Plants. California Poison Control System*. Davis: University of California; 2012. 156 p.

17. Панов В.Д., Лурье П.М., Ларионов Ю.А. *Климат Ростовской области: вчера, сегодня, завтра*. Ростов-на-Дону: Донской издательский дом; 2006. 488 с.

Panov VD, Lur'e PM, Larionov YuA. *Climate of the Rostov Region: Yesterday, Today, Tomorrow*. Rostov-on-Don: Don Publishing House; 2006. 488 p. (In Russ.)

18. Вахненко Д.В. *Антропогенная трансформация флоры Северо-Восточного Приазовья в пределах Ростовской городской агломерации*. Автореф. дис. канд. биол. наук. Ростов-на-Дону; 2000. 20 с.

Vakhnenko DV. *Anthropogenic Transformation of the Flora of the Northeastern Azov Sea Region within the Rostov Urban Agglomeration*. Cand.Sci. (Biol.) diss. Rostov-on-Don; 2000. 20 p. (In Russ.)

19. Голованов Я.М., Абрамова Л.М. Флора города Ишимбай (Республика Башкортостан). *Фиторазнообразие Восточной Европы*. 2014;8(2):14–56.

Golovanov YaM, Abramova LM. Flora of the City of Ishimbai (Republic of Bashkortostan). *Phytodiversity of Eastern Europe*. 2014;8(2):14–56. (In Russ.)

20. Min Byeong-Mee. Distribution of *Phytolacca Americana* in a Coastal Sand Dune. *Journal of Ecology and Environment*. 2014;37(2):81–90. <https://doi.org/10.5141/ecoenv.2014.010>

21. Lazzaro L, Bolpagni R, Buffa G, Gentili R, Lonati M, Stinca A, et al. Impact of Invasive Alien Plants on Native Plant Communities and Natura 2000 Habitats: State of the Art, Gap Analysis and Perspectives in Italy. *Journal of Environmental Management*. 2020;274:111140. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111140>

22. Panero I, Fiorentino F, Montagna DLa, Crocenzi G, Attorre F. Germination Ecology of *Phytolacca Americana* L. in Its Invasive Range. *Plant Species Biology*. 2024;39(6):351–362. <https://doi.org/10.1111/1442-1984.12483>

23. Pei Su, Xuelian Liu, Ruili Wang, Tong Liu, Wenxuan Zhao, Mingming Sun, et al. Autotoxicity of *Ambrosia Artemisiifolia* and *Ambrosia Trifida* and Its Significance for the Regulation of Intraspecific Populations Density. *Scientific Reports*. 2022;12:17424 <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21344-8>

24. Penrith ML, Vosloo W. Review of African Swine Fever: Transmission, Spread and Control. *Journal of the South African Veterinary Association*. 2009;80(2):58–62. <https://doi.org/10.4102/jsava.v80i2.172>

25. Gilbert OL. *Symphoricarpos Albus* (L.) S. F. Blake (S. Rivularis Suksd., S. Racemosus Michaux). *Journal of Ecology*. 1995;83(1):159–166. <https://doi.org/10.2307/2261160>

Об авторе:

Михаил Михайлович Серда, кандидат биологических наук, доцент, заведующий кафедрой ботаники и биоресурсов факультета биоинженерии и ветеринарной медицины Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [Scopus](#), serdam@yandex.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Mikhail M. Sereda, Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor, Head of the Department of Botany and Bioresources, Faculty of Bioengineering and Veterinary Medicine, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [Scopus](#), serdam@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 11.03.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 05.04.2025

Принята к публикации / Accepted 16.04.2025

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 621.3.048

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-112-120>

Природный сорбент на основе цеолитсодержащих пород Татарско-Шатрашанского месторождения для очистки поверхностных и сточных вод от органических загрязнителей

А.В. Танеева ✉, Ю.В. Снигирева , Р.Н. Хизбуллин ,Д.А. Шлыкова , В.Ф. Новиков 

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Российская Федерация

✉ alinataneeva@mail.ru

EDN: LJJZLA

Аннотация

Введение. Современная производственная и экологическая повестка ставит задачу выявления оптимальных сорбентов для очистки воды от органических загрязняющих веществ. Широкое практическое применение получили такие сорбенты, как активированный уголь, диоксид кремния и др. Однако сохраняет актуальность проблема поиска оптимального по селективности сорбента. Он должен приемлемо или хорошо очищать воду от главных органических загрязнителей. В научной литературе есть сведения о перспективах использования в рассматриваемых целях сорбентов из природных цеолитсодержащих минералов. Однако такой подход недостаточно проработан, материалы малоизучены и, как следствие, редко используются для решения экологических проблем. Представленная научная работа призвана восполнить этот пробел. Ее цель — исследование сорбционных характеристик природного сорбента на основе цеолитсодержащих пород Татарско-Шатрашанского месторождения.

Материалы и методы. Базовым для данного исследования стал метод восходящей жидкостной колоночной хроматографии. Сорбционный материал загружали в хроматографическую колонку длиной 120 мм и внутренним диаметром 3 мм. Модельные органические вещества в виале перемещались по длине сорбционного слоя. В качестве модельных соединений использовали трихлорэтан, этилацетат, метилэтилкетон, дихлорэтан и трихлорэтилен. Значимые данные обобщены в виде таблиц и графически визуализированы.

Результаты исследования. Экспериментально исследованы технологические характеристики природных сорбентов, полученных на основе цеолитсодержащих пород Татарско-Шатрашанского месторождения. Определены абсолютное время удерживания исследуемых сорбатов, а также их сорбционная емкость по отношению к цеолитсодержащим породам Татарско-Шатрашанского месторождения. Установлена зависимость времени удерживания модельных органических веществ от длины сорбционного слоя, которая определяется физико-химической природой исследуемого сорбата. С этой же точки зрения (как составляющие зависимости) рассмотрены температуры кипения модельных органических веществ, дипольные моменты, показатели преломления и плотности. Экспериментальные данные статистически обработали, определили абсолютную и относительную погрешность единичного измерения. Все сорбаты, рассмотренные в рамках данной научной работы, показали значимую или высокую сорбционную емкость. Зафиксированный минимум — 34 % (метилэтилкетон), максимум — 72 % (этилацетат). При этом у этилацетата экстремально малое значение времени удерживания в 10-сантиметровом сорбционном слое (26 мин). Самое продолжительное время удерживания — у метилэтилкетона (314 мин). Его сорбционная емкость — минимальная (34 %).

Обсуждение и заключение. Экспериментально доказана перспективность исследуемого материала для очистки поверхностных и сточных вод от главных загрязнителей природной среды. Установлено, что цеолитсодержащие породы Татарско-Шатрашанского месторождения могут адсорбировать 34–72 % загрязняющих воду органических соединений. Их можно использовать в технологических процессах очистки природных и сточных вод от основных загрязнителей окружающей природной среды.

Ключевые слова: цеолитсодержащие породы, модельные органические вещества, сорбционная емкость, жидкостная хроматография, очистка воды от органических загрязняющих веществ

Благодарности. Авторы благодарят заведующего кафедрой энергообеспечения предприятий, строительства зданий и сооружений, д.т.н., профессора Ильина В.К. за помощь в организации научного исследования, предоставление лабораторного оборудования, материалов и реактивов. Спасибо рецензенту за компетентную экспертизу и редакционной команде журнала «Безопасность техногенных и природных систем» за ценные рекомендации по улучшению статьи.

Для цитирования. Танеева А.В., Снигирева Ю.В., Хизбуллин Р.Н., Шлыкова Д.А., Новиков В.Ф. Природный сорбент на основе цеолитсодержащих пород Татарско-Шатрашанского месторождения для очистки поверхностных и сточных вод от органических загрязнителей. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(2):112–120. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-112-120>

Original Theoretical Research

Natural Sorbent Based on Zeolite-Containing Rocks of Tatarsko-Shatrashan Deposit for Treatment of Surface and Waste Water from Organic Pollutants

Alina V. Taneeva  , Yuliya V. Snigireva , Radik N. Khizbullin ,

Darya A. Shlykova , Vyacheslav F. Novikov 

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

 alinataneeva@mail.ru

Abstract

Introduction. The modern industrial and environmental challenges require the identification of optimal sorbents for water purification from organic contaminants. Sorbents like activated carbon and silicon dioxide have been widely used, but the problem of selecting the optimal sorbent that can adequately purify water remains relevant. There is information in the scientific literature about potential use of sorbents from natural zeolite-containing minerals for this purpose. However, this approach is not well developed; the materials are poorly studied and, as a result, are rarely used to solve environmental problems. This work aims to fill this gap by studying the sorption properties of a natural sorbent based on zeolite-containing rocks of the Tatarsko-Shatrashan deposit.

Materials and Methods. The method of ascending liquid column chromatography became the basis for this study. The sorption material was loaded into a chromatographic column with a length of 120 mm and an inner diameter of 3 mm. The model organic substances in the vial moved along the length of the sorption layer. Trichloroethane, ethyl acetate, methyl ethyl ketone, dichloroethane, and trichloroethylene were used as model compounds. We summarized the significant data in tables and visually represented it in graphs.

Results. The technological characteristics of natural sorbents obtained on the basis of zeolite-containing rocks of the Tatarsko-Shatrashan deposit have been experimentally investigated. The absolute retention time of the studied sorbates, as well as their sorption capacity in relation to zeolite-containing rocks of the Tatarsko-Shatrashansky deposit, were determined. The dependence of the retention time of model organic substances on the length of the sorption layer, which was determined by the physical-chemical nature of the sorbate under study, has been established. From the same point of view (as components of the dependence), the boiling points of model organic substances, dipole moments, refractive indices, and densities were considered. The experimental data were statistically processed, and the absolute and relative errors of a single measurement were determined. All sorbates considered in the framework of this scientific work showed significant or high sorption capacity. The recorded minimum was 34% (methyl ethyl ketone); the maximum was 72% (ethyl acetate). At the same time, ethyl acetate had an extremely short retention time in a 10-centimeter sorption layer (26 min). The longest retention time was for methyl ethyl ketone (314 min). Its sorption capacity was minimal (34%).

Discussion and Conclusion. The prospects of the studied material for the purification of surface and waste water from major pollutants in the natural environment have been experimentally proven. It has been determined that zeolite-containing rocks from the Tatarsko-Shatrashan deposit can adsorb 34–72% of organic compounds that pollute water. They can be used in technological processes for the purification of natural and wastewater from major environmental pollutants.

Keywords: zeolite-containing rocks, model organic substances, sorption capacity, liquid chromatography, water purification from organic pollutants

Acknowledgements. The authors would like to express their gratitude to V.K. Il'in, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures for his assistance in organizing scientific research and providing laboratory equipment, materials and reagents. In addition, we appreciate the Editorial team of the Journal and the reviewer for their competent expertise and valuable recommendations for improving the article.

For citation. Taneeva AV, Snigireva YuV, Khizbullin RN, Shlykova DA, Novikov VF. Natural Sorbent Based on Zeolite-Containing Rocks of Tatarsko-Shatrashan Deposit for Treatment of Surface and Waste Water from Organic Pollutants. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(2):112–120. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-112-120>

Введение. Одно из условий экологической безопасности окружающей среды — защита водных объектов от загрязнения веществами от антропогенных и природных источников. Частный случай указанной проблемы — негативное воздействие таких органических соединений, как нефтепродукты, фенолы, ароматические углеводороды, хлорорганика [1]. Эти загрязняющие вещества сравнительно быстро распространяются в воде на значительные расстояния и вредят окружающей среде даже в соседних регионах, что может привести к необратимым изменениям в экосистеме [2]. Особенно опасны для окружающей среды и человека фенол и его производные, так как многие из них — мутагены и тератогены, способные нарушить работу эндокринной системы [3]. Кроме того, в определенных условиях молекула фенола трансформируется в соединения с более высоким классом опасности [4]. Биодegradация фенола может ускоряться летом, когда аэробные микроорганизмы интенсивно окисляют органические соединения [5]. Лимитирующая стадия этого процесса — массоперенос молекул кислорода из газовой фазы в водную [6]. Кроме фенолов в поверхностных водах обнаруживаются другие классы органических соединений: ароматические и алкилароматические, алканы, карбоновые кислоты, гексахлоран, гексахлорбензол, бенз(а)пирен, ацетатанафтен, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, бенз(а)антрацен, хризен, бензо(б)флуорантен, бензо(к)флуорантен, бензо(г,и)перилен, индено(1, 2,3-сд)пирен [7].

В [8] приведены полученные за 15 лет сведения по загрязненности органическими соединениями донных отложений реки Белая. Анализ экологического состояния поверхностных вод в разных регионах России [9] показал, что во многих случаях водные ресурсы не соответствуют нормативам. Как правило, в городах водоснабжение обеспечивается за счет поверхностных вод. Их очищают и хлорируют водоканалы [10]. Органические соединения (примеси в воде) взаимодействуют с хлором. Так образуются хлорорганические соединения, которые загрязняют питьевую воду. Ее очищают разными способами. Чаще всего задействуют сорбционные методы очистки воды от токсичных примесей с использованием активированных углей и синтетических цеолитов. Исследования последних лет показали, что для решения рассматриваемой проблемы перспективны сорбционные материалы из природных цеолитсодержащих минералов. Благодаря развитой системе макро- и микропор они эффективно очищают воду от примесей органических соединений [11]. Трехмерный алюмокремнекислородный каркас природных цеолитов пронизан системой полостей и каналов. Огромная внутренняя поверхность и квернозная структура цеолитсодержащих пород обеспечивает интенсивность адсорбционных процессов, достаточную для хорошей очистки сточных вод промышленных предприятий от токсичных примесей. В то же время природные цеолитсодержащие породы мало изучены, что препятствует их широкому применению для решения экологических проблем [12].

Цель данной работы — экспериментальное исследование технологических характеристик природных сорбентов, полученных на основе цеолитсодержащих пород Татарско-Шатрашанского месторождения.

Материалы и методы. Исследовался природный сорбент на основе цеолитсодержащих пород Татарско-Шатрашанского месторождения (таблица 1).

Таблица 1

Химический состав природного сорбента [12]

Элементы	%, масс
Диоксид кремния SiO ₂	66,00
Диоксид титана TiO ₂	0,35
Оксид алюминия Al ₂ O ₃	6,19
Оксид железа Fe ₂ O	2,65
Оксид марганца MnO	0,01
Оксид кальция CaO	17,00
Оксид магния MgO	1,45
Оксид натрия Na ₂ O	0,16
Оксид калия K ₂ O	1,43
Оксид фосфора P ₂ O ₅	0,13

Рассматриваемые природные элементы термически и кислотоустойчивы. Суммарная катионообменная способность — 130,0 мг-экв / 100 г. Основная роль в обменном процессе принадлежит кальцию. В таблице 2 приведены основные характеристики исследуемого материала.

Таблица 2

Характеристики исследуемого природного сорбента

Показатели	Физико-механические свойства
Внешний вид	Гранулы светло-серого или белого цвета
Пористость	37,25–55,72 %
Плотность	2,03–2,37 г/см ³
Механическая прочность на раздавливание	При 200 °С — 46 кг/см ² , при 2500 °С — 59 кг/см ²
Виброизнос	0,96 %
Насыпная масса	0,4–1,2 г/см ³
Объемная масса	1,10 г/см ³
Эффективный диаметр пор	0,4 Нм (4А°)
Термическая устойчивость	Выше 450 °С
Растворимость в воде	Нерастворим

Для приготовления сорбента цеолитсодержащие породы Татарско-Шатрашанского месторождения подвергали механической активации. Их размалывали в шаровой мельнице, отсеивали фракции, затем обрабатывали раствором соляной кислоты в соотношении 1:1. Далее полученный материал отмывали водой до нейтральной реакции и подвергали термообработке при температуре 450–500 °С в течение 5 часов. Полученный таким образом сорбент помещали в стеклянные хроматографические колонки длиной 150 мм, внутренним диаметром 3 мм. К нижней части колонок присоединяли виалы, заполненные исследуемыми модельными жидкостями — органическими веществами различной физико-химической природы. Исследуемые модельные органические вещества поднимались в сорбционном слое по каналам и порам цеолитсодержащих пород. Фиксировалось время подъема через каждые 10 мм сорбента и строились кинетические кривые зависимости удерживания модельных органических веществ от высоты сорбционного слоя.

Сорбционные свойства определяли по формуле:

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где A — сорбционная емкость исследуемого материала, %; m_1 — масса исходного адсорбента; m_2 — масса адсорбента, насыщенного органическим растворителем.

Для статистической обработки экспериментальных данных определяли абсолютную и относительную погрешности единичного измерения при доверительной вероятности 0,95. Результаты для сорбции гексана приводятся в таблице 3.

Таблица 3

Абсолютные и относительные погрешности определения гексана на исследуемых сорбентах

Критерии измерения	Погрешность	
	абсолютная, Δ	относительная, δ %
5	7,16	13,64
10	6,40	12,12
20	5,29	11,96
30	5,15	10,78

Результаты исследования. В таблице 4 приведены физико-химические свойства модельных органических веществ (сорбатов).

Таблица 4

Характеристики модельных сорбатов*

Модельные сорбаты	Формула	$T_{\text{кип}}$	d	n_D^{20}	t_{10}	A	μ
Трихлорэтан	CHCl_3	74,0	1,453	1,4463	152	45	1,15
Этилацетат	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	77,1	0,900	1,3720	26	72	2,48
Метилэтилкетон	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$	79,6	0,805	1,3800	314	34	2,84
Дихлорэтан	$\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$	83,5	1,253	1,4400	61	62	1,80
Трихлорэтилен	C_2HCl_3	87,2	1,464	1,4800	88	56	0,85
Гексан	C_6H_{14}	68,0	0,660	1,4160	59	46	0,05

где $*d$ — плотность, г/см³; $T_{\text{кип}}$ — температура кипения, °С; n_D^{20} — показатели преломления при температуре 20 °С; t_{10} — время удерживания модельных органических веществ в 10-сантиметровом сорбционном слое, мин; A — сорбционная емкость, %; μ — дипольный момент, D

В результате экспериментов (таблица 4) установлено экстремально малое значение времени удерживания этилацетата (26 мин). Трихлорэтан, имеющий более низкую температуру кипения (74 °С), вымывается из колонки позже, чем этилацетат с температурой кипения 77,1 °С. Очевидно, это можно объяснить более высокой молекулярной массой трихлорэтана ($M = 119,4$ г/моль) по сравнению с этилацетатом ($M = 88,11$ г/моль). При этом порядок выхода компонентов не определяется температурами их кипения. Эта зависимость сложнее. Она учитывает химическую природу используемых модельных органических веществ, а также возможность их адсорбции и десорбции порами исследуемого материала. При этом, несмотря на низкие значения времени удерживания этилацетата, его сорбционная емкость относительно высока (72 %) по сравнению с другими исследованными органическими веществами. Сорбционная емкость всех исследованных органических веществ достаточно высока (34–72 %), что позволяет использовать эти материалы для очистки воды от органических соединений.

Для оценки кинетических характеристик процесса сорбции строились зависимости, связывающие время удерживания модельных сорбатов и высоту сорбционного слоя в интервале от 0 до 5 см (рис. 1) и от 5 до 10 см (рис. 2).

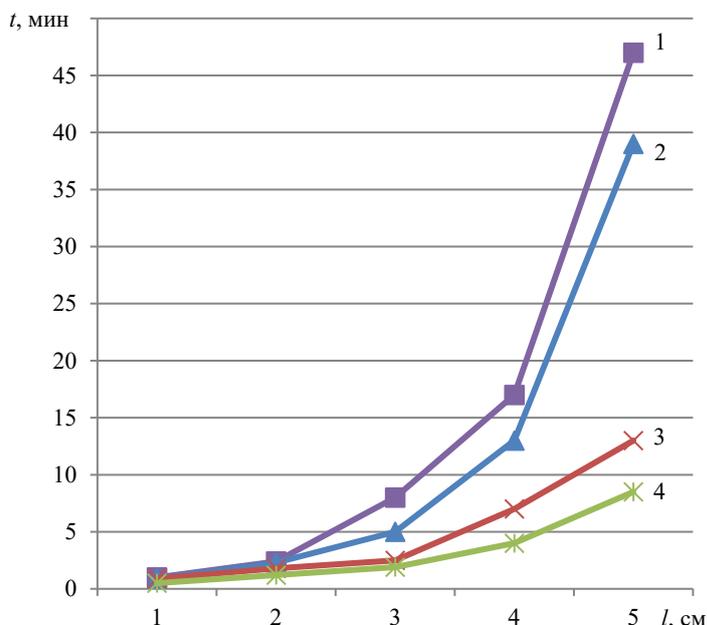


Рис. 1. Влияние удерживания модельных сорбатов на характер сорбционных процессов (слой сорбента от 0 до 5 см): 1 — метилэтилкетон; 2 — трихлорэтан; 3 — трихлорэтилен; 4 — дихлорэтан

Как видно из рис. 1, зависимость имеет параболический характер. Очевидно, это связано с тем, что в первоначальный момент времени (до 5 мм сорбционного слоя) между органической жидкостью и твердым телом нет равновесия. Оно устанавливается после сорбции, и на расстоянии более 5 см наблюдается практически линейная картина. Исключение — метилэтилкетон, который имеет достаточно высокое значение дипольного момента ($\mu = 2,84\text{D}$).

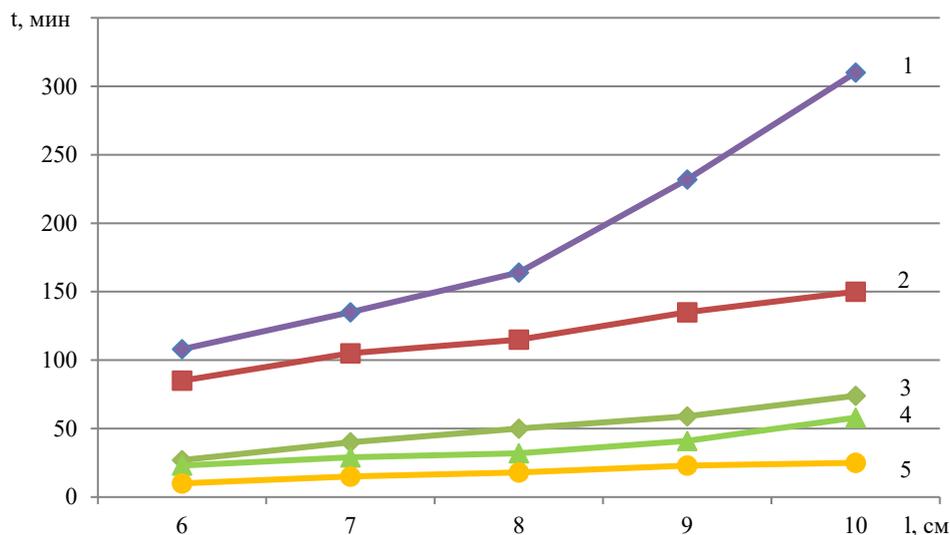


Рис. 2. Зависимость времени удерживания модельных органических веществ от высоты сорбционного слоя цеолитсодержащей породы (от 5 до 10 см): 1 — метилэтилкетон; 2 — трихлорэтан; 3 — трихлорэтилен; 4 — дихлорэтан; 5 — этилацетат

Отметим, что для всех исследованных хлорорганических соединений (трихлорэтан, дихлорэтан, трихлорэтилен) оказались почти одинаковыми углы наклона прямых (рис. 2). Это свидетельствует об аддитивности процесса сорбции для хлорорганических соединений.

Важный параметр органической молекулы — дипольный момент. Он характеризует асимметрию распределения зарядов в электрически нейтральной молекуле, что позволяет формировать электрические диполи, одинаковые по величине заряда $+g$ и $-g$. Дипольный момент молекулы определяется в результате векторного сложения дипольных моментов отдельных связей. Дипольные моменты органических соединений характеризуют полярные свойства молекулы, а также определяют направление, силу межмолекулярных электростатических взаимодействий и сорбционные свойства пористых материалов.

На рис. 3 показана зависимость времени удерживания модельных сорбатов ($t_{уд}$) от температуры их кипения ($T_{кип}$, °C) и дипольных моментов (μ , D).

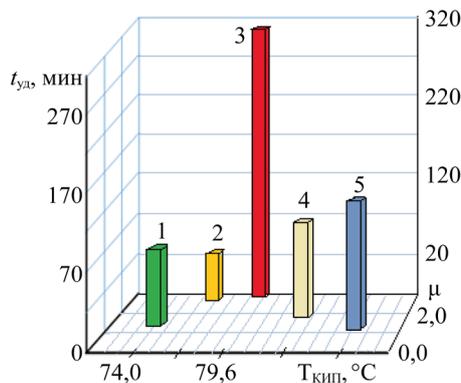


Рис. 3. Зависимость времени удерживания модельных органических веществ от температуры их кипения и дипольных моментов: 1 — трихлорэтан; 2 — этилацетат; 3 — метилэтилкетон; 4 — дихлорэтан; 5 — трихлорэтилен

Как видно из рис. 3, существенно различается время выхода этилацетата (2) и метилэтилкетона (3), хотя у них близкие значения дипольных моментов и температур кипения. Метилэтилкетон удерживается значительно дольше ($t_{уд} = 314$ мин), чем этилацетат ($t_{уд} = 26$ мин), дихлорэтан ($t_{уд} = 61$ мин), трихлорэтилен ($t_{уд} = 88$ мин), и трихлорэтан ($t_{уд} = 152$ мин). Отметим, что по классификации Роршнайдера в системе «сорбат — сорбент» метилэтилкетон определяет дисперсионное взаимодействие. Очевидно, что ведущую роль в этом процессе играют силы Ван-дер-Ваальса, и время сорбции более существенно. Это связано также с тем, что метилэтилкетон характеризуется более высокой полярностью (дипольный момент — $\mu = 2,84D$), а также более высокой температурой кипения ($T_{кип} = 79,6$ °C).

Показатель преломления тоже определяет полярность модельных органических веществ. Он связан с молекулярной рефракцией, является мерой электронной поляризуемости оболочки молекулы вещества.

На рис. 4 представлена зависимость времени удерживания модельных сорбатов от температур их кипения ($T_{\text{кип}}$, °C) и показателя преломления (nD^{20}).

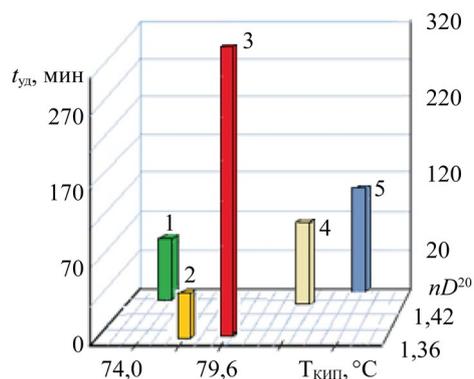


Рис. 4. Зависимость времени удерживания модельных органических веществ от температуры их кипения и показателя преломления: 1 — трихлорэтан; 2 — этилацетат; 3 — метилэтилкетон; 4 — дихлорэтан; 5 — трихлорэтилен

Как видно из рис. 4, этилацетат и метилэтилкетон близки по двум параметрам:

- температура кипения (соответственно 77,1 °C и 79,6 °C);
- преломление (соответственно 1,37 и 1,38).

Метилэтилкетон характеризуется более высоким временем удерживания по сравнению с другими исследуемыми сорбатами. По-видимому, это объясняется более высокой энергией ориентационного взаимодействия метилэтилкетона с поверхностью сорбента.

Рис. 5 позволяет рассмотреть плотность сорбатов во взаимосвязи со временем удерживания и температурой кипения.

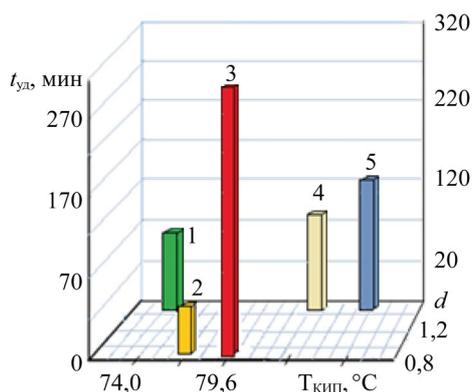


Рис. 5. Зависимость времени удерживания модельных органических веществ от температуры их кипения и плотности: 1 — трихлорэтан; 2 — этилацетат; 3 — метилэтилкетон; 4 — дихлорэтан; 5 — трихлорэтилен

Итак, в рамках представленной научной работы установлено, что сорбционная емкость рассмотренных материалов варьируется от 34 % до 72 %. Особенно высокий показатель (72 %) — у этилацетата ($C_4H_8O_2$). Другие его характеристики: дипольный момент — 2,48; время удерживания модельных органических веществ в 10-сантиметровом сорбционном слое — 26 мин; показатель преломления при температуре 20 °C — 1,3720; температура кипения — 77,1 °C; плотность — 0,9 г/см³. Метилэтилкетон схож с этилацетатом по таким показателям, как температура кипения, плотность, преломление и дипольный момент. Однако из рассмотренных сорбатов его сорбционная емкость минимальна (34 %), а время удерживания — самое продолжительное (314 мин).

Обсуждение и заключение. Результаты исследования позволяют утверждать, что качественный сорбент можно получить, используя в качестве базы цеолитсодержащие породы Татарско-Шатрашанского месторождения. Такой материал очистит воду от основных органических загрязнителей. Как выяснилось, наилучший по сорбционной емкости результат будет при необходимости удалить этилацетат. Рассматриваемый сорбент заберет из воды 72 % этого вещества. Выявленный минимум связан с метилэтилкетонном. В этом случае фиксируется самая низкая, но приемлемая сорбционная емкость (34 %).

Таким образом, сорбционные характеристики природных цеолитов следует признавать хорошими. Результаты представленной научной работы можно использовать в технологических процессах очистки воды от основных загрязнителей.

Список литературы / References

1. Baute-Pérez D, Santana-Mayor Á, Herrera-Herrera AV, Socas-Rodríguez B, Rodríguez-Delgado MA. Analysis of Alkylphenols, Bisphenols and Alkylphenol Ethoxylates in Microbial-Fermented Functional Beverages and Bottled Water: Optimization of a Dispersive Liquid-Liquid Microextraction Protocol Based on Natural Hydrophobic Deep Eutectic Solvents. *Food Chemistry*. 2021;377:131921. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131921>
2. Pradeep NV, Anupama S, Navya K, Shalini HN, Idris M, Hampannavar US. Biological Removal of Phenol from Wastewaters: A Mini Review. *Applied Water Science*. 2015;5:105–112. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0176-8>
3. Xiaowen Xie, Xiaoguo Ma, Lihui Guo, Yinming Fan, Guolong Zeng, Mengyuan Zhang, et al. Novel Magnetic Multi-Templates Molecularly Imprinted Polymer for Selective and Rapid Removal and Detection of Alkylphenols in Water. *Chemical Engineering Journal*. 2019;357:56–65. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.080>
4. Ighalo JO, Yap PS, Iwuozor KO, Aniagor CO, Tianqi Liu, Dulta K, et al. Adsorption of Persistent Organic Pollutants (POPs) from the Aqueous Environment by Nano-Adsorbents: A Review. *Environmental Research Reviews*. 2022;212:113123. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113123>
5. Казаков Д.А., Вольхин В.В., Боровкова И.С., Попова Н.П. Повышение скорости биodeградации фенола в условиях усиления массопереноса. *Экология и промышленность России*. 2014;9:32–35. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2014-9-32-35>
- Kazakov DA, Vol'khin VV, Borovkova IS, Popova NP. Increase in Speed of Phenol Biodegradation under the Conditions of Mass Transfer Enhancement. *Ecology and Industry of Russia*. 2014;9:32–35. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2014-9-32-35>
6. Quijano G, Rocha-Ríos J, Hernández M, Villaverde S, Revah S, Muñoz R, et al. Determining the Effect of Solid and Liquid Vectors on the Gaseous Interfacial Area and Oxygen Transfer Rates in Two-Phase Partitioning Bioreactors. *Journal of Hazardous Materials*. 2010;175(1–3):1085–1089. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.020>
7. Фатьянова Е.В., Хатмуллина Р.М., Галактионова Е.Б., Яппарова Г.Р., Сафарова В.И. Органические соединения в донных отложениях реки Белой. *Безопасность жизнедеятельности*. 2017;11(203):25–30.
- Fatyanova EV, Khatmullina RM, Galaktionova EB, Yapparova GR, Safarova VI. Organic Compounds in the Belaya River Bottom Sediments. *Life Safety*. 2017;11(203):25–30. (In Russ.)
8. Дымникова О.В., Борман А.Э. Динамика антропогенного загрязнения реки Глубокой в Ростовской области. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2022;1:48–56. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-1-48-56>
- Dymnikova OV, Borman AE. Dynamics of Anthropogenic Pollution of the Glubokaya River in the Rostov Region. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2022;1:48–56. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-1-48-56>
9. Танеева А.В., Дмитриева А.В., Снигирева Ю.В., Новиков В.Ф. Особенности газохроматографического метода контроля содержания фенолов в водной среде. *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского*. 2023;2(88):7–18. URL: <http://vernadsky.tstu.ru/pdf/2023/02/004.pdf> (дата обращения: 14.01.2025).
- Taneeva AV, Dmitrieva AV, Snigireva YuV, Novikov VF. Features of the Gas Chromatographic Method for Monitoring the Content of Phenols in an Aqueous Medium. *Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University*. 2023;2(88):7–18. (In Russ.) URL: <http://vernadsky.tstu.ru/pdf/2023/02/004.pdf> (accessed: 14.01.2025).
10. Сомин В.А., Бетц С.А., Комарова Л.Ф. Использование сорбатов на основе природного сырья для очистки фенолсодержащих вод. *Экология и промышленность России*. 2016;20(12):14–17. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-12-14-17>
- Somin V, Betz S, Komarova L. The Use of Sorbents Based on Natural Raw Materials for the Purification of Phenol-Containing Waters. *Ecology and Industry of Russia*. 2016;20(12):14–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-12-14-17>
11. Татаринцева Е.А., Бухарова Е.А., Ольшанская Т.Н. Сорбционный материал для очистки воды от нефтепродуктов. *Экология и промышленность России*. 2014;7:21–28.
- Tatarintseva EA, Bukharova EA, Ol'shanskaya LN. Sorption Material for Water Cleaning from Petroleum Products. *Ecology and Industry of Russia*. 2014;7:21–28. (In Russ.)
12. Буров И.А., Тюрин А.Н., Якимов А.В. Ишкаев Т.Х., Изотов В.С., Кикило Д.А. и др. *Цеолитсодержащие породы Татарстана и их применение*. Казань: ФЭН; 2001. 176 с.
- Burov IA, Tyurin AN, Yakimov AV, Ishkaev TKh, Izotov VS, Kikilo DA, et al. *Zeolite-Bearing Rocks of Tatarstan and Their Application*. Kazan: Fen; 2001. 176 p. (In Russ.)

Об авторах:

Алина Вячеславовна Танеева, кандидат химических наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий, строительства зданий и сооружений Казанского государственного энергетического университета (420066, Российская Федерация, г. Казань, ул. Красносельская, 51), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), alinataneeva@mail.ru

Юлия Вячеславовна Снигирева, аспирант кафедры энергообеспечения предприятий, строительства зданий и сооружений Казанского государственного энергетического университета (420066, Российская Федерация, г. Казань, ул. Красносельская, 51), [ORCID](#), sneg987@mail.ru

Радик Накибович Хизбуллин, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электрических станций им. В.К. Шибанова Казанского государственного энергетического университета (420066, Российская Федерация, г. Казань, ул. Красносельская, 51), [SPIN-код](#), [ORCID](#), rad-khizbullin@mail.ru

Дарья Андреевна Шлыкова, аспирант кафедры электрических станций им. В.К. Шибанова Казанского государственного энергетического университета (420066, Российская Федерация г. Казань, ул. Красносельская, 51), [ORCID](#), zagrek90@inbox.ru

Вячеслав Федорович Новиков, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры энергообеспечения предприятий, строительства зданий и сооружений Казанского государственного энергетического университета (420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51), [SPIN-код](#), [ORCID](#), npo_aist@mail.ru

Заявленный вклад авторов

А.В. Танеева: разработка методологии, визуализация.

Ю.В. Снигирева: проведение исследования, написание черновика рукописи.

Р.Н. Хизбуллин: проведение исследования, формальный анализ.

Д.А. Шлыкова: валидация результатов.

В.Ф. Новиков: разработка концепции, научное руководство, рецензирование и редактирование рукописи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Alina V. Taneeva, Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor of the Department of Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures, Kazan State Power Engineering University (51, Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), alinataneeva@mail.ru

Yuliya V. Snigireva, Postgraduate Student of the Department of Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures, Kazan State Power Engineering University (51, Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russian Federation), [ORCID](#), sneg987@mail.ru

Radik N. Khizbullin, Cand.Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Electric Stations Named after V.K. Shibanov Department, Kazan State Power Engineering University (51, Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), rad-khizbullin@mail.ru

Darya A. Shlykova, Postgraduate Student of the Electric Stations Named after V.K. Shibanov Department, Kazan State Power Engineering University (51, Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russian Federation), [ORCID](#), zagrek90@inbox.ru

Vyacheslav F. Novikov, Dr. Sci. (Chemistry), Professor, Professor of the Department of Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures, Kazan State Power Engineering University (51, Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), npo_aist@mail.ru

Claimed contributorship:

AV Taneev: methodology development, visualization.

YuV Snigireva: conducting research, manuscript drafting.

RN Khizbullin: conducting research, formal analysis.

DA Shlykova: validation of the results.

VF Novikov: concept development, academic advising, review and editing of the manuscript.

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

All authors have read and approved the final manuscript.

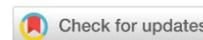
Поступила в редакцию / Received 03.02.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 26.02.2025

Принята к публикации / Accepted 17.03.2025

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 614.849

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-121-135>

Методологический принцип оценки обеспечения безопасности персонала на основе вероятности возникновения негативных событий



EDN: PLHHCE

А.И. Фомин¹✉, Д.А. Бесперстов², А.А. Трубицын³, Н.В. Трубицына³,
Е.А. Попова², В.А. Петрова²

¹ Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли,
г. Кемерово, Российская Федерация

² Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация

³ Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачёва,
г. Кемерово, Российская Федерация

✉ fomin-ai@kuzbasscot.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время для каждой сферы деятельности человека существует комплекс мероприятий, направленных на повышение его безопасности при воздействии различных негативных факторов, наносящих вред жизни и здоровью. Несмотря на наличие и соблюдение определенного перечня установленных мер, в Российской Федерации от пожаров тем не менее ежегодно гибнет около 8 000 человек. В связи с этим цель данной работы — усовершенствовать имеющуюся концепцию обеспечения пожарной безопасности. Для этого должны быть определены конкретные условия для улучшения существующих форм и методов оценки защищенности объектов и населения от пожаров. В их основу положен статистический анализ, позволяющий оценить вероятность возникновения пожаров и гибели людей на них, зависимость ее от функционального назначения объекта, причин возгораний и социального положения пострадавших.

Материалы и методы. План проведения исследования предусматривал теоретическую и практическую части. Так, для решения проблемы взаимосвязи формы оценок пожароопасности и условий соответствия их нормативно-правовой базе РФ в области пожарной безопасности изложен методологический принцип «одна форма оценки — одно условие соответствия». Данный принцип основан на анализе существующего законодательства Российской Федерации. Для того чтобы определить эффективность той или иной формы оценки конкретного объекта, предложен вероятностный подход, то есть определение риска возникновения пожаров и гибели людей на них при условии ее применения.

Результаты исследования. Была определена вероятность возникновения пожаров и смертельных случаев на них для отдельных классов функциональной опасности объектов, позволяющая рассчитать величину ожидаемого риска гибели людей при условии применения одной из определенных законодательством форм оценок пожарной безопасности. Предлагаемый методологический принцип изложен в виде проекта и математических расчётов, предоставленных на блок-схемах и в таблицах, наглядно описывающих проведение исследования, что облегчает их понимание. Определены как предлагаемые, так и существующие методологические принципы с изложением их недостатков и положительных аспектов. Предложены возможности реализации и дополнения форм и условий обеспечения пожаробезопасности объекта.

Обсуждение и заключение. Проведённое исследование позволит разработать методы математического моделирования опасных условий труда работников, а также определить перечень социальных и экономических рисков на производственных объектах, который должен стать необходимым инструментом для специалистов и собственников, обеспечивающих безопасность на производстве.

Ключевые слова: форма оценки, условия соответствия, обеспечение безопасности, управление рисками, методологический принцип, фактические риски, ожидаемые риски, пожарная безопасность

Благодарности. Авторы выражают благодарность рецензентам и сотрудникам редакции за внимательное отношение к статье и помощь в повышении её качества.

Для цитирования. Фомин А.И., Бесперстов Д.А., Трубицын А.А., Трубицына Н.В., Попова Е.А., Петрова В.А. Методологический принцип оценки обеспечения безопасности персонала на основе вероятности возникновения негативных событий. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(2):121–135. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-121-135>

Original Theoretical Research

Methodological Principle for Personnel Safety Assessment Based on Likelihood of Negative Events

Anatoly I. Fomin¹✉, Dmitrii A. Besperstov², Anatoly A. Trubitsyn³, Nelya V. Trubitsyna³, Ekaterina A. Popova², Valeriya A. Petrova²

¹ Vostochniy Research Institute for Mining Safety, Kemerovo, Russian Federation

² Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation

³ T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

✉ fomin-ai@kuzbasscot.ru

Abstract

Introduction. Currently, for each area of human activity, there is a set of measures aimed at improving its safety from the effects of various negative factors that harm life and health. However, despite the existence and implementation of these measures, around 8,000 people still die from fires each year in the Russian Federation. Thus, the aim of the work is to improve the existing fire safety concept by defining a specific compliance condition for each specific type of assessment in this area. The basis for improving current methods and approaches to assessing the protection of facilities and population from fires is statistical analysis. This allows us to evaluate the likelihood of fire incidents and casualties based on the functional use of a facility, the causes of fires, and the social background of victims.

Materials and Methods. The research plan included both a theoretical and practical part. To solve the problem of the relationship between assessment forms and compliance conditions, we outlined the methodological principle of "one assessment form — one compliance condition". This principle was based on the analysis of the existing regulatory framework of the Russian Federation in the field of fire safety. In order to assess the effectiveness of a particular form of assessment for a particular facility, we proposed a probabilistic approach. This involved determining the risk of fire and deaths in the facility, given the implementation of the assessment form.

Results. As a result of the study, we determined the average probability of fires and fatalities for certain classes of functional hazards of objects. This allowed us to calculate the expected risk of death if one of the legal forms of fire safety assessment was applied. The proposed methodological approach was presented in the form of a draft, and the mathematical calculations were provided in the form of flowcharts and tables. These visual representations described the research and made it easier to understand. Both the proposed and existing methodological approaches were identified, highlighting their disadvantages and advantages. We proposed implementing and adding new forms and conditions to ensure the fire safety of facilities.

Discussion and Conclusion. The work will make it possible to develop methods for mathematically modeling hazardous working conditions for employees and to identify a catalogue of social and economic risks at industrial facilities. This is a necessary tool for professionals and owners to ensure industrial safety.

Keywords: assessment form, compliance conditions, safety provision, risk management, methodological principle, actual risks, expected risks, fire safety

Acknowledgements. The authors would like to express their gratitude to the reviewers for their critical assessment of the submitted materials and their suggestions for improving the quality of research results.

For citation. Fomin AI, Besperstov DA, Trubitsyn AA, Trubitsyna NV, Popova EA, Petrova VA. Methodological Principle for Personnel Safety Assessment Based on Likelihood of Negative Events. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(2):121–135. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-121-135>

Введение. В настоящее время в Российской Федерации и за рубежом ведется интенсивная работа по повышению безопасности условий труда и жизни граждан. В частности, безопасность населения [1] определена основополагающими законодательными актами нашей страны [2]. Но несмотря на это количество случаев травматизма, пожаров и чрезвычайных ситуаций техногенного характера не уменьшается. Особую опасность для населения и предприятий представляют крупные аварии, пожары и чрезвычайные ситуации федерального или межрегионального масштаба.

Работа по профилактике пожаров проводится и у нас в стране, и за рубежом. Так, активно ведется разработка стратегии их предотвращения в Португалии, где группой заинтересованных специалистов тщательно анализируются причины возникновения пожаров для последующего внесения необходимых поправок в законодательную базу страны [3]. Катастрофические пожары на землях лесного фонда Бразилии в 2020–2021 гг. послужили стимулом для разработки необходимых мер по их недопущению в будущем. Там, в частности, предложены новые способы предотвращения пожаров и разработаны успешные стратегии управления ими [4].

С учётом вышеизложенного можно сделать вывод о том, что требуется дальнейшая актуализация существующих мер по повышению безопасности предприятий и персонала, а также разработка новых с учётом современных условий и требований. В этом авторы видят цель своего исследования.

Материалы и методы. В основу проведенного анализа положено классическое правило расчета риска (вероятности) возникновения негативной ситуации [5]. Эффективность формы оценки пожарной безопасности для того или иного объекта зависит от ожидаемых рисков возникновения пожара и гибели людей на нём ($R_{(ср.ф)}$) [6]. Иными словами, для объекта, соответствующего определенному классу функциональной пожарной опасности, моделируется негативная ситуация — возникновение пожара, а далее с использованием классического правила сложения вероятностей [7] определяется риск гибели людей [8], зависящий от назначения объекта, причин возникновения пожара и социального положения пострадавших ($R_{(ср.о)}$). Численные значения для расчетов взяты из статистических данных по пожарам в Российской Федерации за 2022 год, находящихся в свободном доступе в сети Интернет на официальных ресурсах. Расчеты выполнены с использованием инженерного калькулятора с расширенным набором функций, обеспечивающего требуемую точность и поддержку сложных математических операций.

Результаты исследования. Для разработки мероприятий, необходимых для обеспечения безопасности объекта и его персонала, следует оценить состояние предприятия и определить, при каких условиях достигается защищенность и его, и работников от опасностей, связанных с производством.

В соответствии с нормами пожарной безопасности [9] определены формы оценок, их положительные и отрицательные значения [10], которые представлены в таблице 1 [11].

Таблица 1

Положительные и отрицательные значения существующих форм оценок соответствия объекта требованиям пожарной безопасности

Форма оценки	Положительные аспекты	Отрицательные положения
Федеральный государственный пожарный надзор и др.	Государственная, финансово независимая форма оценки, результаты предложенных мероприятий не влияют на денежное вознаграждение инспектора ГПН	Нагрузка на предприятия и граждан в виде административного воздействия и отрыва от основного вида деятельности на участие в контрольно-надзорных мероприятиях и проверках

Положительные и отрицательные положения существующих условий соответствия представлены в таблице 2.

Таблица 2

Условия соответствия объектов с указанием положительных и отрицательных аспектов

Условия соответствия	Положительные аспекты	Отрицательные положения	
При выполнении требований технического регламента с учетом	требований пожарной безопасности	Эталон мероприятий: формирование понимания физическими лицами и организации общих требований ПБ; в результате технического регулирования разделение на обязательное и добровольное применение	Ограниченность развития организаций из-за государственных рамок (административных барьеров); государственное вмешательство при формальных нарушениях требований, без фактического их влияния на безопасность; изменение, исключение требований и введение их вновь подтверждает недоработанность обязательных мероприятий (требование ради требования)
	пожарного риска	Расчетным путем возможно определить безопасность людей, в том числе при наличии нарушений требований пожарной безопасности	Сложные математические расчеты; учитываются не все опасные факторы пожара и параметры зданий и сооружений

В свою очередь, условия достижения безопасности объекта выполняются при реализации системы обеспечения безопасности, представленной на блок-схеме (рис. 1).

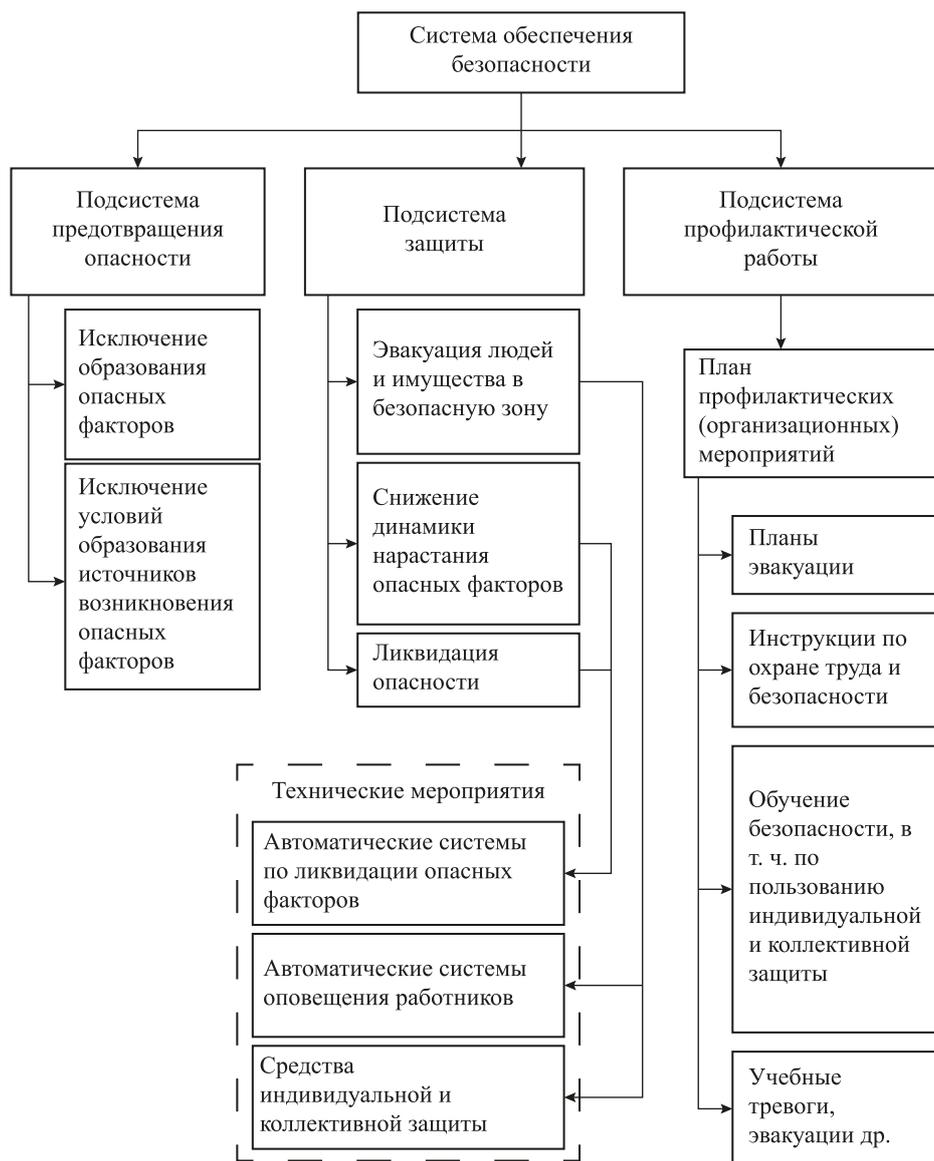


Рис. 1. Система обеспечения пожарной безопасности объектов

С учётом положительных и отрицательных оценок обеспечения безопасности предприятий и его работников в таблицах 3–6 представлены дополнительные оценки пожарной опасности и мероприятия по совершенствованию их применения.

Таблица 3

Совершенствование существующих форм оценок обеспечения безопасности предприятий и его работников

Форма оценки	Совершенствование формы мероприятия
Независимая оценка пожарного риска (аудит пожарной безопасности)	Законодательная возможность введения экспресс-оценок и программного обеспечения для этих целей, определение требований к лицам, осуществляющим НОР
Федеральный государственный пожарный надзор	Профилактические мероприятия не должны быть основанием для инициирования проверок. Права и обязанности инспекторов ФГПН должны иметь адресность, исключить новацию «иные»

Таблица 4

Дополнительные формы оценок соответствия объектов

Дополнительные формы оценок	Основания для внедрения дополнительных форм оценок
Региональный государственный противопожарный надзор	90 % пожаров и случаев гибели людей приходится на жилые дома, но федеральный государственный пожарный надзор в жилых помещениях не осуществляется
Профилактика нарушений	Предусмотренная законодательством форма оценки в виде профилактического мероприятия наравне с контрольно-надзорным

Таблица 5

Совершенствование существующих условий соответствия объектов защиты

Условия соответствия		Совершенствование условий
При выполнении требований технического регламента с учетом:	требований пожарной безопасности	В связи со «слепым» исполнением требований, не всегда влияющих на пожароопасность объекта, не предусматривающих финансовых затрат со стороны организаций, их выполнение формально. Необходимо расширение разработок локальных требований, адресно-актуальных для объекта защиты
	пожарного риска	Введение на уровне НПА различных расчетных методик, в том числе разработанных физическими лицами, кроме федеральных органов исполнительной власти (МЧС России). Пожарные риски должны быть сопряжены с иными, которые могут привести к пожару (поджог, антитеррор, промышленная безопасность)

Таблица 6

Дополнительные условия обеспечения пожарной безопасности на объекте

Дополнительные условия соответствия	Основания для внедрения дополнительных условий
Акт контрольного (надзорного) мероприятия ФГПН без нарушений	Как независимая государственная форма оценки, является наиболее объективным условием соответствия. Не требует дополнительных финансовых затрат для предприятий и физических лиц. Возможно привлечение специалистов, экспертов и экспертных организаций
Наступление опасных факторов пожаров после завершения эвакуации людей	Отсутствие необходимости в экологических затратах на выполнение требований ПБ при эвакуации людей до наступления опасных факторов пожара. Имуществом граждане предприятий имеют право рисковать и страховать его

Совершенствования и дополнения основаны на принципах обеспечения и повышения безопасности работников и имущества предприятия.

Проведённый анализ позволит разработать новые методологические принципы оценки и обеспечения безопасности предприятия на основе управления рисками.

Общий существующий принцип оценки и условий безопасности представлен в виде блок-схемы на рис. 2.

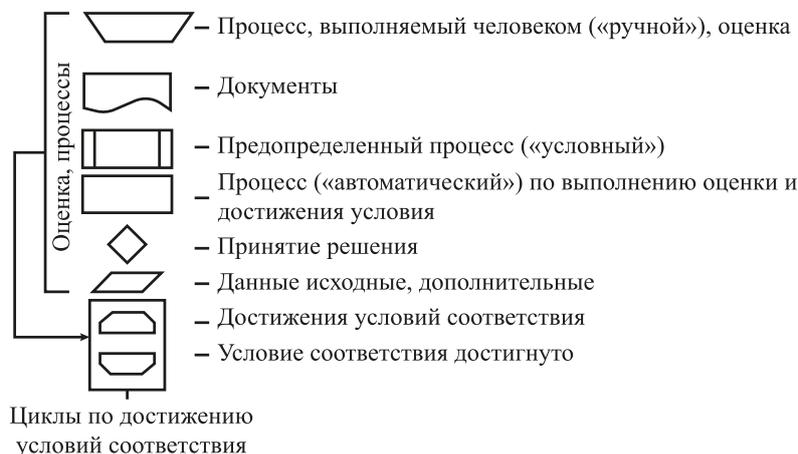


Рис. 2. Существующий принцип оценки и условий обеспечения пожаробезопасности

Существующий методологический принцип оценки и обеспечения пожарной безопасности представлен в виде общей блок-схемы, так как нормами предусмотрены не взаимосвязанные друг с другом девять форм и пять условий соответственно (рис. 3).

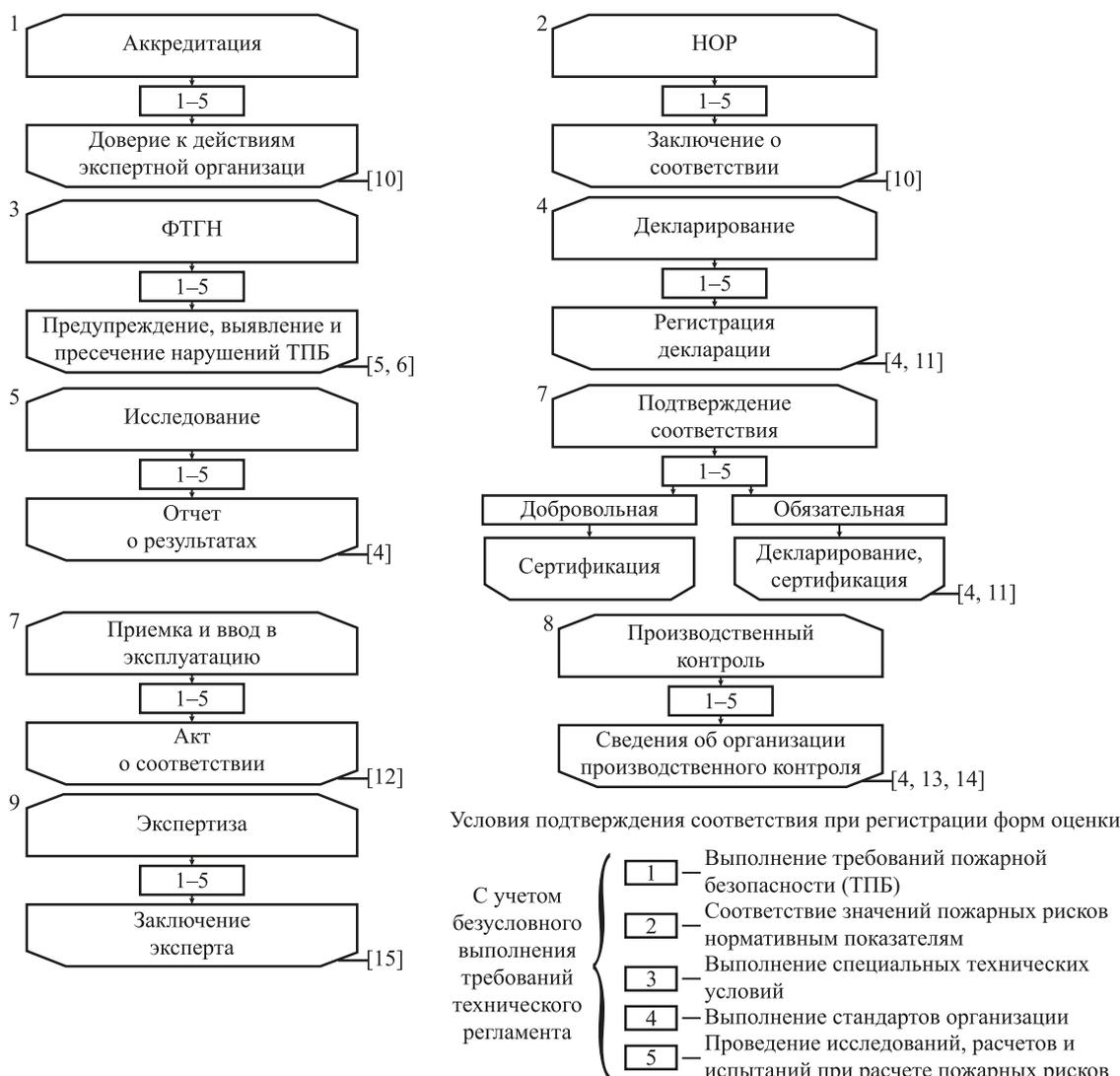


Рис. 3. Существующий методологический принцип оценки и обеспечения пожаробезопасности объектов

С учётом вышеизложенного для решения проблемы взаимосвязи формы оценок и условий соответствия предлагается методологический принцип «одна форма оценки — одно условие соответствия» (таблица 7) [12].

Таблица 7

Одна форма оценки — одно условие соответствия

№ п\п	Форма оценки		Условие соответствия	
	существующие	предлагаемые	существующее	предлагаемое
1	Аккредитация			Соответствие оборудования, помещений, работников
2	Федеральный государственный пожарный надзор		Выполнение требований пожарной безопасности	

Данный принцип позволит обеспечить все условия безопасности с учётом выбранной необходимой формы оценки. Здесь также наглядно показано, какая форма реализуется при определённых условиях. Выбранный принцип не позволит подменять оценки малоэффективными формами для достижения необходимых условий соответствия.

Обеспечение безопасности работников и предприятий по предлагаемому принципу представлено в виде блок-схемы, являющейся методологическим обеспечением (рис. 4).

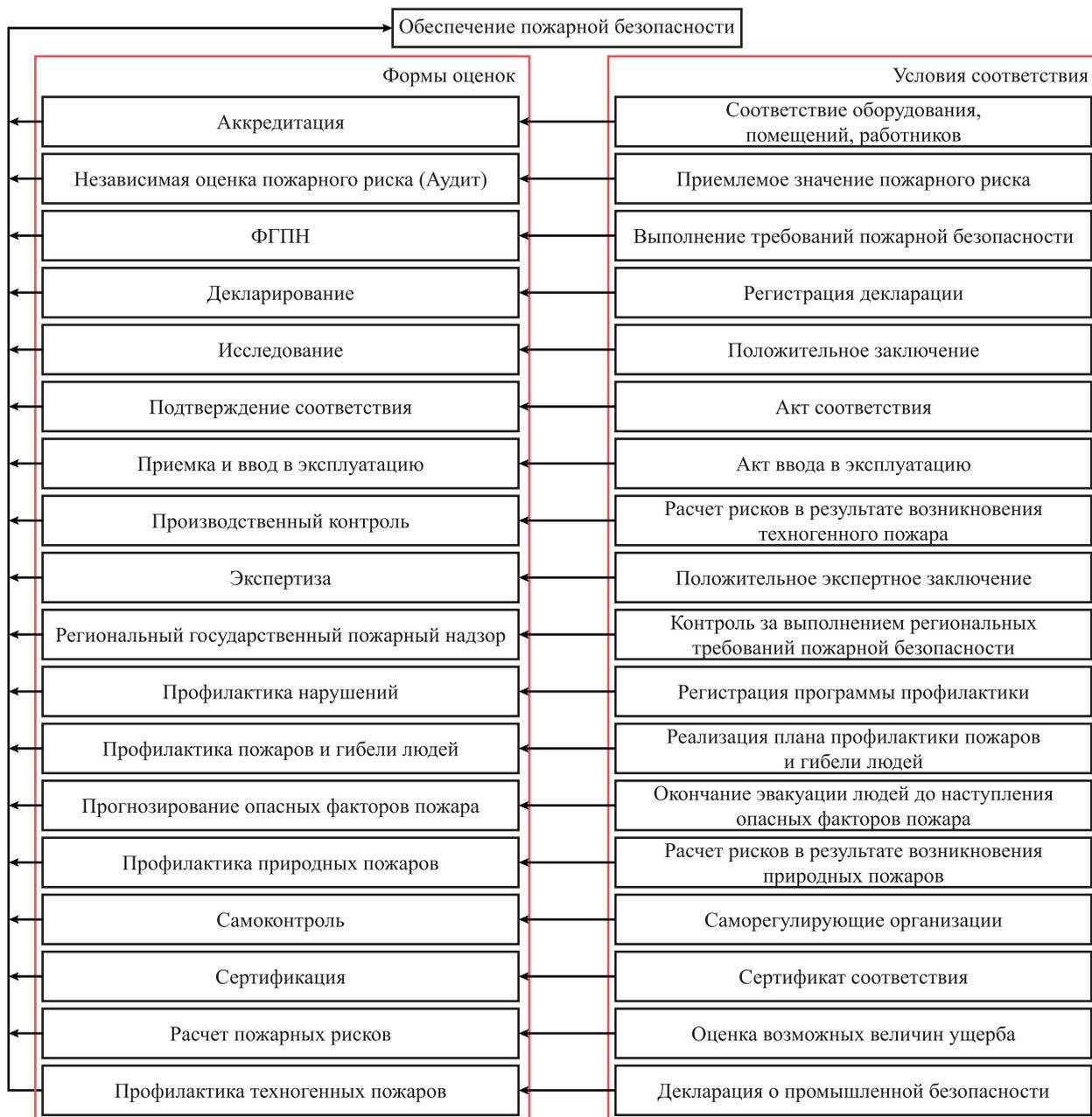


Рис. 4. Методологическое обеспечение пожаробезопасности людей, основанное на принципе «одна форма — одно условие»

Таким образом, обеспечение пожарной безопасности выполняется при реализации прилагаемых форм и условий. Реализация методологии изложена в виде блок-схемы на рис. 5.

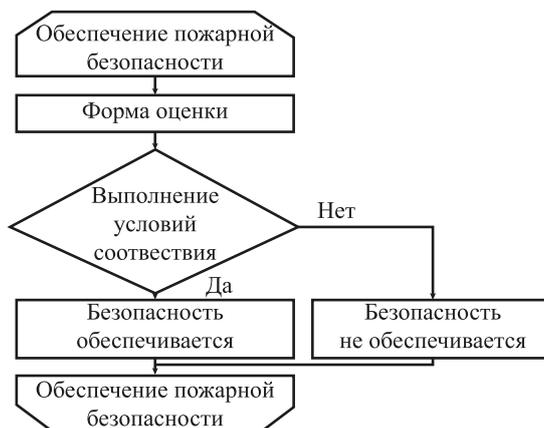


Рис. 5. Предлагаемый методологический принцип обеспечения пожаробезопасности людей

Для практической реализации предлагаемого методологического принципа необходимо провести анализ фактических рисков возникновения негативных ситуаций. Существующие принципы обеспечения пожарной безопасности представлены в виде блок-схемы на рис. 6.

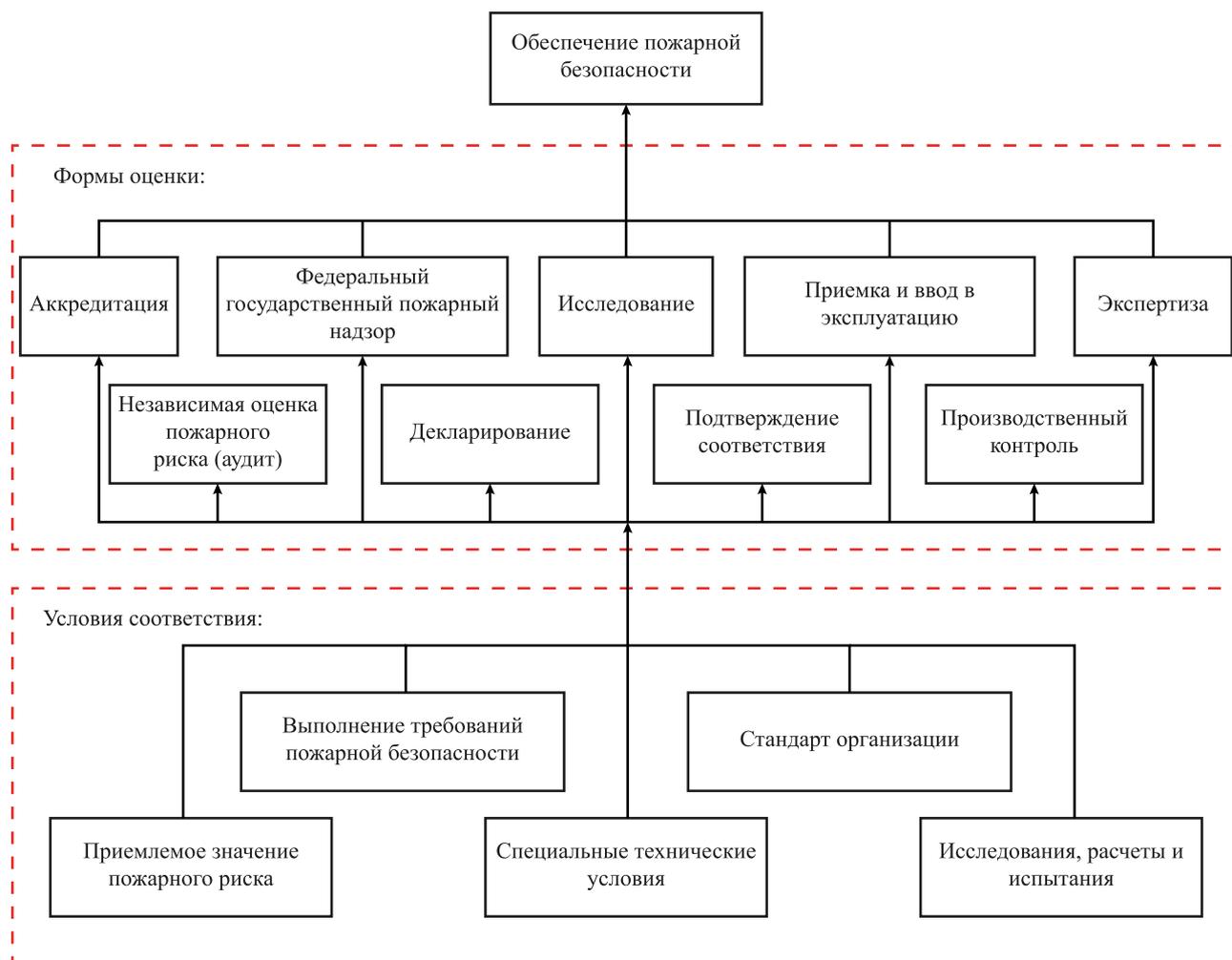


Рис. 6. Существующий принцип обеспечения пожарной безопасности на основе нормативных форм оценок и условий соответствия

Из данного принципа следует, что все условия соответствия могут быть исследованы для любых форм оценок.

С учётом статистических показателей по пожарам вероятностные критерии, являющиеся фактическими рисками, приведены в таблице 8.

Таблица 8

Распределение вероятностей возникновения пожаров и гибели людей на них на объектах, расположенных на территории Российской Федерации, 2022 год

Номер объекта	Наименование объекта	Класс функциональной пожарной опасности	Количество объектов, ед. (N_0)	Количество пожаров в 2022 году, ед. ($N_{п}$)	Вероятность возникновения пожара на объекте ($R_{п}$)	Количество погибших людей (N_f)	Вероятность гибели на пожарах ($R_{г.п.}$)	Вероятность гибели на объекте от пожара ($R_{г.о}$)
1	Здания производственного назначения	Ф 5.1	173 544	2 349	$1,35 \cdot 10^{-2}$	46	$1,96 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$
2	Складские здания, сооружения	Ф 5.2	100 147	744	$7,4 \cdot 10^{-3}$	10	$1,34 \cdot 10^{-2}$	$9,99 \cdot 10^{-5}$

В данной таблице вероятность пожара объекта определена по формуле [13]

$$R_{\Pi} = \frac{N_{\Pi}}{N_o} \quad (1)$$

Вероятность гибели людей на объектах от пожаров определена по формуле

$$R_{\Gamma o} = \frac{N_{\Pi}}{N_o} \quad (2)$$

Вероятность гибели людей на пожарах:

$$R_{\Gamma \Pi} = \frac{N_{\Pi}}{N_o} \quad (3)$$

где N_{Π} — количество пожаров, шт.; N_o — количество объектов, шт.

Данные о риске гибели людей на пожарах по причинам представлены в таблице 9.

Таблица 9

Вероятность гибели людей в Российской Федерации за 2022 год в зависимости от причин

Наименование причины гибели людей:	Количество погибших за 2022 год, чел.	$R_{\Gamma \Pi}$
Отравление токсичными продуктами горения	2 828	$1,9 \cdot 10^{-5}$
Неустановленные причины	1 519	$1,04 \cdot 10^{-5}$
Воздействие высокой температуры	1 343	$9,2 \cdot 10^{-6}$

Вероятность гибели людей в зависимости от причин ($R_{\Gamma \Pi}$), то есть от воздействия первичных и вторичных опасных факторов пожара [14], определяется по формуле

$$R_{\Gamma \Pi} = \frac{N_{\Gamma \Pi}}{N_{\text{нас.РФ}}} \quad (4)$$

где $N_{\Gamma \Pi}$ — количество погибших людей в зависимости от причин, чел; $N_{\text{нас.РФ}}$ — население Российской Федерации в 2022 году.

Данные о вероятности гибели населения Российской Федерации в разрезе их социального положения приведены в таблице 10.

Таблица 10

Вероятность гибели людей в Российской Федерации за 2022 год в разрезе их социального положения

Социальное положение людей, погибших на пожарах, в том числе	Количество погибших людей в 2022 году в РФ, чел.	$R_{\text{соц.п}}$
рабочие рабочих специальностей	710	$4,8 \cdot 10^{-6}$
инженерно-технические работники	19	$1,3 \cdot 10^{-7}$
руководитель организации (предприятий)	7	$4,8 \cdot 10^{-8}$

Вероятность гибели людей от пожаров в разрезе их социального положения определена по формуле:

$$R_{\Gamma \Pi} = \frac{N_{\text{соц.п}}}{N_{\text{нас.РФ}}} \quad (5)$$

где $N_{\text{соц.п}}$ — количество погибших людей в Российской Федерации за 2022 год по их социальному положению, чел.

Далее проведём сопряжение показателей рассчитанных рисков, распределив объекты пожаров по причинам и социальному положению погибших. Для удобства введем условное обозначение объектов: 1, 2, 3...

Данные сопряжения предоставлены в таблице 11.

Таблица 11

Сопряженные сведения по объектам, на которых произошли пожары, в том числе с гибелью людей, о причинах гибели и социальном положении погибших

Причина гибели людей	Условные обозначения объекта, на котором погибли по причине	Социальное положение погибших	Условные обозначения объекта, на котором произошла гибель людей в зависимости от социального положения
Отравление токсичными продуктами горения	1, 2, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13	Рабочие рабочих специальностей	1, 2, 3
Неустановленные причины	10, 12, 13	Инженерно-технические работники	1, 2, 7, 8

Далее по формуле ниже определим общую вероятность гибели людей в зависимости от их социального положения и причин:

$$R_{\text{ср.о}} = \frac{R_{\text{п}} + R_{\text{г.о}} + \sum_N \frac{R_{\text{пр.г}}}{N} + \sum_N \frac{R_{\text{соц.п}}}{N}}{4}, \quad (6)$$

где N — количество вероятностей негативных событий, связанных с пожарами.

Расчетные сведения представим в таблице 12.

Таблица 12

Сводные сведения вероятностей возникновения негативных событий, связанных с пожарами, и гибели людей на них в России за 2022 год

Порядковый номер объекта	Наименование объекта	Класс функциональной пожарной опасности	$R_{\text{п.о}}$	$R_{\text{г.о}}$	$R_{\text{пр.г}}$	$R_{\text{г.соц.п}}$	$R_{\text{ср.о}}$
1	Производственный объект	Ф5.1	0,0135	0,00027	0,000019	0,0000046	0,0034443
					0,0000092	0,0000013	
					0,0000046	0,00000048	
					0,0000042	0,0000043	
					0,0000023		
					0,00000096		
					0,00000048		
					0,00000027		
Минимальное значение $R_{\text{ср.о}}$:							0,00014066
Максимальное значение $R_{\text{ср.о}}$:							0,02527716

В данной таблице представлены минимальные и максимальные значения средних вероятностей, эти данные могут быть использованы для принятия профилактических адресных мероприятий со стороны заинтересованных лиц и служб (вплоть до координации государственной политики) по предупреждению пожаров и гибели людей на них.

Далее перейдем к определению ожидаемых рисков в зависимости от форм оценок и условий соответствия объектов противопожарной безопасности. Обеспечение пожарной безопасности на объектах разных классов функциональной пожарной опасности [15] реализуется различными, в том числе дополнительно предлагаемыми формами и условиями, представленными на рис. 7.

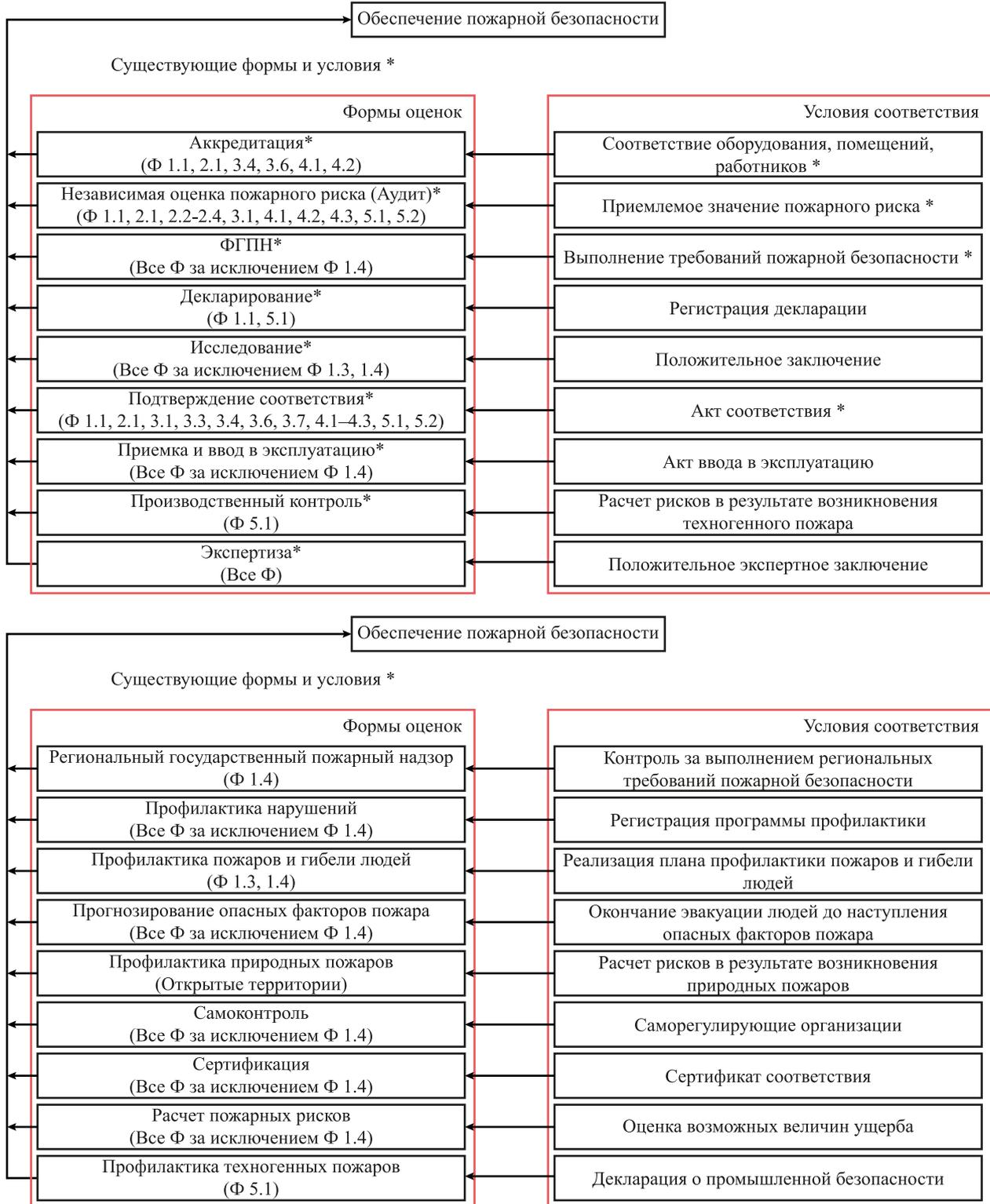


Рис. 7. Формы оценок и условия соответствия по обеспечению пожаробезопасности объектов с учетом функционального назначения объектов

Ожидаемые риски для объектов по функциональному назначению ($R_{ср.ф}$) определяются по формуле

$$R_{ср.ф} = \sum_N \frac{R_{ср.о}}{N} = \frac{\sum_N \frac{R_{п} + R_{го} + \sum_N R_{пр.г}}{N} + \sum_N \frac{R_{г.соц.п}}{N}}{4N} = \frac{\sum_N \frac{N_{п}}{N_{о}} + \frac{N_{г}}{N_{о}} + \sum_N \frac{N_{пр.г}}{N_{нас.РФ}}}{4N} + \sum_N \frac{N_{соц.п}}{N_{нас.РФ}}}{4N}. \quad (8)$$

Расчетные значения сведены в таблице 13.

Таблица 13

Величины вероятностей ожидаемых рисков при реализации предлагаемого методологического принципа оценки и обеспечения пожаробезопасности людей

Порядковый номер формы оценки	Наименование формы оценки	Класс функциональной пожарной опасности объекта			$R_{ср.о.}$ соответствующего класса функциональной пожарной опасности			$R_{ср.ф.}$
		Ф1.1	Ф2.1	Ф3.4	0,0023	0,0019	0,00104071	
1	Аккредитация	Ф3.6	Ф4.1	Ф4.2	0,0019	0,0023	0,0023	0,001956785
		Ф1.1	Ф1.2	Ф1.3	0,0023	0,00509277	0,02527716	
2	Федеральный государственный пожарный надзор	Ф2.1	Ф2.2	Ф2.3	0,0019	0,0019	0,0019	0,001974004
		Ф2.4	Ф3.1	Ф3.2	0,0019	0,00126179	0,00404658	
		Ф3.3	Ф3.4	Ф3.5	0,00404658	0,00104071	0,00303928	
		Ф3.6	Ф3.7	Ф4.1	0,0019	0,0019	0,0023	
		Ф4.2	Ф4.3	Ф5.1	0,0023	0,00139993	0,0034443	
		Ф5.2	Ф5.3		0,00187666	0,00332425		
Минимальное значение $R_{ср.ф.}$:							0,00014066	
Максимальное значение $R_{ср.ф.}$:							0,5	

В таблице даны минимальное и максимальное значения вероятности возникновения негативных событий. Вышеизложенный методологический принцип оценки обеспечения противопожарной безопасности представлен в виде алгоритма на рис. 8.



Рис. 8. Проект методологического принципа оценки и обеспечения пожаробезопасности людей

Предлагаемый методологический принцип оценки обеспечения безопасности людей на пожарах совершенствует таким образом действующий порядок, установленный законодательством Российской Федерации. Этот принцип основан на реально существующих значениях риска возникновения неблагоприятных событий, что позволяет заинтересованным лицам заблаговременно принимать необходимые профилактические меры.

Обсуждение и заключение. Актуализация существующих принципов оценки обеспечения безопасности объектов, их работников и населения, основанных на нормативных документах, а также предлагаемых на основе управления рисками возникновения негативных ситуаций дает возможность заинтересованным физическим и юридическим лицам применять наиболее подходящие для их реализации формы и условия. Представленные в исследовании математические расчёты позволяют обосновать пользу предлагаемых мероприятий. Применение принципа прогнозируемых рисков обосновывает невозможность обеспечения безусловной безопасности для предприятия и его работников, так как существует значительное количество мало предсказуемых негативных ситуаций природного и техногенного характера.

Практическая значимость проведённых исследований заключается в том, что предлагаемый авторами методологический принцип основан на математических расчётах. С учётом прогнозируемых рисков возможна выработка профилактических мероприятий по предупреждению и минимизации негативных условий, связанных с чрезвычайными ситуациями, авариями, производственным травматизмом и пожарами.

Итоги проведенной работы особенно актуальны для владельцев предприятий и других объектов инфраструктуры, так как их первостепенной задачей является обеспечение безопасности работников и населения. Собственник сможет выбрать подходящую для него форму оценки не только в зависимости от функционального класса пожарной опасности объекта, но и с учетом наличия минимальных рисков гибели людей при выполнении условий её применения. Это позволит перераспределить финансовые ресурсы организации, направив их на выполнение адресных требований пожарной безопасности, зависящих от выбранной для неё наиболее эффективной формы оценки соответствия.

Список литературы / References

1. Слесарчук А.В. Трансформация Федерального закона № 184-ФЗ «О техническом регулировании». *Известия ТулГУ*. 2024;4:26–27.

Slesarchuk AV. Transformation of Federal Law No. 184-FZ "On Technical Regulation". *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2024;4:26–27. (In Russ.)

2. Мальшев В.П., Азанов С.Н., Виноградов О.В. Возможные направления консолидации нормативной правовой базы в области гражданской обороны и защиты населения от чрезвычайных ситуаций. *Технологии гражданской безопасности*. 2023;20(1):33–38.

Malyshev VP, Azanov SN, Vinogradov OV. Possible Directions of the Regulatory Legal Framework Consolidation in the Field of Civil Defense and Protection of the Population from Emergency Situations. *Civil Security Technology*. 2023;20(1):33–38. (In Russ.)

3. Ferreira C, Costa Pinto L, Valente M. Forest Fire Causes and Prevention Strategies in Portugal: Insights from Stakeholder Focus Groups. *Forest Policy and Economics*. 2024;169:103330. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2024.103330>

4. Pivello VR, Vieira I, Christianini AV, Ribeiro DB, Menezes LdS, Berlinck CN, et al. Understanding Brazil's Catastrophic Fires: Causes, Consequences and Policy Needed to Prevent Future Tragedies. *Perspectives in Ecology and Conservation*. 2021;19(3):233–255. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2021.06.005>

5. Feng Li, Baoyan Duan, Yiping Sun, Xiaoxuan He, Zeyu Li, Bo Wang. Quantitative Risk Assessment Model of Working Positions for Roof Accidents in Coal Mine. *Safety Science*. 2024;178:106628. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106628>

6. de Wit RAC, Helsloot I, Koetse MJ. The Value of a Statistical Life in Reducing Fire Risk: A Choice Experiment among Dutch Citizens. *Safety Science*. 2024;169:106322. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106322>

7. Bahar Jahanvand, Seyed Bagher Mortazavi, Hassan Asilian Mahabadi, Omran Ahmadi. Determining Essential Criteria for Selection of Risk Assessment Techniques in Occupational Health and Safety: A Hybrid Framework of Fuzzy Delphi Method. *Safety Science*. 2023;167:106253. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106253>

8. Mrozowska A. Formal Risk Assessment of the Risk of Major Accidents Affecting the Natural Environment and Human Life, Occurring as a Result of Offshore Drilling and Production Operations Based on the Provisions of Directive 2013/30/EU. *Safety Science*. 2021;134:105007. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.105007>

9. Тимофеева А.В. Законы в области пожарной безопасности. *Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей StudNet*. 2020;12:918–921.

Timofeeva AV. Fire Safety Laws. *Scientific and educational journal for students and teachers StudNet*. 2020;12:918–921. (In Russ.)

10. Фомин А.И., Бесперстов Д.А., Угарова И.М., Ворошилов Я.С. Разработка форм оценок, а также условий соответствия пожаробезопасности объектов и актуализация существующих. *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2023;2:63–71.

Fomin AI, Besperstov DA, Ugarova IM, Voroshilov YaS. Development of Assessment Forms, as well as Conditions for Compliance with Fire Safety of Facilities and Updating Existing Ones. *Vestnik of Safety in Coal Mining Scientific Center*. 2023;2:63–71. (In Russ.)

11. Фомин А.И., Бесперстов Д.А., Угарова И.М., Казанцев В.Г., Зыков В.С. Методологические принципы оценки и обеспечения пожаробезопасности людей. *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2023;3:48–54.

Fomin AI, Besperstov DA, Ugarova IM, Kazantsev VG, Zykov VS. Methodological Principles for Assessing and Ensuring Human Fire Safety. *Vestnik of Safety in Coal Mining Scientific Center*. 2023;3:48–54. (In Russ.)

12. Фомин А.И., Неверов Е.Н., Бесперстов Д.А., Ли К.Х., Угарова И.М. Разработка методологического принципа обеспечения пожаробезопасности. *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2023;4:27–34.

Fomin AI, Neverov EN, Besperstov DA, Li KKh, Ugarova IM. Development of the Methodological Principle of Ensuring Fire Safety of People. *Vestnik of Safety in Coal Mining Scientific Center*. 2023;4:27–34. (In Russ.)

13. Zeinab Masalegooyan, Farzad Piadeh, Kouros Behzadian. A Comprehensive Framework for risk probability assessment of landfill fire incidents using Fuzzy Fault Tree Analysis. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021;163:679–693 <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.05.064>

14. Zhanli Mao, Haonan Chen, Xin Chen, Liwei Zhang. Improved Reliability Analysis and Assessment Method of Occupant Evacuation and Its Application in Building Fires. *Safety Science*. 2025;181:106689. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106689>

15. Гармышев Я.В., Гармышев В.В., Прошев Д.И. Правовые основы пожарной безопасности. *Образование и право*. 2024;3:674–677.

Garmyshev YaV, Garmyshev VV, Proshev DI. Legal Basis of Fire Safety. *Education and Law*. 2024;3:674–677. (In Russ.)

Об авторах:

Анатолий Иосифович Фомин, доктор технических наук, профессор кафедры аэрологии, охраны труда и природы Кузбасского политехнического университета, ведущий научный сотрудник АО «НЦ ВостНИИ» (650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), [SPIN-код](#), [ScopusID](#), fomin-ai@kuzbasscot.ru

Анатолий Александрович Трубицын, доктор технических наук, профессор кафедры аэрологии, охраны труда и природы Кузбасского политехнического университета (650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), [SPIN-код](#), [ScopusID](#), atrubitsyn@rambler.ru

Нэля Вадимовна Трубицына, доктор технических наук, доцент кафедры аэрологии, охраны труда и природы Кузбасского политехнического университета (650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), [SPIN-код](#), [ScopusID](#), ntrubitsyna@rambler.ru

Дмитрий Александрович Бесперстов, кандидат технических наук, доцент кафедры техносферной безопасности Кемеровского государственного университета (650056, Российская Федерация, г. Кемерово, Бульвар Строителей, 47), [SPIN-код](#), gpnbesperstov@yandex.ru

Екатерина Андреевна Попова, доцент кафедры техносферной безопасности Кемеровского государственного университета (650056, Российская Федерация, г. Кемерово, Бульвар Строителей, 47), [SPIN-код](#), popovakatalpa@gmail.com

Валерия Андреевна Петрова, студент кафедры техносферной безопасности Кемеровского государственного университета (650056, Российская Федерация, г. Кемерово, Бульвар Строителей, 47), [ORCID](#), valera_petrova@inbox.ru

Заявленный вклад авторов:

А.И. Фомин: контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования.

А.А. Трубицын: создание и подготовка рукописи, визуализация результатов исследования и полученных данных.

Н.В. Трубицына: применение статистических, математических, вычислительных методов для анализа или синтеза данных исследования.

Д.А. Бесперстов: осуществление научно-исследовательского процесса, включая сбор данных.

Е.А. Попова: разработка методологии исследования.

В.А. Петрова: создание и подготовка рукописи, написание черновика, включая его перевод на иностранный язык.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Anatoly I. Fomin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Aerology, Occupational Safety and Nature, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Senior Researcher at Vostochniy Research Institute for Mining Safety (28, Vesenniyaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ScopusID](#), fomin-ai@kuzbasscot.ru

Anatoly A. Trubitsyn, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Aerology, Occupational Safety and Nature, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (28, Vesenniyaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ScopusID](#), atrubitsyn@rambler.ru

Nelya V. Trubitsyna, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Aerology, Occupational Safety and Nature, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (28, Vesenniyaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ScopusID](#), ntrubitsyna@rambler.ru

Dmitrii A. Besperstov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technosphere Safety, Kemerovo State University (47, Stroiteley Ave., Kemerovo, 650056, Russian Federation), [SPIN-code](#), gpnbesperstov@yandex.ru

Ekaterina A. Popova, Associate Professor of the Department of Technosphere Safety, Kemerovo State University (47, Stroiteley Ave., Kemerovo, 650056, Russian Federation), [SPIN-code](#), popovakatalpa@gmail.com

Valeriya A. Petrova, Student of the Department of Technosphere Safety, Kemerovo State University (47, Stroiteley Ave., Kemerovo, 650056, Russian Federation), [ORCID](#), valera_petrova@inbox.ru

Claimed Contributorship:

AI Fomin: supervision, leadership and mentoring in the process of planning and conducting research.

AA Trubitsyn: creation and preparation of the manuscript, visualization of the research results and data obtained.

NE Trubitsyna: the use of statistical, mathematical, and computational methods for analyzing or synthesizing the research data.

DA Besperstov: implementation of the research process, including data collection.

EA Popova: development of the research methodology.

VA Petrova: creation and preparation of the manuscript, writing a draft, including its translation into a foreign language.

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

All the authors have read and approved the final manuscript.

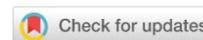
Поступила в редакцию / Received 07.03.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 26.03.2025

Принята к публикации / Accepted 02.04.2025

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 504.3.054

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-136-145>

Применение зеленых крыш в точечном строительстве для повышения экологической безопасности городских территорий

С.Е. Манжилевская  , А.И. Евтушенко , Д.Р. Маилян 

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

✉ smanzhilevskaya@yandex.ru

EDN: RETKXY

Аннотация

Введение. При проектировании строительных работ в условиях городской застройки важнейшим аспектом является защита окружающей среды от пылевого загрязнения. Особую сложность представляет организация работ в густонаселенных районах, где строительная площадка бывает зажата существующими зданиями и инфраструктурой. Успешная реализация подобных проектов требует тщательного анализа множества факторов: погодных условий, экологических рисков и ограниченного пространства для маневра. Принципиальное значение имеет разработка комплекса мер по контролю пылевых выбросов, возникающих в ходе строительных операций. Поэтому технологические инновации в области экологичных кровельных систем становятся ключевым элементом современного градостроительства. Как показывают научные изыскания последних лет, экологичные конструкции способствуют рациональному использованию городского пространства и заметно улучшают состояние окружающей среды, но при этом в результатах таких исследований отсутствуют данные, которые бы подтверждали, что конструкции зеленой кровли и растительный покров на них эффективны для снижения пылевого загрязнения в условиях точечной застройки, где источники пылевого загрязнения — строительные площадки — соседствуют с уже заселенными объектами и стесненность пространства не дает возможности полностью оградить жителей городов от пылевого воздействия. Цель данной работы — дать оценку эффективности использования зеленых крыш для борьбы с распространением пыли в районах активного точечного строительства, а также разработать собственные конструкции зеленой кровли. Внедрение зеленых крыш в точечное строительство не только преобразует архитектурный облик городских кварталов, но и существенно улучшает качество городской среды. Применение подобных экологичных решений способствует общей модернизации строительной отрасли, делает её более безопасной для окружающей среды и комфортной для жителей.

Материалы и методы. В рамках масштабного строительства жилого комплекса «Красный Аксай» в Ростове-на-Дону был проведен экологический эксперимент. В зоне ведения строительных работ и за пределами ограждающих конструкций строительной площадки в марте 2020 года сотрудники подрядной организации высадили травянистые растения шести разновидностей, типичные для Ростовской области. Каждый вид растений занимал площадь в шесть квадратных метров, формируя общую экспериментальную зону в 36 квадратных метров. Методология определения объема пылевых отложений, улавливаемых растениями, включала в себя отбор при помощи кисти проб пылевых частиц с поверхности листьев растений, который производился два раза в неделю с мая по октябрь 2020 года, в период активного строительства многоэтажного дома точечной застройки. Отбор проб воздуха для определения концентрации в нем пыли производился с использованием электрического аспиратора ПУ-3Е/12 и фильтров из перхлорвиниловых волокон АФА-ВП10.

Результаты исследования. Исследования показали, что в условиях преобладающего восточного ветра (3–5 м/с) и влажности в 40 % в период производства строительных работ высаженная растительность значительно влияла на качество воздуха. Над озелененной зоной наблюдалось снижение концентрации пылевых частиц РМ10 на 10 %, на расстоянии 10 метров от растительного покрова, по сравнению с прилегающей строительной зоной, — на 15 %. Замеры количества пылевого осадка в вегетационный период (май–октябрь) выявили существенную динамику: если в начале сезона (май–июнь) количество пылевых отложений на растениях составляло максимум 0,42 мг/см², то в разгар теплого сезона (июль–октябрь) оно достигало 1,81 мг/см². Финансовые расчеты показали, что при долгосрочной эксплуатации (до 40 лет) традиционные и озелененные крыши имеют одинаковую стоимость. Для достижения поставленной цели исследования авторами были разработаны и применены на практике два типа конструктивных решений зеленой кровли для общественных и жилых зданий.

Обсуждение и заключение. Конструкции зеленой кровли могут служить эффективной преградой для распространения пыли в воздушной среде, что особенно актуально для районов, расположенных вблизи точечных застроек, где отмечается значительная концентрация взвешенных веществ в воздухе. Для снижения концентрации взвешенных веществ в жилой зоне рядом с точечной застройкой монтаж конструкций зеленой кровли необходимо осуществлять на террасах, крышах, стилобатной части зданий, где окна и входные группы расположены рядом со строительной площадкой. В целях сдерживания распространения взвешенных частиц монтаж зеленой кровли должен быть осуществлен на малоэтажных зданиях, например, детских садах, школах, торговых павильонах — в зависимости от общей концепции градостроительного плана застройки района или конкретной территории.

Ключевые слова: зеленые крыши, распространение пыли, экологическая безопасность городских территорий, мелкодисперсная пыль, пылевое загрязнение

Для цитирования: Манжильевская С.Е., Евтушенко А.И., Маилян Д.Р. Применение зеленых крыш в точечном строительстве для повышения экологической безопасности городских территорий. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2025;9(2):136–145. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-136-145>

Original Empirical Research

Green Roofs in Infill Development to Improve the Environmental Safety of Urban Areas

Svetlana E. Manzhilevskaya  , Aleksandr I. Evtushenko , Dmitrii R. Mailyan 

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

 smanzhilevskaya@yandex.ru

Abstract

Introduction. When designing construction projects in urban areas, it is essential to protect the environment from dust pollution. This is particularly challenging in densely populated areas where the construction site is often surrounded by existing buildings and infrastructure. Successful implementation of such projects requires a thorough analysis of many factors, including weather conditions, environmental risks, and limited space for maneuvering. A crucial aspect of this process is the development of measures to control dust emissions during construction. Therefore, technological innovations in the field of eco-friendly roofing systems are becoming a key element of modern urban planning. As scientific research in recent years has shown, eco-friendly structures contribute to the rational use of urban space and significantly improve the environment. However, the results of these studies lack data on the effectiveness of green roof structures and vegetation on them in reducing dust pollution in residential areas. They are adjacent to already populated objects and the lack of space makes it impossible to completely protect urban residents from dust exposure. The aim of this work is to evaluate the effectiveness of green roofs to control the spread of dust in areas with active infill development and to develop our own green roof designs. The introduction of green roofs into residential construction not only improves the architectural appearance of neighborhoods, but also enhances the quality of the urban environment. The use of eco-friendly solutions in construction contributes to the modernization of the industry, making it safer for the environment and more comfortable for residents.

Materials and Methods. An environmental experiment was conducted as part of the large-scale construction of the Krasny Aksai residential complex in Rostov-on-Don. In March 2020, in the construction area and outside the site, employees of the contractor planted herbaceous plants of six species typical of the Rostov region. Each plant species occupied an area of six square meters, creating a total experimental area of 36 square meters. The methodology for determining the volume of dust deposits trapped by plants included sampling dust particles from the surface of plant leaves with a brush, which was performed twice a week from May to October 2020, during the active construction of a multi-storey residential building. Air samples were taken to measure dust concentrations using an electric aspirator PU-3E/12 and filters made from perchlorvinyl fiber AFA-VP10.

Results. The research showed that during the construction period with an easterly wind of 3–5 meters per second and humidity of 40%, the planted vegetation had a significant impact on air quality. There was a decrease in the concentration of PM10 dust particles above the green area by 10%, and at a distance of 10 meters from the vegetation cover, compared to the adjacent construction area, by 15%. Measurements of dust deposits over the growing season (May–October) revealed a significant dynamics: if at the beginning of the season (May–June) the amount of dust deposits on plants was a maximum of 0.42 mg/cm², then in the midst of the warm season (July–October) it reached 1.81 mg/cm². Financial calculations showed that traditional and green roofs were equally cost-effective over the long term (up to 40 years). To achieve this research goal, the authors have developed and implemented two types of constructive solutions for green roofs for public and residential buildings.

Discussion and Conclusion. Green roof structures can act as an effective barrier against the spread of dust in the air, especially in areas near infill development where there is a high concentration of suspended solids. To reduce this concentration in residential areas near infill development, it is recommended to install green roofs on terraces, rooftops, and substructures of buildings with windows and entrances located near the construction site. In order to curb the spread of suspended particles, it is also suggested that green roof installation be considered for low-rise buildings such as kindergartens, schools, and shopping malls. The decision on where to install these structures should depend on the overall urban development plan for the area or specific territory.

Keywords: green roofs, dust distribution, environmental safety of urban areas, fine dust, dust pollution

For citation. Manzhilevskaya SE, Evtushenko AI, Mailyan DR. Green Roofs in Infill Development to Improve the Environmental Safety of Urban Areas. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(2):136–145. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-136-145>

Введение. Современные города активно интегрируют новые экологические решения в свою структуру, и зеленые кровли уже стали традиционным элементом урбанистического планирования [1]. Как показали недавние исследования, такие конструкции существенно способствуют рациональному использованию городского пространства и заметно улучшают состояние окружающей среды [2, 3]. Эффективность растительных покрытий в нейтрализации загрязняющих веществ, включая PM0.5–PM10, подтверждена многочисленными изысканиями [4, 5]. Сегодня озелененные крыши признаны не инновацией, а необходимым компонентом стратегий по оздоровлению городских экосистем. Их вклад в повышение качества жизни горожан и восстановление природного баланса в урбанизированных зонах получает все большее признание у специалистов и общественности [6].

Исследования доказали, что объекты точечной застройки существенно ухудшают качество воздуха в городах, выделяя вредные частицы PM0.5–PM10, которые негативно влияют на здоровье жителей [7]. Поэтому архитекторам и застройщикам следует рассматривать зеленые кровли как стандартный элемент строительных проектов [8]. Внедрение таких экологических решений в повседневную практику становится ключевым фактором для обеспечения экологической устойчивости и безопасности современного градостроительства [9].

Ограниченность в тесных городских пространствах природных ресурсов требует их рационального использования и функционального расширения, это особенно важно при точечной застройке и реконструкции устаревших зданий [10]. Стратегией восполнения таких истощающихся ресурсов становится внедрение экологических и экономически рентабельных архитектурных концепций, включая озелененные крыши [11]. Эти решения минимизируют пылевое загрязнение в жилых кварталах, благотворно влияют на качество жизни городских жителей, способствуют более эффективному природопользованию [12].

В городской среде, где пространство ограничено, превращение стандартных кровельных конструкций в экологические оазисы представляется идеальным решением для возвращения природного покрова. Это особенно актуально при отсутствии альтернативных вариантов землепользования. Зеленая кровля представляет собой комплексную структуру с множеством уровней, размещаемую на верхних частях строений [13]. Она включает в себя основание и разнообразные промежуточные элементы — от гидроизоляционных барьеров до растительного покрова. Все эти слои функционируют как единый механизм, обеспечивающий жизнедеятельность флоры на крыше и эффективно восполняющий утраченные в процессе строительства зеленые территории. Реализация таких проектов требует детального проектирования и анализа весовых характеристик для гарантии надежности и устойчивости этих инновационных систем.

Исследовательский фокус в сфере зеленых кровельных систем направлен преимущественно на их способность очищать воздух от загрязняющих веществ — SO₂, O₃, NO₂ и PM10 [14, 15]. Растительность на крышах зданий, подобно другим элементам городского озеленения, демонстрирует значительный потенциал в борьбе с атмосферным загрязнением, сокращая вредные выбросы на 35–100 %, о чем свидетельствуют проведенные исследования. Эти экологические преимущества привлекают всё больше внимания к зеленым кровлям по всему миру.

Цель данной работы — оценка эффективности зеленых крыш в борьбе с распространением пыли в атмосфере городской среды, что особенно актуально для районов активного точечного строительства. Для реализации поставленной цели были решены задачи по определению состава растительного слоя, который эффективно справляется с пылеулавливанием, и разработаны конструкции систем озелененных крыш, эффективные для монтажа в зоне точечной застройки. Подобные экологические решения способствуют общей модернизации строительной отрасли, делают её более безопасной для окружающей среды и комфортной для жителей.

Материалы и методы. Выбор оптимального местоположения играет ключевую роль в максимизации пользы конструкций зеленой крыши в борьбе с загрязнителями PM2.5 и PM10, учитывая сложности с их установкой. Для российских городов существуют специфические параметры определения приоритетных зон монтажа этих экологических конструкций. Среди важнейших факторов выделяется принадлежность участка к определенной климатической зоне согласно схеме районирования (рис. 1) [16]. Именно правильное расположение зеленых крыш определяет их результативность в снижении концентрации вредных частиц в атмосфере.

Современные урбанистические тенденции требуют системного подхода к созданию экологических пространств в городской среде. Решение этой задачи возможно путем разработки доступных, экономически эффективных и технологически несложных решений. Критерии для имплементации включают в себя локацию в урбанистических центрах с численностью населения более 250 тысяч человек, а также обязательное условие, чтобы зеленые зоны составляли минимум 40 % от общей территории квартальной застройки [17].



Рис. 1. Карта территориального разграничения России для оптимального использования зеленых крыш в различных климатических условиях

В ходе строительства жилого комплекса «Красный Аксай» в Ростове-на-Дону в зоне проведения строительных работ и за пределами ограждающих конструкций строительной площадки в марте 2020 года были высажены травянистые растения шести разновидностей, типичные для Ростовской области (рис. 2). С мая по сентябрь при возведении монолитного каркаса здания и каменно-монтажных работ два раза в неделю в течение 120 минут бралось по 10 проб воздуха в трех контрольных точках по стандартной методике РД 52.04.893–2020¹ — на границе строительной площадки по ул. Береговой, 117 б, стр. 5 (точка А на рис. 2), над зоной вегетации растений (точка Б на рис. 2) и на расстоянии 10 метров от зеленой зоны, в жилой зоне ЖК «Красный Аксай» (точка В на рис. 2). За весь период наблюдений атмосферные показатели колебались: воздух прогревался от +14 до +25 °С, ветер достигал 3–5 метров в секунду, а относительная влажность составляла от 30 до 60 %.



Рис. 2. Строительная площадка точечной застройки:
1, 2 — места высадки растений; А, Б, В — контрольные точки измерения концентрации PM₁₀

Каждый вид растений, высаженных в районе строительной площадки точечной застройки, занимал площадь в шесть квадратных метров, формируя общую экспериментальную зону в 36 квадратных метров. Все выбранные растения обладали высокой способностью к поглощению пыли, что было ключевым критерием при их подборе для данного исследования (рис. 3) [18, 19].

¹ РД 52.04.893–2020. Массовая концентрация взвешенных веществ в пробах атмосферного воздуха. Методика измерений гравиметрическим методом. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293720/4293720281.pdf> (дата обращения: 10.03.2025).

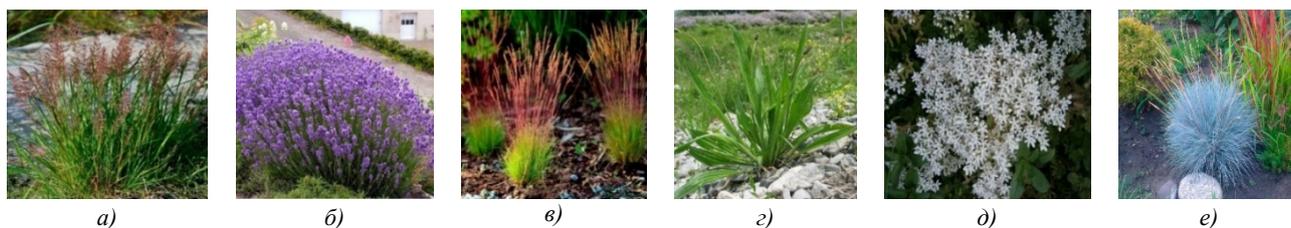


Рис. 3. Травянистые растения, характеризующиеся высокой эффективностью пеллеоседания: *a* — полевица побегоносная (*Agrostis stolonifera*); *б* — лаванда узколистная (*Lavandula angustifolia*); *в* — овсяница красная (*Festuca rubra*); *г* — подорожник ланцетный (*Plantago lanceolata*); *д* — очиток белый (*Sedum album*); *е* — овсяница сизая Фестина (*Festuca festina*)

Методология определения объема пылевых отложений, оседающих на растениях, предполагала проведение 50 замеров два раза в неделю в первой половине дня. Пылевые частицы собирались с поверхности листьев растений при помощи кисти. Процесс происходил в период активных работ по возведению многоэтажного дома точечной застройки, то есть с мая по сентябрь 2020 года. Собранный материал аккуратно перемещался в предварительно взвешенную чашку для дальнейшего испарения влаги и взвешивания. После отбора образцов с каждого вида растений проводилась их лабораторная обработка: жидкость подвергалась испарению, затем следовало высушивание осадка до стабилизации массы. Зафиксированные показатели позволяли рассчитать удельную концентрацию пыли — количество миллиграммов собранной пыли на квадратный сантиметр поверхности листьев растений. Результаты эффективности оседания частиц на листьях исследуемых растений представлены на рис. 4.

Отбор проб воздуха для определения концентрации в нем пыли производился с помощью электрического аспиратора ПУ-3Е/12, прошедшего поверку, и фильтрами из перхлорвиниловых волокон АФА-ВП10. Предварительные испытания данного измерительного оборудования в аэродинамической трубе показали, что погрешность измерений при разовом опыте не превышает 12 %, что соответствует требованиям РД 52.04.893–2020.

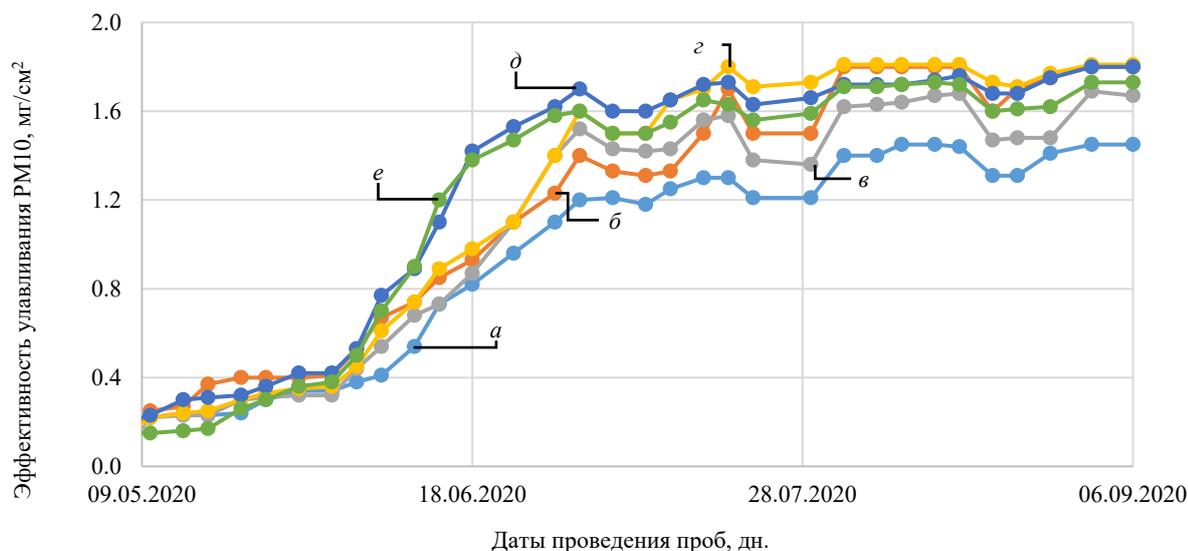


Рис. 4. Плотность пылеоседания PM10 на растениях в зоне точечной застройки: *a* — полевица побегоносная (*Agrostis stolonifera*); *б* — лаванда узколистная (*Lavandula angustifolia*); *в* — овсяница красная (*Festuca rubra*); *г* — подорожник ланцетный (*Plantago lanceolata*); *д* — очиток белый (*Sedum album*); *е* — овсяница сизая Фестина (*Festuca festina*)

Результаты исследования. Анализ замеров показал, что в условиях преобладающего восточного ветра (3–5 м/с) и влажности воздуха 30–60 % в период производства работ высаженная растительность значительно влияла на качество воздуха. Над озелененной зоной наблюдалось снижение концентрации пылевых частиц PM10 от строительных работ в среднем от 10 (влажность — 30–35 %) до 20 % (влажность — 35–60 %), а на расстоянии 10 метров от растительного покрова, по сравнению с прилегающей строительной зоной, в среднем от 15 (влажность — 30–35 %) до 30 % (влажность — 35–60 %).

Замеры количества пылевого осадка в вегетационный период (май–сентябрь) выявили следующую динамику: если в начале сезона (май–июнь) количество пылевого осадка на растениях составляло максимум 0,42 мг/см², то в разгар теплого сезона (июль–сентябрь) оно достигало 1,81 мг/см². Динамика изменения количества пылевого осадка на растениях объясняется тем, что в период проведения замеров в начале вегетационного периода происходил рост растений, затем площадь растительного покрова увеличивалась, но при этом пылевой осадок, образующийся на листьях, мог быть снесен в воздух ветром со скоростью 3,5 м/с и выше. В период

с июля по сентябрь площадь поверхности растительного покрова уже была максимальной. На процесс активного пылеоседания влияло и то, что в первой половине дня на растениях образовывалась роса, а объем зеленой массы растений, позволяющей накапливать пылевые отложения на листьях, не давал внешним источникам воздействия (ветер, осадки) смести пылевой осадок на землю или в воздух. На рис. 5 представлена динамика изменения концентрации PM10 в период исследования в трех контрольных точках проведения замеров (строительная площадка, зона вегетации, жилая зона).

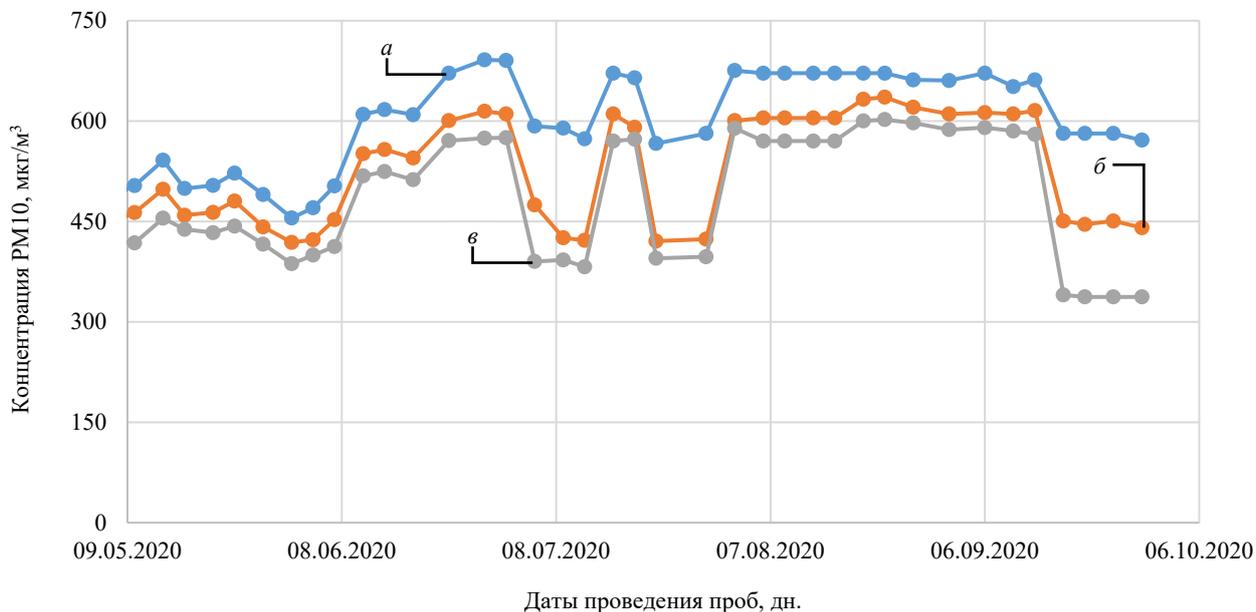
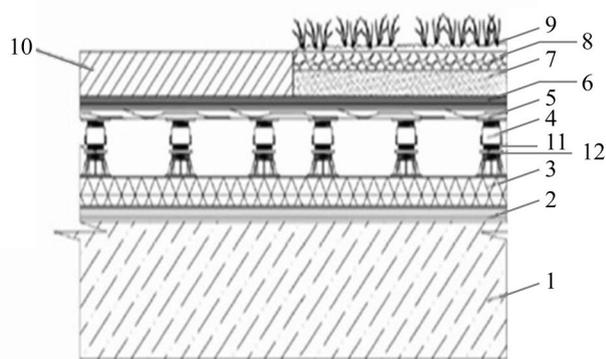


Рис. 5. Динамика изменения концентрации PM10 в период ведения строительных работ:
a — точка А, строительная площадка; *б* — точка Б, зона вегетации растений; *в* — точка В, жилая зона

Для достижения цели исследования авторы разработали инновационные, ресурсосберегающие и практичные конструкции зеленой кровли, которые можно и внедрять на этапе проектирования объекта точечной застройки, и без затруднений применять как инструмент снижения негативного воздействия пылевых выбросов от строительных работ при возведении новых архитектурных объектов или модернизации существующих строений различного функционального назначения.

Первая мобильная конструкция зеленой кровли разработана с возможностью ее демонтажа на зимний период, на данный вид кровли зарегистрирован патент № 191863U1 [20]. Структурные элементы такой кровли представляют собой комбинацию железобетонной плиты, долговечного антигнилостного кровельного войлока, регулируемых опор Forest Style из высокопрочного пропилен (с возможностью наращивания за счет дополнительной насадки 60 мм), а также двухслойного асфальтобетонного покрытия Ondulin. Конструктивная схема зеленой кровли и реализация данной конструкции на объекте после реконструкции в г. Ростове-на-Дону представлены на рис. 6.



Устройство зелёной кровли, предназначенной для монтажа на общественных зданиях:

- 1 — железобетонная плита перекрытия;
- 2 — настилающий слой еврорубероида;
- 3 — слой термоизоляции;
- 4 — регулируемые опоры;
- 5 — настилающий слой ондулина;
- 6 — слой гидроизоляции;
- 7 — дренажный слой;
- 8 — грунт;
- 9 — зелёные насаждения;
- 10 — террасная доска;
- 11 — оцинкованные шпильки;
- 12 — контргайка

a)

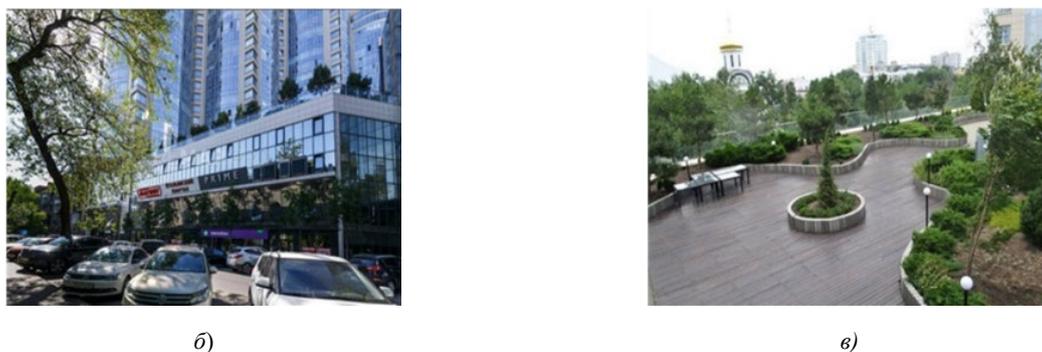
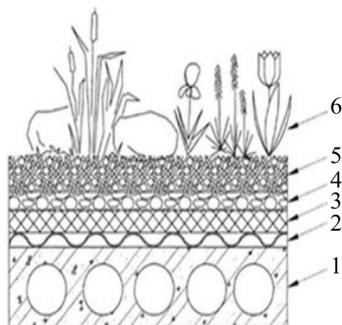


Рис. 6. Конструктивные решения зеленой кровли для общественных зданий: *а* — конструктивная схема; *б* — объект для внедрения конструкции зеленой кровли — бизнес-центр «Лига Наций» (г. Ростов-на-Дону, ул. Суворова, 91; *в* — реализованные конструктивные решения зеленой кровли

Для жилых зданий, зимних садов и террас предназначена второй тип конструкций. Эта система отличается несложным устройством, экономичностью и высокими показателями теплоизоляции и влагозащиты, на полезную модель зарегистрирован патент № 163334U1 [21]. Растительный слой высаживается в завершающей фазе работ. Его располагают по периметру зеленых участков конструкции. Процесс установки такой крыши предполагает использование двух разновидностей покрытия: первая — для боковой секции, обеспечивающей всезонное использование зеленой крыши, вторая — для центральной части, где может размещаться, например, бассейн или кафе.

На рис. 7 представлена разработанная конструкция второго типа зеленой кровли, которая состоит из железобетонной плиты перекрытия, фильтрующего и растительного слоев. Ондулин применяется в качестве защитного элемента. Конструкция дополнительно оснащена слоем анкеров в грунте. Также представлено внедрение данного конструктивного решения на объекте городской застройки.



Конструкция зелёной кровли, предназначенная для жилых зданий:

- 1 — железобетонная плита;
- 2 — защитный слой — ондулин;
- 3 — теплоизолирующий слой из пенополистирола;
- 4 — фильтрующий слой из торфа и/или гравия;
- 5 — закрепляющая смесь грунта;
- 6 — растительный слой, содержащий субстрат с растениями

а)



б)



в)

Рис. 7. Конструктивные решения зеленой кровли для жилых зданий: *а* — конструктивная схема; *б* — объект для внедрения конструкции зеленой кровли в проектные решения (ЖК «Жемчужина Дона», г. Ростов-на-Дону, ул. Максима Горького, 240); *в* — реализованные конструктивные решения зеленой кровли

Себестоимость данных конструкций зеленой кровли начинается от 4 200 рублей за квадратный метр. Финансовые расчеты показывают, что при долгосрочной эксплуатации (до 40 лет) традиционные и озелененные крыши имеют примерно одинаковую стоимость. При этом инвестиции в монтаж систем зеленой кровли для бизнес-центра «Лига Наций» составила всего 1,3 % от общего бюджета реконструкции. В случае с многоквартирным высотным домом ЖК «Жемчужина Дона» доля расходов на разработку проектных решений, монтажа и озеленение крыши составила 4 % от совокупных затрат на строительство объекта.

Обсуждение и заключение. В результате проведенного авторами исследования доказано, что создание растительного покрова является достаточно эффективным барьером для распространения пылевого загрязнения от точечной застройки, эффективность пылеулавливания может достигать в среднем от 10 до 20 % в зависимости от уровня влажности воздушной среды. При этом важно правильно подобрать растения для грунта зеленой кровли и удачно ее расположить, чтобы получить максимальный эффект от пылеподавления, что значительно повысит экологическую безопасность жилой зоны в точечной застройке. Разработанные авторами два вида конструктивных решений зеленой кровли, применимые для работ по реконструкции зданий и возведению новых объектов, дают возможность в целом создать комплексную защиту городской территории от одного из наиболее вредных источников пылевых выбросов в городской среде — строительной площадки. Хотя внедрение таких технологий требует дополнительных финансовых вложений, они компенсируются снижением заболеваемости рабочих от вредного воздействия пыли примерно на 15 %. Это приводит к соответствующему уменьшению себестоимости строительных работ и экономии трудозатрат, одновременно обеспечивая более высокий уровень защиты как для работников на стройплощадке, так и для жителей близлежащих районов.

Список литературы / References

1. Versini P-A, Gires A, Tchiguirinskaia I, Schertzer D. Fractal Analysis of Green Roof Spatial Implementation in European Cities. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2020;49:114–122. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126629>
2. Sanaz Tabatabaee, Amir Mahdiyar, Saeed Reza Mohandes, Syuhaida Ismail. Towards the Development of a Comprehensive Lifecycle Risk Assessment Model for Green Roof Implementation. *Sustainable Cities and Society*. 2022;76:103404. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103404>
3. Guowu Tao, Jingchun Feng, Haibo Feng, Hui Feng, Ke Zhang. Reducing Construction Dust Pollution by Planning Construction Site Layout. *Buildings*. 2022;12(5):531. <https://doi.org/10.3390/buildings12050531>
4. Gang Zhou, Zengxin Liu, Wenqi Shao, Biao Sun, Lin Li, Jianguo Liu. Study on the Effects of Dust Particle Size and Respiratory Intensity on the Pattern of Respiratory Particle Deposition in Humans. *Indoor Air*. 2024;1:025616. <https://doi.org/10.1155/2024/5025616>
5. Louis Kumi, Jaewook Jeong, Jaemin Jeong, Jaehyun Lee. Empirical Analysis of Dust Health Impacts on Construction Workers Considering Work Types. *Buildings*. 2022;12(8):1137. <https://doi.org/10.3390/buildings12081137>
6. Gauri Mohan, Xavier AS. Impact of Dust Pollution from Construction Sites on On-Site Construction Workers. *Sustainability Agri Food and Environmental Research*. 2023;10:1–7. <https://doi.org/10.7770/safer-V10N1-art2465>
7. Манжилевская С.Е. Влияние мелкодисперсной пыли на окружающую среду при локальном строительстве. *Строительство и реконструкция*. 2020;6(92):86–99. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-92-6-86-98>
8. Манжилевская С.Е. Impact of Fine Dust on the Environment in Local Construction. *Building and Reconstruction*. 2020;6(92):86–99. (In Russ.) <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-92-6-86-98>
9. Манжилевская С.Е. Экологический мониторинг экологической безопасности в зонах строительства, реконструкции и функционирования объектов. *Строительные материалы и изделия*. 2019;2(3):78–84. <https://doi.org/10.34031/2618-7183-2019-2-3-78-84>
10. Manzhilevskaya SE. Environmental Monitoring of Ecological Safety in Areas of Construction, Reconstruction and Operation of Objects. *Construction Materials and Products*. 2019;2(3):78–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.34031/2618-7183-2019-2-3-78-84>
11. Азаров В.Н., Кузьмичев А.А., Николенко Д.А., Васильев А.Н., Козловцева Е.Ю. Исследование дисперсного состава пыли городской среды. *Вестник МГСУ*. 2020;15(3):432–442. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.3.432-442>
12. Azarov VN, Kuzmichev AA, Nikolenko DA, Vasilev AN, Kozlovtsseva EYu. The Research of Dust Dispersed Composition of Urban Environment. *Vestnik MGSU*. 2020;15(3):432–442. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.3.432-442>
13. Сумеркин Ю.А., Теличенко В.И. Оценка экологической безопасности придомовых территорий жилых районов. *Промышленное и гражданское строительство*. 2017;(6):75–79.
14. Sumerkin YuA, Telichenko VI. Assessment of Ecological Safety of Territories Adjoining Residential Areas. *Industrial And Civil Engineering*. 2017;(6):75–79. (In Russ.)
15. Mekhala Kaluarachchi, Anuradha Waidyasekara, Raufdeen Rameezdeen, Nicholas Chileshe. Mitigating Dust Pollution from Construction Activities: A Behavioural Control Perspective. *Sustainability*. 2021;13(16):9005. <https://doi.org/10.3390/su13169005>
16. Wei Liu, Xiaohui Huang, Huapeng Chen, Luyao Han. Analyzed and Simulated Prediction of Emission Characteristics of Construction Dust Particles under Multiple Pollution Sources. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2022;(1):7349001. <https://doi.org/10.1155/2022/7349001>
17. Temiloluwa Oluwapelumi Susan Owolabi, Oluwatoyin Olanrewaju Ajayi, Dominion Adahanyiukpe Olofu. Assessment of Air Pollution Levels from a Building Construction Site on Lagos Island. *ABUAD Journal of Engineering Research and Development*. 2024;7(2):229–235. <https://doi.org/10.53982/ajerd.2024.0702.22-j>

14. Samaradiwakara DS, Pitawala HMTGA. Extent of Air Pollution in Kandy Area, Sri Lanka: Morphological, Mineralogical and Chemical Characterization of Dust. *Ceylon Journal of Science*. 2021;50(4):475–486. <https://doi.org/10.4038/cjs.v50i4.7946>

15. Cui Tianxin. Development of Dust Monitoring in Urban Construction Sites and Suggestions on Dust Control. *Journal of Innovation and Development*. 2023;2(2):18–21. <https://doi.org/10.54097/jid.v2i2.5904>

16. Безбородов Е.Л., Сысоева Е.В. Исследование проблемы загрязнения атмосферы мелкодисперсными частицами PM_{2.5} и PM₁₀. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2024;1(94):186–202. https://doi.org/10.35211/18154360_2024_1_186

Bezborodov EL, Sysoeva EV. Investigation of the Problem of Atmospheric Pollution by Fine Particles PM_{2.5} and PM₁₀. *The Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series "Construction and Architecture"*. 2024;1(94):186–202. https://doi.org/10.35211/18154360_2024_1_186 (In Russ.)

17. Сысоева Е.В., Гельманова М.О., Слесарев М.Ю. Методика обоснования эффективности улавливания пыли «зелеными» крышами. *Вестник МГСУ*. 2022;17(9):1187–1205. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.9.1187-1205>

Sysoeva EV, Gelmanova MO, Slesarev MYu. Methodology for Substantiating the Effectiveness of Dust Capture by “Green” Roofs. *Vestnik MGSU*. 2022;17(9):1187–1205. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.9.1187-1205>

18. Ardon-Dryer K, Clifford KR, Hand JL. Dust under the Radar: Rethinking How to Evaluate the Impacts of Dust Events on Air Quality in the United States. *GeoHealth*. 2023;7(12):e2023GH000953. <https://doi.org/10.1029/2023GH000953>

19. Sang-woo Han, Hung-soo Joo, Kyoung-chan Kim, Jin-sik Cho, Kwang-joo Moon, Jin-seok Han. Modification of Hybrid Receptor Model for Atmospheric Fine Particles (PM_{2.5}) in 2020 Daejeon, Korea, Using an ACERWT Model. *Atmosphere*. 2024;15(4):477. <https://doi.org/10.3390/atmos15040477>

20. Петренко Л.К., Манжилевская С.Е., Тимошенко Е.В., Семерникова А.Д. *Конструкция зеленой кровли*. Патент РФ № 191863U1. 2019. 4 с. <https://patents.google.com/patent/RU191863U1/ru>

Petrenko LK, Manzhilevskaya SE, Timoshenko EV, Semernikova AD. *Green Roof Construction*. RF Patent No. 191863U1. 2019. 4 p. (In Russ.) <https://patents.google.com/patent/RU191863U1/ru>

21. Петренко Л.К., Манжилевская С.Е., Войт А.В. *Конструкция зеленой кровли*. Патент РФ № 163334U1. 2016. 2 с. <https://patents.google.com/patent/RU163334U1/ru>

Petrenko LK, Manzhilevskaya SE, Voit AV. *Green Roof Design*. RF Patent No. 163334U1. 2016. 2 p. (In Russ.) <https://patents.google.com/patent/RU163334U1/ru>

Об авторах:

Светлана Евгеньевна Манжилевская, кандидат технических наук, доцент кафедры организации строительства Донского государственного технического университета (344001, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), smanzhilevskaya@yandex.ru

Александр Иванович Евтущенко, доктор технических наук, декан факультета промышленного и гражданского строительства Донского государственного технического университета (344001, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), a.evtushenko@mail.ru

Дмитрий Рафаэлович Маилян, доктор технических наук, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций Донского государственного технического университета (344001, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), dmailyan868@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

С.Е. Манжилевская: формирование цели и задач исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов.

А.И. Евтущенко: проведение расчетов, оформление научной статьи.

Д.Р. Маилян: научное руководство, разработка концепция, развитие методологии.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Svetlana E. Manzhilevskaya, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Construction Organization, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344001, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), smanzhilevskaya@yandex.ru

Aleksandr I. Evtushenko, Dr. Sci. (Eng.), Dean of the Faculty of Industrial and Civil Engineering, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344001, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), a.evtushenko@mail.ru

Dmitrii R. Mailyan, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344001, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), dmailyan868@mail.ru

Claimed Contributorship:

SE Manzhilevskaya: formulation of the main concept, goals and objectives of the research, carrying out calculations, preparing the text, drawing the conclusions.

AI Evtushenko: carrying out calculations, design of a scientific article.

DR Mailyan: academic advising, research concept; methodology development.

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

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 02.04.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 29.04.2025

Принята к публикации / Accepted 05.05.2025

МАШИНОСТРОЕНИЕ

MACHINE BUILDING



УДК 62-192

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-146-157>

Метод вероятностной сетки для закона Фишера – Типпета

А.А. Котесов

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

✉ a.kotesov@yandex.ru

EDN: TCVEAL

Аннотация

Введение. Оценка параметров вероятностных законов распределения с использованием вероятностных сеток находит широкое применение на практике, особенно в современных программных комплексах. Такой подход активно используется для статистического анализа, где результаты вычислений представляются в виде вероятностного графика, что даёт возможность оценить соответствие набора данных предполагаемой вероятностной модели и выявить выбросы. В контексте вероятностной оценки нагруженности элементов машин и конструкций некоторые авторы предлагают применять закон Фишера – Типпета. Этот закон характеризуется функцией распределения, которая содержит три параметра и ориентирована на максимум, что обеспечивает гибкость в описании статистических данных и позволяет получать оценку максимального значения в контексте нагруженности. Тем не менее, в существующей литературе недостаточно обоснованы графическое представление результатов вычислений и методика оценки параметров, в том числе и с использованием метода вероятностной сетки, что ограничивает практическое применение закона Фишера – Типпета. Таким образом, основная цель данного исследования заключается в обосновании и разработке методики оценки параметров закона Фишера – Типпета с использованием метода вероятностной сетки.

Материалы и методы. В качестве материалов рассматривались принципы и теоретические основы построения вероятностных сеток, предварительная группировка данных и ранговый метод оценки эмпирической функции распределения. Обосновывались аналитические зависимости для построения вероятностной сетки и оценки параметров закона Фишера – Типпета. Использовались метод математического моделирования и сравнительный анализ. Для моделирования задействовали программный комплекс «Матлаб 8.6». Данные обобщали в табличном формате и визуализировали в виде графиков.

Результаты исследования. Обоснована и показана на примере методика построения вероятностного графика и методика графической оценки параметров закона Фишера – Типпета. Представлены график эмпирической функции распределения и вероятностный график с описанием позиций. Предложена методика построения специальной шкалы для оценки параметра формы, ориентированной на точку отсчета в начале координат. Выполнен сравнительный анализ оценок параметров, полученных графическим и аналитическим методами. Сопоставлялись оценки параметров масштаба, формы и сдвига. Относительная погрешность оценок методом вероятностной сетки не превышает 2 %. Показатель для параметра масштаба — 1,83 %; формы — 0,67 %, сдвига — 0,45 %. Соответствующие итоги аналитической оценки: 4,4 %, 9,33 % и 2,13 %. В данном случае погрешность выше, однако это не значит, что аналитический метод менее точен.

Обсуждение и заключение. Показана адекватность предложенной методики графической оценки параметров закона Фишера – Типпета методом вероятностной сетки. Ее можно применять, например, в программных комплексах или пользовательских приложениях. Специальная шкала для графической оценки параметра формы также подходит для оценки параметра формы закона Вейбулла. Полученные аналитические зависимости, положения методики и графический материал можно использовать при разработке соответствующего национального стандарта.

Ключевые слова: вероятностная сетка, вероятностный график, оценка параметров распределения, анализ надежности, закон Вейбулла, закон Фишера – Типпета

Благодарности. Автор выражает благодарность рецензентам, чья критическая оценка представленных материалов и предложения по их совершенствованию способствовали значительному повышению качества изложения результатов исследования.

Для цитирования. Котесов А.А. Метод вероятностной сетки для закона Фишера – Типпета. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(2):146–157. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-146-157>

Original Theoretical Research

Probability Grid Method for Fisher-Tippett Law

Anatoly A. Kotesov 

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

✉ a.kotesov@yandex.ru

Abstract

Introduction. Estimation of the parameters of probability distribution laws using probability grids is widely used in practice, particularly in modern software systems. This approach is actively employed for statistical analysis, where the calculation results are presented as a probability graph. This allows for the assessment of the correspondence between a given data set and a proposed probability model, as well as the identification of outliers. In the context of probabilistic assessment of the loading of machine elements and structures, some authors suggest applying the Fisher–Tippett law. This law is characterized by a distribution function with three parameters and is oriented to the maximum. This provides flexibility in the description of statistical data and enables the estimation of the maximum value in the context of loading. Nevertheless, the existing literature has not sufficiently substantiated the graphical representation of calculation results and the method of parameter estimation, including the use of the probability grid method, which limits the practical application of the Fisher–Tippett law. Therefore, the aim of this study is to justify and develop a methodology for estimating parameters of the Fisher–Tippett law using the probability grid method.

Materials and Methods. The principles and theoretical foundations of constructing probability grids, the preliminary grouping of data, and a ranking method for estimating the empirical distribution were considered as the materials for the study. Analytical dependencies for constructing a probability grid and estimating the parameters of the Fisher–Tippett law were justified. The method of mathematical modeling and comparative analysis were employed. The Matlab 8.6 software package was utilized for modeling. The data were summarized in a tabular format and visualized in the form of graphs.

Results. The method of constructing a probabilistic graph and the method of graphical estimation of the parameters of the Fisher–Tippett law were justified and demonstrated by example. A graph of the empirical distribution function and a probability plot with a description of the locations were presented. A method for constructing a special scale for estimating the shape parameter centered on the origin was proposed. A comparative analysis of parameter estimates obtained using graphical and analytical methods was performed. Estimates of the scale, shape, and shift parameters were compared. The relative error in estimates using the probability grid method was not more than 2%. The indicator for the scale parameter was 1.83%; for the shape parameter was it 0.67%, and for the shift parameter it was 0.45%. Corresponding results of the analytical assessment were 4.4%, 9.33% and 2.13%. In this case, the error was higher, but it did not mean that the analytical method was less accurate.

Discussion and Conclusion. The adequacy of the proposed method of graphical estimation of the parameters of the Fisher–Tippett law by the probabilistic grid method has been demonstrated. This method can be applied, for example, within software packages or user applications. A special scale for graphically estimating the shape parameter can also be used to estimate the shape parameter of the Weibull law. The obtained analytical dependencies, the provisions of the methodology and the graphical materials can be used in the development of the corresponding national standard.

Keywords: probability grid, probability graph, distribution parameter estimation, reliability analysis, Weibull law, Fisher-Tippett law

Acknowledgements. The author would like to express his gratitude to the reviewers for their critical assessment of the submitted materials and their suggestions for improving the quality of research results.

For citation. Kotesov AA. Probability Grid Method for Fisher-Tippett Law. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(2):146–157. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-146-157>

Введение. Графическое представление результатов статистического анализа в виде вероятностных графиков широко применяется в современных программных комплексах, в частности при анализе надежности или выживаемости. Это позволяет оценить параметры закона распределения и идентифицировать выбросы¹. Оценка параметров с помощью вероятностных сеток используется наряду с другими известными методами и в некоторых случаях может быть предпочтительнее. Вероятностные графики применяют при обработке результатов ресурсных испытаний² и составлении контрольных карт в системах управления качеством³. Метод вероятностной сетки позволяет визуально оценить соответствие набора данных предполагаемой модели случайной величины, о чем говорится в работах Дерябина М.А. [1], Добротина С.А. [2], Шпера В.Л. [3], Буланова Я.И. [4], Аблазовой К.С. [5], Великановой Н.П. [6], Хазановича Г.Ш. [7] и других современных ученых.

Касьянов В.Е. [8] и Котесов А.А. [9] для вероятностной оценки нагруженности элементов машин и конструкций предлагают использовать одну из форм обобщенного распределения экстремальных значений [10] с определенным видом параметризации, которую предлагают называть законом Фишера – Типпета. Данная модель похожа на трехпараметрический закон Вейбулла, но в отличие от него ориентирована на максимальное значение. Закон Фишера – Типпета подходит для оценки показателей надежности совместно с законом Вейбулла, к примеру, при использовании модели отказа нагрузка — прочность [11].

Графическое представление результатов вычислений и методика оценки параметров для данного закона не обоснованы должным образом. В научной литературе и нормативно-технической документации не представлена методика оценки параметров с помощью вероятностной сетки, что ограничивает практическое применение закона Фишера – Типпета. Поэтому основная цель данного исследования заключалась в обосновании и разработке методики оценки параметров закона Фишера – Типпета с использованием метода вероятностной сетки.

Материалы и методы. Оценка параметров распределения с помощью вероятностных графиков основана на группировке данных по интервалам и построении интервального эмпирического распределения независимо от предполагаемого теоретического распределения. Поэтому такие методы часто называют непараметрическими или ранговыми. Вероятностная сетка строится для конкретного закона распределения вероятностей с целью получения линейной зависимости между переменными⁴. Построение графика предполагает линейную аппроксимацию массива эмпирических точек на вероятностной сетке. Поэтому такой подход считается несколько грубым, но достаточно часто применяется наряду с другими. Метод вероятностной сетки может быть определяющим в случае, когда другие методы несостоятельны. К примеру, при получении оценок параметров методом максимального правдоподобия функция правдоподобия может содержать несколько локальных максимумов. В этом случае оценки параметров могут быть весьма неточными [12].

Для обоснования вероятностной сетки функцию распределения вероятностного закона необходимо привести к линейному виду. Функция распределения закона Фишера – Типпета определяется выражением:

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{c-x}{a}\right)^b}, & x \leq c, \\ 0, & x > c, \end{cases} \quad (1)$$

где x — значение случайной величины; a, b, c — соответственно параметры масштаба, формы и сдвига распределения.

Преобразуем функцию распределения (1) путем логарифмирования левой и правой части. При условии, что $c > x$, получим:

$$\begin{aligned} -\ln(1 - F(x)) &= \left(\frac{c-x}{a}\right)^b, \\ \ln(-\ln(1 - F(x))) &= b \ln(c-x) - b \ln(a). \end{aligned} \quad (2)$$

Очевидно, что выражение (2) — это линейная функция вида:

$$y = qx + m, \quad (3)$$

где x — переменная функции; q и m — константы.

¹ ГОСТ Р ИСО 16269–4–2017. *Статистические методы. Статистическое представление данных. Часть 4. Выявление и обработка выбросов*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200146680> (дата обращения: 15.01.2025).

² ГОСТ Р 50779.27–2017. *Статистические методы. Распределение Вейбулла. Анализ данных*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200146523> (дата обращения: 15.01.2025).

³ ГОСТ ISO 7870–1–2022. *Статистические методы. Контрольные карты. Часть 1. Общие принципы*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200192703> (дата обращения: 15.01.2025).

⁴ ГОСТ 11.008–75. *Прикладная статистика. Графические методы обработки данных. Метод вероятностных сеток*. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294753/4294753131.pdf> (дата обращения: 15.01.2025).

Сопоставив (2) и (3), получим:

$$\underbrace{\ln(-\ln(1-F(x)))}_y = \underbrace{b \ln(c-x) - b \ln(a)}_{qx+m}.$$

Выражение (2) отличается от аналогичного, обоснованного для закона Вейбулла с тремя параметрами, только правой частью:

$$\underbrace{b \ln(x-c) - b \ln(a)}_{\text{закон Вейбулла}} \quad \underbrace{b \ln(c-x) - b \ln(a)}_{\text{закон Фишера – Типпета}}.$$

Поэтому для построения вероятностного графика закона Фишера – Типпета целесообразно использовать основные положения ГОСТ 11.008 и ГОСТ 50779.27. Согласно этим стандартам, при графическом анализе статистические данные наносятся на вероятностную сетку, а затем оцениваются параметры распределения. Отметим, что метод вероятностной сетки реализуется как графоаналитическим способом, так и полностью аналитическим. Поэтому для устранения возможной неясности будем называть оценку параметров с помощью метода вероятностной сетки — графической, а оценку методом максимального правдоподобия — аналитической.

Левая часть выражения (2) позволяет определить ординату вероятностной шкалы для оценки параметра масштаба. Предположим, что $c - x = a$. Подставив это значение в (2), получим:

$$\begin{aligned} \ln(-\ln(1-F(x))) &= b \ln(a) - b \ln(a), \\ \ln(-\ln(1-F(x))) &= 0, \\ e^{\ln(-\ln(1-F(x)))} &= e^0, \\ -\ln(1-F(x)) &= 1, \\ e^{-\ln(1-F(x))} &= e^1, \\ \frac{1}{1-F(x)} &= e, \\ F(x) &= 1 - \frac{1}{e}, \\ F(x) &\approx 0,6321. \end{aligned} \tag{4}$$

Результат (4) позволяет сделать вывод, что абсцисса точки аппроксимирующей прямой с нулевой ординатой будет оценкой параметра масштаба.

По оси абсцисс вероятностного графика может быть использован десятичный логарифм. В этом случае зависимость (2) примет вид:

$$\ln(-\ln(1-F(x))) = \frac{1}{\lg(e)} (b \lg(c-x) - b \lg(a)).$$

Важный момент при реализации метода вероятностной сетки — предварительная обработка исходных статистических данных, в частности, получение интервального вариационного ряда и оценка значений эмпирической функции распределения. Как правило, для получения эмпирической функции распределения применяется ранговый метод, который базируется на оценке позиции распределения упорядоченных данных с учетом характеристик вариационного ряда (среднего значения, медианы, моды и т. д.). Поэтому для определения ординат точек применяются различные зависимости, в том числе выражения для приближенной оценки [13]. В данном случае выбор будет обусловлен количеством эмпирических данных, предполагаемым теоретическим распределением и видом вероятностного графика. При этом учитывается необходимость адекватного описания крайних членов вариационного ряда [14].

Следует отметить, что некоторые ранее обоснованные подходы к оценке эмпирической функции распределения подвергаются критике, и это может быть предметом отдельного рассмотрения [15].

Результаты исследования. Методом обратных функций выполнено моделирование набора случайных данных без определенного физического смысла, распределенных по закону Фишера – Типпета.

Обратная функция распределения получена аналитически из выражения (1):

$$\begin{aligned} F(x) &= 1 - e^{-\left(\frac{c-x}{a}\right)^b}, \\ -\ln(1-F(x)) &= \left(\frac{c-x}{a}\right)^b, \end{aligned}$$

$$\frac{c-x}{a} = \left(-\ln(1-F(x))\right)^{\frac{1}{b}},$$

$$x = c - a\left(-\ln(1-F(x))\right)^{\frac{1}{b}},$$

$$F^{-1}(x) = c - a\sqrt[b]{-\ln(1-F(x))}. \tag{5}$$

Моделирование выполнено с помощью программного комплекса Matlab 8.6 («Матлаб 8.6», рис. 1) по заданным параметрам закона — a, b, c . Исходные данные для моделирования представлены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования

Параметры закона Фишера – Типпета			Количество значений
a	b	c	n
100,00	3,00	250,00	100

```

1 fisher_tippet_mle.m x +
1  '@Исходные данные:';
2  a = 100; '/параметр масштаба';
3  b = 3;  '/параметр формы';
4  c = 250; '/параметр сдвига';
5  '@Генерация массива случайных чисел в интервале [0;1] с помощью команды rand():';
6  gamma = rand(100,1);
7  '@Вычисление значений обратной функции закона Фишера-Типпета и получение случайной выборки в виде массива data:';
8  data = c-a*((-log(1-gamma)).^(1/b));
9  '@Оценка параметров распределения по ранее полученной случайной выборке методом максимального правдоподобия:';
10 '@Функция плотности распределения закона:';
11 custmpdf = @(x,a,b,c) (c>x).*(b/a).*(((c-x)/a).^(b-1)).*exp(-((c-x)/a).^b);
12 '@Точность и количество итераций:';
13 opt = statset('MaxIter',1e5,'MaxFunEvals',1e5,'FunValCheck','off');
14 '@Оценка параметров распределения с помощью команды mle():';
15 params = mle(data,'pdf',custmpdf,'start',[100 3 250],'Options',opt,'UpperBound',[0 0 -Inf],'UpperBound',[max(data) Inf Inf]);
    
```

Рис. 1. Моделирование набора случайных данных в Matlab 8.6

Результаты моделирования в виде набора случайных данных x_i представлены в таблице 2.

Таблица 2

Набор случайных данных без определенного физического смысла

№	x_i									
1	201,98	222,87	182,26	183,98	133,30	114,41	204,15	157,16	169,63	217,17
2	124,97	100,63	138,10	112,03	185,71	160,66	169,88	123,02	192,45	179,76
3	143,79	97,90	118,26	208,58	152,80	95,93	179,54	214,92	155,05	132,63
4	140,21	199,05	140,76	179,14	200,77	189,65	178,47	117,03	152,32	174,79
5	148,32	164,27	169,47	153,61	160,16	200,97	201,86	198,03	187,74	205,69
6	160,11	147,75	109,29	188,97	127,93	179,33	153,42	128,49	159,80	160,55
7	176,62	180,02	183,43	149,66	113,64	170,37	180,74	132,75	84,58	172,97
8	147,27	138,01	158,67	133,01	161,65	168,27	194,75	114,29	162,36	139,61
9	199,99	156,53	104,26	161,36	181,23	178,00	241,30	197,14	144,12	159,39
10	195,72	167,66	182,20	148,29	148,13	144,22	180,65	161,10	169,07	132,26

Выполнена аналитическая оценка параметров масштаба, формы и сдвига. Оценки обозначены соответственно — a', b', c' (таблица 3).

Таблица 3

Результаты аналитической оценки параметров

Оценки параметров закона Фишера – Типпета		
a'	b'	c'
104,40	3,28	255,32

Закон Фишера – Типпета, в отличие от закона Вейбулла, имеет ограничение справа и задает максимальное значение случайной величины, поэтому для получения вариационного ряда необходимо упорядочить значения набора данных (выборки) от максимума до минимума.

Если объем выборки $n \leq 30$, то не рекомендуется группировать данные по интервалам. В данном случае каждой вариате будет присвоен ранг j , а для оценки значений эмпирической функции распределения рекомендовано использовать приближение для медианной позиции рангов [16]:

$$F(x_i) = \frac{j-0,3}{n+0,4} (j=1,2\dots n), \tag{6}$$

где x_i — упорядоченное от максимума до минимума значение варианты выборки, соответствующее j -му рангу; j — порядковый номер ранга; n — объем выборки.

В противном случае при $n > 30$ необходимо выполнить группировку данных по интервалам в соответствии с абсолютным размахом выборки. При этом количество интервалов k рекомендовано принимать в пределах $7 \leq k \leq 40$ в зависимости от объема выборки n . Для группировки данных необходимо определить границы интервала, подобрав значения $X' \leq x_{\min}$ и $X'' \geq x_{\max}$, и разбить полученный интервал $[X'; X'']$ на интервалы равной длины h :

$$h = \frac{X'' - X'}{k}. \tag{7}$$

Затем следует получить интервальный вариационный ряд, определив количество значений выборки n_i , попавших в каждый интервал. Каждый интервал описывается абсциссой X_i , которая определяет позицию распределения упорядоченных данных.

Для средней позиции эмпирическая функция распределения оценивается с помощью выражения:

$$F(X_i) = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{n+1} (i=1,2\dots k), \tag{8}$$

где X_i — середина i -го интервала; n_i — количество вариант выборки, попавших в i -й интервал; k — количество интервалов; n — объем выборки.

В качестве примера сгруппированы и рассчитаны значения эмпирической функции распределения (рис. 2) для набора данных из таблицы 3.

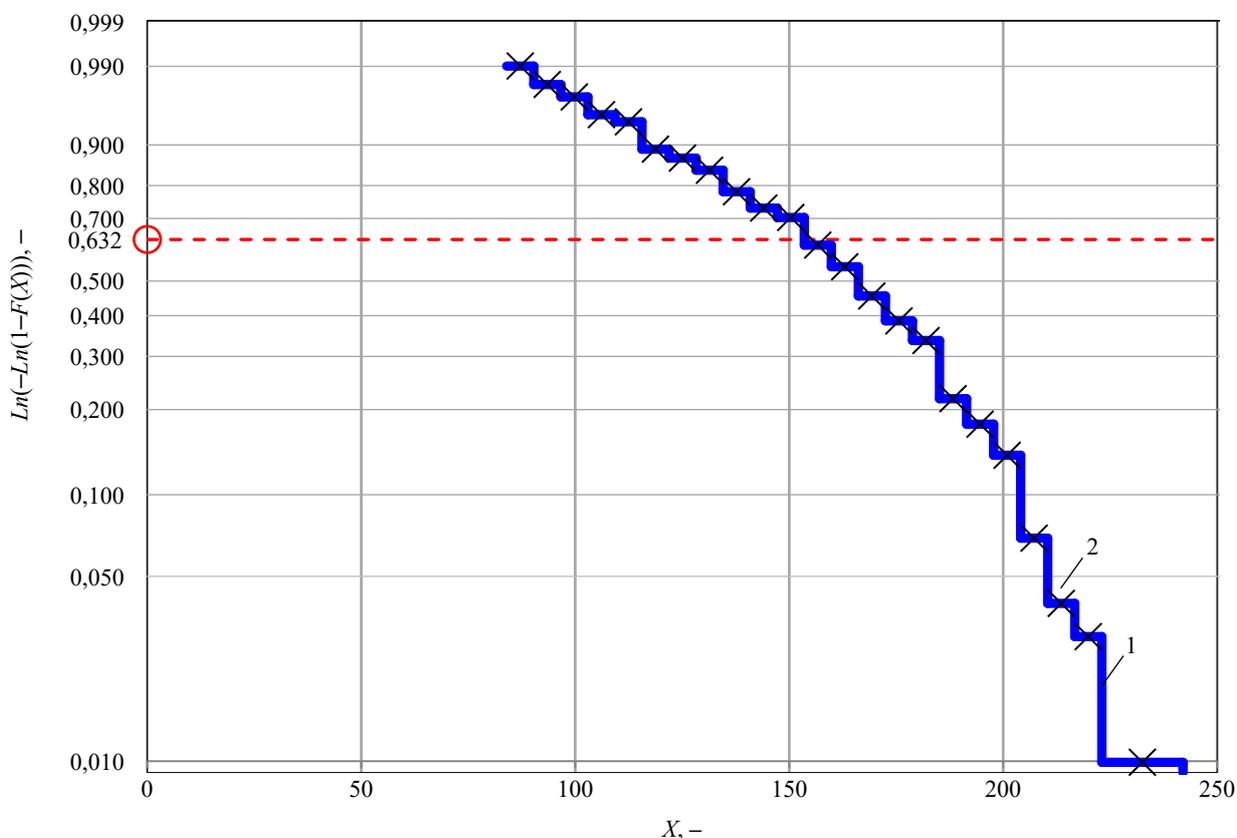


Рис. 2. Эмпирическая функция распределения: 1 — функция; 2 — середина интервала

На рис. 2 по оси ординат указана величина вероятности, по оси абсцисс — значения набора данных (выборки) без определенного физического смысла.

Для группировки данных принято $k = 25$, $X' = 84$, $X'' = 242$ и определено значение $h = 6,32$. Одно значение выборки попало в первые три интервала, поэтому их объединили. Итоговое количество интервалов — $k = 23$. Результаты вычислений представлены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты вычислений

i	Интервал ранга		n _i	X _i	F(X _i)	F(X _i)+F(X _{i+1})	Lg(X _i)	Ln(-Ln(1-(F(X _i)+F(X _{i+1}))))	C'-X _i	Lg(C'-X _i)
	начало	конец								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1*	223,04*	242,00*	1	232,52	0,0099	0,0099	2,3665	-4,6101	22,68	1,3555
2	216,72	223,04	2	219,88	0,0198	0,0297	2,3422	-3,5015	29,00	1,4623
3	210,40	216,72	1	213,56	0,0099	0,0396	2,3295	-3,2087	35,32	1,5480
4	204,08	210,40	3	207,24	0,0297	0,0693	2,3165	-2,6335	41,64	1,6195
5	197,76	204,08	7	200,92	0,0693	0,1386	2,3030	-1,9024	47,96	1,6808
6	191,44	197,76	4	194,60	0,0396	0,1782	2,2891	-1,6282	54,28	1,7346
7	185,12	191,44	4	188,28	0,0396	0,2178	2,2748	-1,4038	60,60	1,7824
8	178,80	185,12	12	181,96	0,1188	0,3366	2,2600	-0,8906	66,92	1,8255
9	172,48	178,80	5	175,64	0,0495	0,3861	2,2446	-0,7175	73,24	1,8647
10	166,16	172,48	7	169,32	0,0693	0,4554	2,2287	-0,4979	79,56	1,9007
11	159,84	166,16	9	163,00	0,0891	0,5446	2,2122	-0,2402	85,88	1,9339
12	153,52	159,84	7	156,68	0,0693	0,6139	2,1950	-0,0497	92,20	1,9647
13	147,20	153,52	9	150,36	0,0891	0,7030	2,1771	0,1939	98,52	1,9935
14	140,88	147,20	3	144,04	0,0297	0,7327	2,1585	0,2771	104,84	2,0205
15	134,56	140,88	5	137,72	0,0495	0,7822	2,1390	0,4214	111,16	2,0459
16	128,24	134,56	6	131,40	0,0594	0,8416	2,1186	0,6111	117,48	2,0699
17	121,92	128,24	3	125,08	0,0297	0,8713	2,0972	0,7179	123,80	2,0927
18	115,60	121,92	2	118,76	0,0198	0,8911	2,0747	0,7963	130,12	2,1143
19	109,28	115,60	5	112,44	0,0495	0,9406	2,0509	1,0379	136,44	2,1349
20	102,96	109,28	1	106,12	0,0099	0,9505	2,0258	1,1005	142,76	2,1546
21	96,64	102,96	2	99,80	0,0198	0,9703	1,9991	1,2575	149,08	2,1734
22	90,32	96,64	1	93,48	0,0099	0,9802	1,9707	-4,6101	155,40	2,1914
23	84,00	90,32	1	87,16	0,0099	0,9901	1,9403	-3,5015	161,72	2,2088

где * — корректировка при объединении интервалов 1–3 в один интервал [223,04; 242,00].

По оси абсцисс вероятностного графика принимаем шкалу с десятичным логарифмом. Результаты вычислений в столбцах 8 и 9 таблицы 4 определяют координаты точек для построения графика $\{Lg(X_i); Ln(-Ln(1-(F(X_i)+F(X_{i+1}))))\}$.

На следующем этапе оценивается параметр сдвига. Для этого сквозь массив точек (поз. 1 рис. 3) необходимо провести плавную кривую (не прямую) (поз. 2 рис. 3).

В точке пересечения прямой аппроксимирующей точки и прямой с «нулевой» ординатой (поз. 7 рис. 3) выполняется графическая оценка параметра масштаба A' .

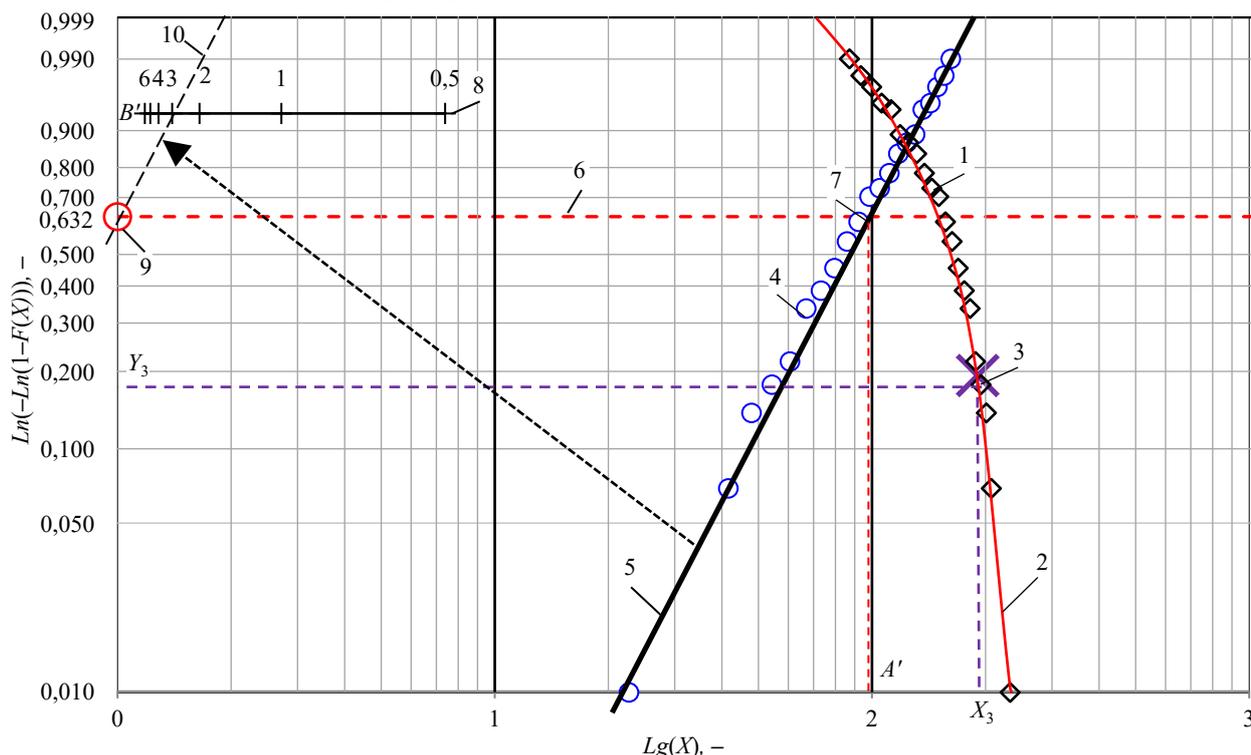


Рис. 3. Графическая оценка параметров закона Фишера – Типпета: 1 — точки с координатами $\{Lg(X_i); \ln(-\ln(1-(F(X_i)+F(X_{i+1}))))\}$; 2 — линия для оценки абсциссы X_3 по ординате Y_3 ; 3 — точка с координатами $\{Y_3; X_3\}$; 4 — точки с координатами $\{Lg(C'-X_i); \ln(-\ln(1-(F(X_i)+F(X_{i+1}))))\}$; 5 — прямая, аппроксимирующая точки 4; 6 — линия для оценки параметра масштаба; 7 — точка пересечения линий 5 и 6, соответствующая оценке параметра масштаба A' ; 8 — шкала для оценки параметра формы B' ; 9 — точка с координатами $\{0; 0\}$; 10 — прямая, проведенная через точку 9 параллельно прямой 5, для оценки параметра формы B' по шкале 8

На рис. 3 по оси ординат указана величина вероятности, по оси абсцисс — значения набора данных (выборки) без определенного физического смысла.

Координаты точек крайних членов вариационного ряда обозначаются через $\{X_1; Y_1\}$ и $\{X_2; Y_2\}$, и оценивается координата Y_3 :

$$Y_3 = \frac{Y_1 + Y_2}{2}. \quad (9)$$

С помощью ординаты Y_3 на ранее обозначенной кривой следует определить абсциссу X_3 (поз. 3 рис. 3). Затем оценивается параметр сдвига C' :

$$C' = \frac{X_1 \cdot X_2 - X_3^2}{X_1 + X_2 - 2X_3}. \quad (10)$$

В представленном примере крайние члены вариационного ряда — это средние точки интервалов $i = 1$ и $i = 23$ с координатами $\{Lg(X_1); \ln(-\ln(1-(F(X_1))))\}$ и $\{Lg(X_{23}); \ln(-\ln(1-(F(X_{22})+F(X_{23}))))\}$. Соответственно, $Y_1 = \ln(-\ln(1-(F(X_1))))$, $Y_2 = \ln(-\ln(1-(F(X_{22})+F(X_{23}))))$, $X_1 = Lg(X_1)$; $X_2 = Lg(X_{23})$. В результате графическая оценка параметра сдвига $C' = 248,88$. Используем ее для корректировки абсциссы всех точек, определив величины $(C' - X_i)$, и нанесем на график точки с соответствующими координатами (поз. 4 рис. 3). Как видно, после корректировки точки выстроились «ровнее», что позволяет провести через них прямую линию (поз. 5 рис. 3).

Оценка параметра формы соответствует показателю угла наклона аппроксимирующей прямой (поз. 5 рис. 3) к оси абсцисс. Для графической оценки параметра можно использовать координаты точек или специальную шкалу (при наличии). При оценке параметра формы по координатам необходимо выражать величины по оси абсцисс в масштабе натурального логарифма, т. е. использовать величину $\ln(X)$ вместо $Lg(X)$.

В рассмотренном примере представлена шкала для графической оценки параметра формы B' (поз. 8 рис. 3). Для построения шкалы выполнен расчет координат точек $\{Lg(X); \ln(Y)\}$ по заданным значениям параметра формы (таблица 5). Шкала ориентирована на точку отсчета с координатами $\{0; 0\}$ (поз. 9 рис. 3). Для оценки параметра формы необходимо через точку отсчета провести прямую, параллельную аппроксимирующей прямой (поз. 10 рис. 3).

Построение шкалы для графической оценки параметра формы

B'	0,5000	1,0000	2,0000	3,0000	4,0000	5,0000	6,0000
$Ln(Y)$	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
$Ln(X)$	2,0000	1,0000	0,5000	0,3333	0,2500	0,2000	0,1667
$Lg(X)$	0,8686	0,4343	0,2171	0,1448	0,1086	0,0869	0,0724

В результате обработки данных получены графические оценки параметров закона Фишера – Типпета (таблица 6).

Таблица 6

Результаты графической оценки параметров

Оценки параметров закона Фишера – Типпета		
A'	B'	C'
98,17	2,98	248,87

После оценки параметров необходимо выполнить проверку с помощью обратной функции (5), используя заданные значения вероятностей:

$$F^{-1}(x) = C' - A'(-\ln(1 - F(x)))^{\frac{1}{B'}}. \quad (11)$$

Вычислив значения обратной функции распределения (11) и соединив полученные точки на графике, можно визуально оценить качество модели. Как видно, график обратной функции (рис. 4) плавно описывает массив изначальных точек (поз. 1 и 2 рис. 4). Это позволяет сделать вывод, что полученная модель хорошо описывает данные, и оценка параметров выполнена правильно.

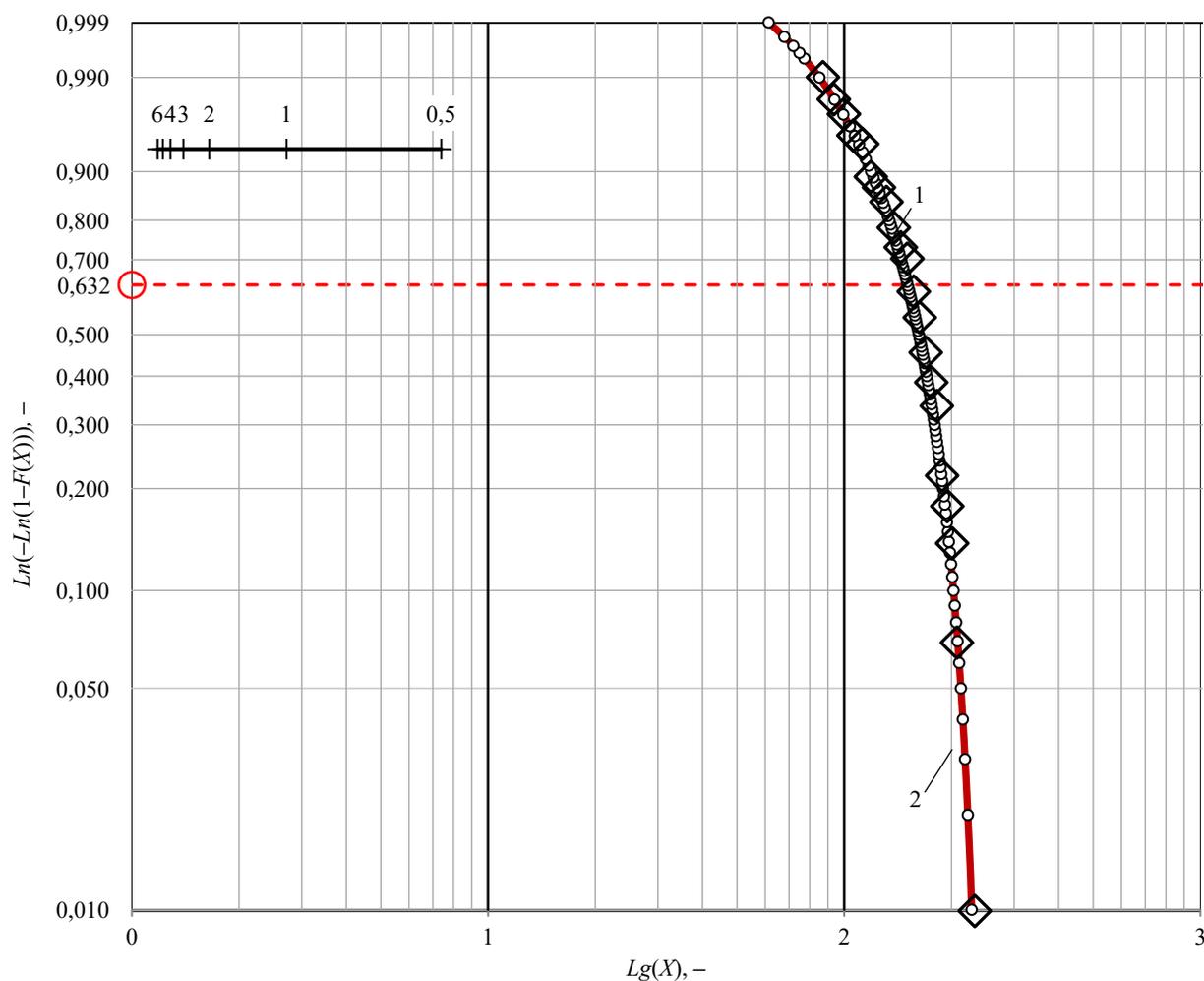


Рис. 4. Проверка модели после графической оценки параметров:

- 1 — начальные точки с координатами $\{Lg(X_i); Ln(-Ln(1-(F(X_i)+F(X_{i+1})))\}$;
- 2 — график обратной функции распределения $F^{-1}(x)$ с параметрами A', B', C'

На рис. 4 по оси ординат указана величина вероятности, по оси абсцисс — значения набора данных (выборки) без определенного физического смысла.

Результаты поверочных расчетов представлены в таблице 7.

Таблица 7

Результаты проверки полученной модели

$F(x)$	$F^{-1}(x)$	$Lg(F^{-1}(x))$	$Ln(-Ln(1-F(x)))$
0,0010	239,1548	2,3787	-6,9073
0,0050	232,2033	2,3576	-5,2958
0,0100	227,8309	2,3068	-4,6001
0,0500	212,5564	2,2775	-2,9702
0,1000	202,6589	2,2537	-2,2504
0,2000	189,4586	2,2317	-1,4999
0,3000	179,3564	2,2096	-1,0309
0,4000	170,4725	2,1862	-0,6717
0,5000	162,0373	2,1596	-0,3665
0,6000	153,5320	2,1263	-0,0874
0,7000	144,4053	2,0758	0,1856
0,8000	133,7435	2,0299	0,4759
0,9000	119,0766	1,9303	0,8340
0,9900	85,1730	1,8882	1,5272
0,9990	61,3715	1,7880	1,9326

Как видно, графические и аналитические оценки параметров близки к параметрам, заданным при моделировании набора данных (a, b, c).

Сравнивать полученные оценки по отношению к заданным параметрам не совсем корректно, однако такое сравнение оправданно, если принять заданные параметры за истинные параметры генеральной совокупности, а набор случайных данных x_i считать репрезентативной выборкой. Сравнительный анализ графических и аналитических оценок представлен в таблице 8.

Таблица 8

Сравнение графических и аналитических оценок параметров

Показатель	Параметр масштаба	Значение	$\delta, \%$	Параметр формы	Значение	$\delta, \%$	Параметр сдвига	Значение	$\delta, \%$
Заданные параметры	a	100,00	–	b	3,00	–	c	250,00	–
Аналитическая оценка параметров	a'	104,40	4,40	b'	3,28	9,33	c'	255,32	2,13
Графическая оценка параметров	A'	98,17	1,83	B'	2,98	0,67	C'	248,87	0,45

Сравнительный анализ показал, что относительная погрешность графических оценок не превышает 2 % ($\delta < 2 \%$). Погрешность аналитических оценок в данном примере оказалась выше, но это не значит, что аналитический метод менее точен.

Обсуждение и заключение. Представленный метод вероятностной сетки для закона Фишера – Типпета адекватен и подходит для практического применения. Например, его можно использовать в программных комплексах или при создании пользовательских приложений для графического представления результатов статистического анализа. Открывается возможность выполнять подгонку модели совместно с другими известными методами, в том числе если они несостоятельны. Предложенную методику построения шкалы для графической оценки параметра формы можно применять при оценке параметра формы закона Вейбулла. Полученные аналитические зависимости, положения методики и графический материал могут быть полезны при разработке соответствующего национального стандарта.

Список литературы / References

1. Дерябин М.А., Бавыкин О.Б., Дьяков Д.А. Применение метода вероятностной бумаги для определения закона распределения результатов измерений. В: *Труды II Международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития науки и образования: Теория и практика»*. Москва: Институт системных технологий; 2018. С. 67–72.

Deryabin M, Bavykin O, Dyakov D. Application of the Probabilistic Paper Method to Determine the Law of Distribution of Measurement Results. In: *Proceedings of II International Scientific and Practical Conference “Modern Trends in the Development of Science and Education: Theory and Practice”*. Moscow: Institute of System Technologies; 2018. P. 67–72. (In Russ.)

2. Добротин С.А., Косырева О.Н. Оценка наличия выбросов в данных времени удерживания при хроматографическом анализе. В: *Труды Международной научно-практической конференции Science and technology research — 2024*. Петрозаводск: Новая наука; 2024. С. 11–22. URL: <https://sciencen.org/assets/Kontent/Konferencii/Arhiv-konferencij/KOF-971.pdf?ysclid=m6huh354xe556269601> (дата обращения: 15.01.2025).

Dobrotin SA, Kosyрева ON. Assessing the Presence of Outlier in Retention Time Data from Chromatographic Analysis. In: *Proceedings of International Scientific and Practical Conference Science and Technology Research — 2024*. Petrozavodsk: New Science; 2024. P. 11–22. URL: <https://sciencen.org/assets/Kontent/Konferencii/Arhiv-konferencij/KOF-971.pdf?ysclid=m6huh354xe556269601> (In Russ.) (accessed: 15.01.2025).

3. Шпер В.Л. Инструменты качества и не только! Часть 5. Анализ закона распределения с помощью вероятностных сеток. *Методы менеджмента качества*. 2021;8:54–60.

Shper VL. Quality Tools and More! Part 5. Analysis of the Distribution Law Using Probability Grids. *Methods of Quality Management*. 2021;8:54–60. (In Russ.)

4. Буланов Я.И., Мошкало Н.Г., Курденкова А.В., Шустов Ю.С., Малега Д.К. Установление эмпирических законов распределения для определяющих показателей качества параарамидных тканей для бронепакетов с антипрорезными и антипрокольными свойствами. *Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности*. 2023;59(1):106–109. https://doi.org/10.46418/0021-3489_2023_59_01_20

Bulanov YaI, Moshkalo NG, Kurdenkova AV, Shustov YuS, Malyuga DK. Establishment of Empirical Laws of Distribution for Key Quality Indicators of Para-Aramid Fabrics for Armored Packages with Anti-Cut and Anti-Punch Properties. *The News of Higher Educational Institutions. Technology of Light Industry*. 2023;59(1):106–109. (In Russ.) https://doi.org/10.46418/0021-3489_2023_59_01_20

5. Аблазова К.С. Контрольные карты, определяющие стабильность технологического процесса, и их приложения. *Проблемы вычислительной и прикладной математики*. 2023;3(49):124–134.

Ablazova KS. Control Charts that Determine the Stability of the Technological Process and Their Applications. *Problems of Computational and Applied Mathematics*. 2023;3(49):124–134. (In Russ.)

6. Великанова Н.П., Великанов П.Г. Изменение жаропрочности материала рабочих лопаток турбины с учетом влияния эксплуатационной наработки. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. 2023;20(2):42–48. <https://doi.org/10.31429/vestnik-20-2-42-48>

Velikanova NP, Velikanov PG. Changing the Heat Resistance of the Turbine Blades Material with Taking into Account the Influence of Operational Life. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*. 2023;20(2):42–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.31429/vestnik-20-2-42-48>

7. Хазанович Г.Ш., Апрышкин Д.С. Оценка влияния внутренних факторов на показатели загруженности пассажирских лифтовых установок на основе результатов регулярного мониторинга. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(3):34–43. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-34-43>

Khazanovich GSh, Apryshkin DS. Assessment of the Influence of Internal Factors on the Indicators of Passenger Elevator Units Utilization Based on the Results of Regular Monitoring. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;7(3):34–43. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-34-43>

8. Касьянов В.Е., Демченко Д.Б., Косенко Е.Е., Теплякова С.В. Метод оптимизации надежности машин с применением интегрального показателя. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2020;1:23–31. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-1-23-31>

Kasyanov VE, Demchenko DB, Kosenko EE, Teplyakova SV. Method of Machine Reliability Optimization Using Integral Indicator. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2020;1:23–31. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-1-23-31>

9. Котесов А.А. Усеченная форма закона Фишера – Типпета для моделирования нагруженности машиностроительных конструкций. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2024;8(4):39–46. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-39-46>

Kotesov AA. Fisher-Tippett Law Truncated Form for Loading Modeling of Machinery Structures. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2024;8(4):39–46. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-39-46>

10. Fisher RA, Tippet LHC. Limiting Forms of the Frequency Distribution of the Longest of Smallest Member of Sample. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. 1928;24(2),180–190. <https://doi.org/10.1017/S0305004100015681>

11. Котесов А.А., Котесова А.А. Комплексная корректировка параметров выборочных распределений характеристик прочности и нагруженности при оптимизации показателей надежности объектов машиностроения. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023;8:699–708. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-8-699-700>

Kolesov AA, Kotesova AA. Comprehensive Correction Strength and Loads Characteristics Sample Distributions Parameters at Machinery Engineering Objects Reliability Optimization. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2023;8:699–708. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-8-699-700>

12. Lawless JF. *Statistical Models and Methods for Lifetime Data*, 2nd ed. Hoboken: Wiley; 2011. 664 p.

13. Ross R. Graphical Methods for Plotting and Evaluating Weibull Distributed Data. In: *Proc. of 1994 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*. Brisbane, QLD, Australia; 1994. P. 250–253 <http://doi.org/10.1109/ICPADM.1994.413986>

14. Hyndman RJ, Yanan Fan. Sample Quantiles in Statistical Packages. *The American Statistician*. 1996;50(4):361–365. <http://doi.org/10.1080/00031305.1996.10473566>

15. Makkonen L, Pajari M, Tikanmäki M. Discussion on “Plotting Positions for Fitting Distributions and Extreme Value Analysis”. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2013;40(9):927–929. <https://doi.org/10.1139/cjce-2013-0227>

16. Benard A, Bos-Levenbach EC. Het uitzetten van waarnemingen op waarschijnlijkheidspapier. *Statistica Neerlandica*. 1953;7(3):163–173. <https://www.sci-hub.ru/10.1111/j.14679574.1953.tb00821.x?ysclid=m6hwlukl7k731787987>

Об авторе:

Анатолий Анатольевич Котесов, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), a.kotesov@yandex.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Anatoly A. Kotesov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Transport Systems and Logistics, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), a.kotesov@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 07.02.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 25.02.2025

Принята к публикации / Accepted 10.03.2025

МАШИНОСТРОЕНИЕ

MACHINE BUILDING



УДК 621.86/.87

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-158-169>

Методика определения группы классификации стреловых кранов зарубежных фирм при оценке их технического состояния в период действующих санкций



EDN: LOEFTJ

Д.Н. Симонов², Р.В. Хван¹ , Э.А. Панфилова¹ , Л.А. Терновской¹ ¹ Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация² ООО ИКЦ «Мысль» НГТУ, г. Новочеркасск, Российская Федерация✉ khvanroman@yandex.ru

Аннотация

Введение. На текущий момент в Российской Федерации более 7 000 юридических лиц и индивидуальных предпринимателей эксплуатируют опасные производственные объекты (ОПО) и свыше 90 тысяч подъемных сооружений, включая грузоподъемные краны, подъемники и лифты. Периодически на этих сооружениях регистрируются серьезные аварии, приводящие к несчастным случаям и гибели людей, что подчеркивает значимость вопроса обеспечения безопасности на грузоподъемных кранах. При этом санкции, введенные зарубежными компаниями — производителями импортных кранов, установленных в портах, усложняют их дальнейшую безопасную эксплуатацию, поскольку многие из них превышают или приближаются к предельному сроку службы. В соответствии с нормативными правовыми актами Российской Федерации, для их дальнейшей эксплуатации необходимо проведение экспертизы промышленной безопасности. Существующие исследования, посвященные оценке технического состояния грузоподъемных машин, в основном затрагивают вопросы остаточного ресурса. Однако анализ показывает, что особенности оценки состояния кранов зарубежных производителей, включая их фактические нагрузки в соответствии с FEM¹, остаются недостаточно исследованы. Это приводит к несоответствию фактической и паспортной загрузки, что создает повышенные риски аварийных ситуаций. Цель данного исследования заключается в разработке методики определения фактической группы классификации (режима) стреловых кранов зарубежных компаний. Эта методика позволит произвести объективную оценку технического состояния кранов в процессе экспертизы промышленной безопасности. Также в рамках работы будет проведена проверка разработанной методики на конкретном примере.

Материалы и методы. Оценка базировалась на статистических данных, собранных последние 27 лет. Исследование проводилось на основе систематизации типовых повреждений кранов, выявленных в ходе экспертизы промышленной безопасности. Использовались статистические данные о количестве кранов и авариях, собранные из открытых источников. Количество кранов за период наблюдения составило 254 250 единиц, а среднее число аварий — 42,29. Это дало возможность рассчитать фоновую вероятность аварий, равную $1,66 \cdot 10^{-4}$, что позволило выявить превышение допустимого значения вероятности разрушения, которое составило $2 \cdot 10^{-3}$ против установленного нормативного уровня 10^{-4} . Данные результаты стали основанием для проведения анализа технического состояния кранов и доработки методики оценки рисков. Непосредственно анализ технического состояния кранов основывался на исследовании функций загрузки, которые зависят от массы груза и вылета стрелы, рассматриваемых как случайные величины. Для этого был произведен сбор и обработка первичной информации в форме гистограмм распределения перемещаемых масс грузов и вылетов стрелы испытываемых кранов. Эти данные использовались для расчета остаточного ресурса по наработке на усталость ресурсопределяющего узла металлоконструкции и вероятности разрушения конструкции. При статистической обработке данных применялись методики, позволяющие формализовать выводы об уровне риска эксплуатации кранов, основанные на конкретных численных значениях вероятности аварий и величины ущерба, учитывающие экономические и социальные аспекты.

¹ F.E.M. 1.001–1998. *Правила проектирования подъемных устройств*. VBOOK.PUB. URL: <https://vbook.pub/documents/fem-1001-3-edition-revised-1998101-rules-for-the-design-of-hoisting-appliances-5wglv1zj78o7> (дата обращения: 24.02.2025).

© Симонов Д.Н., Хван Р.В., Панфилова Э.А., Терновской Л.А., 2025

Результаты исследования. Для оценки технического состояния стреловых кранов зарубежных фирм разработана методика, позволяющая определить фактическую группу классификации (режим). Методика включает расчет коэффициента распределения нагрузок (K_p) через грузовые моменты, оценку остаточного ресурса по характеристическому числу, расчет напряжений на усталость для ресурсопределяющего узла, определение вероятности разрушения конструкции, а также оценку уровня риска аварии. В статье представлен пример применения данной методики на конкретном стреловом кране. Для крана с расчетным $K_p = 0,30$ (группа А6) и нормативным характеристическим числом равным 125 000, фактическое характеристическое число составляет 179 323, что указывает на исчерпание ресурса. Проверочный расчет напряжений на усталость опорного контура показал близость к пределу прочности. Значение вероятности разрушения с учетом статистических данных о загруженности крана превысило допустимое значение.

Обсуждение и заключение. Анализ результатов на конкретном примере показал, что превышение паспортной группы классификации режима работы крана и, как следствие, превышение назначенного ресурса его конструктивных элементов приводит к значительному увеличению риска аварий. В результате экспертизы установлено, что фактическая группа классификации режима работы крана превышает паспортное значение и составляет А6 вместо А5. Разработанная методика оценки фактической группы классификации режима работы стреловых кранов зарубежных производителей позволит существенно снизить вероятность разрушения конструкций и уровень аварийности в процессе экспертизы промышленной безопасности. При этом рекомендуется при расчетах использовать фоновое значение вероятности аварии грузоподъемного крана $1,66 \cdot 10^{-4}$ и среднее значение материального ущерба 73,2 млн рублей.

Ключевые слова: стреловые краны, экспертиза промышленной безопасности, вероятность разрушения, группа классификации, ресурс

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

Для цитирования. Симонов Д.Н., Хван Р.В., Панфилова Э.А., Терновской Л.А. Методика определения группы классификации стреловых кранов зарубежных фирм при оценке их технического состояния в период действующих санкций. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2025;9(2):158–169. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-158-169>

Original Empirical Research

Methodology for Determining the Classification Group of Jib Cranes of Foreign Companies when Assessing Their Technical Condition during Current Sanctions

Dmitry N. Simonov², Roman V. Khvan¹  , Elvira A. Panfilova¹ , Leonid A. Ternovskoi¹ 

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

² “Mysl” Engineering and Consulting Center, Novocherkassk, Russian Federation

✉ khvanroman@yandex.ru

Abstract

Introduction. Currently, more than 7,000 legal entities and individual entrepreneurs in the Russian Federation operate hazardous production facilities (HPFs) and over 90,000 lifting facilities, including cranes, hoists, and elevators. Periodically, serious accidents leading to injuries and deaths are recorded at these facilities, emphasizing the importance of ensuring safety on lifting cranes. However, sanctions against imported cranes installed in ports make it difficult to ensure their safe operation, as many of these cranes exceed or approach the end of their service life. According to the regulatory legal acts of the Russian Federation, an industrial safety inspection is required for further operation of these cranes. The existing studies on the assessment of technical condition of lifting machines primarily focus on issues related to residual life. However, the analysis reveals that the features of evaluating the condition of cranes manufactured by foreign companies, in particular, their actual loads as determined by FEM², have not been thoroughly investigated. This discrepancy between actual and specified loading leads to increased risk of accidents. The aim of this research is to develop a methodology for determining the actual classification group of jib cranes produced by foreign companies, which will allow for an objective assessment of their technical condition during the industrial safety inspections, as well as verifying the developed methodology through a specific example.

² F.E.M. 1.001–1998. *Rules for the Design of Hoisting Appliances.* VBOOK.PUB. URL: <https://vbook.pub/documents/fem-1001-3-edition-revised-19981041-rules-for-the-design-of-hoisting-appliances-5wglvlzj78o7> (accessed: 24.02.2025).

Materials and Methods. The assessment was based on statistical data collected over the past 27 years. The study was conducted through a systematization of typical damages to cranes identified during industrial safety inspections. Statistical data on the number of cranes and accidents were collected from open sources. During the observation period, there were 254,250 cranes, and the average number of accidents was 42.29, which allowed us to calculate a background probability of accidents of $1.66 \cdot 10^{-4}$. This allowed us to identify an excess in the permissible destruction probability, which was 2×10^{-3} , compared to the established regulatory level of 10^{-4} . Based on this, we analyzed the technical condition of cranes and refined the risk assessment methodology. The direct analysis of the technical condition of cranes was based on the study of loading functions, which depended on the weight of the load and the boom outreach, considered as random variables. For this purpose, we collected and processed primary information in the form of histograms of the distribution of transported cargo masses and boom outreach of the tested cranes. We used these data to calculate the remaining fatigue life of the resource-determining component of the metal structure and the probability of structural failure. Statistical data processing techniques were used to formalize conclusions about the risk level of crane operation based on specific numerical values of accident and damage probabilities, taking into account economic and social factors.

Results. To assess the technical condition of jib cranes manufactured by foreign companies, a methodology was developed to determine the actual classification group. The methodology included calculating the load distribution coefficient (K_p) through load moments, estimating the residual resource by a characteristic number, calculating fatigue stresses for a resource-determining unit, determining the probability of structural failure, and assessing the risk of an accident. The article provides an example of the application of this technique to a specific jib crane. For a crane with design $K_p = 0.30$ (group A6) and a standard characteristic number of 125,000, the actual characteristic number was 179,323, indicating that service life had been exhausted. Verification calculation of fatigue stresses in the reference contour showed close proximity to the ultimate strength. The value of the probability of destruction, considering the statistical data on the crane load, exceeded the permissible value.

Discussion and Conclusion. The analysis of the results, using a specific example, showed that exceeding the passport classification of the crane's operating mode, and as a result, exceeding the assigned resources of its structural components, led to a significant increase in the risk of accidents. Based on the examination, it was found that the actual classification group of the crane's operating mode exceeded the passport value and amounts to A6 instead of A5. The developed methodology for assessing the actual classification group of the operating mode of jib cranes from foreign manufacturers allows for a significant reduction in the likelihood of structural failure and accident rate during industrial safety inspections. At the same time, it is recommended to use the background probability of a lifting crane accident of $1.66 \cdot 10^{-4}$ and the average value of material damage of 73.2 million rubles in calculations.

Keywords: jib cranes, industrial safety inspection, probability of destruction, classification group, service life

Acknowledgements. The authors would like to express their gratitude to the team of the Engineering and Consulting Center “Mysl” in Novocherkassk for the opportunity to use the data from the industrial safety inspection of jib cranes and the statistical database on typical damage to cranes.

For citation. Simonov DN, Khvan RV, Panfilova EA, Ternovskoi LA. Methodology for Determining the Classification Group of Jib Cranes of Foreign Companies when Assessing Their Technical Condition during Current Sanctions. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(2):158–169. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-158-169>

Введение. В настоящее время на территории Российской Федерации зарегистрировано 51 670 единиц поднадзорных опасных производственных объектов, эксплуатирующих более 284 тысяч подъемных сооружений, среди которых 224 363 грузоподъемных крана. Важно отметить, что 51,2 % эксплуатируемых подъемных сооружений уже отработало нормативный срок службы.

В 2023 году на подъемных сооружениях было зафиксировано 30 аварий. Анализ причин этих происшествий за последние несколько лет показал, что основными факторами их возникновения являются: осуществление производственного контроля на низком уровне [1], эксплуатация неисправного подъемного сооружения, а также неудовлетворительная организация проведения осмотров, технического обслуживания и плановых ремонтов подъемных сооружений [2].

Санкции, введенные странами-производителями, затронули зарубежные грузоподъемные краны, которые в основном установлены в морских и речных портах. У значительной части импортных грузоподъемных кранов срок службы подошел к критической точке или даже превысил установленный нормативный [3]. Для обеспечения дальнейшей безопасной эксплуатации этих устройств в соответствии с требованиями нормативных правовых актов Российской Федерации необходимо проведение экспертизы промышленной безопасности. Это обязательное действие позволяет гарантировать надежность и безопасность эксплуатации кранов, а также соблюдение всех дей-

ствующих стандартов и норм. Группы классификации, классы использования и режимы нагружения указанных кранов приняты на основе международных европейских норм FEM 1.001-1998³ «Правила проектирования подъемных средств», модификации которых эквивалентны российскому стандарту ГОСТ 34 017–2016.⁴ Сравнительный анализ этих нормативных документов показал, что согласно FEM⁵ в паспортах кранов указана нагрузка Q2, тогда как фактическая нагрузка соответствует Q3. Это приводит к превышению значения группы классификации и повышенному риску возникновения аварий.

Особенностью эксплуатации таких кранов в условиях наложенных санкций со стороны государств-производителей является прекращение или значительное ограничение поставок оборудования, запасных частей и агрегатов к ним, а также нарушение контактов для получения консультационных услуг по вопросам эксплуатации кранов. К тому же наблюдается прекращение обслуживания техники специалистами от фирм-поставщиков, дистанционного мониторинга состояния оборудования и обновления программных продуктов, обеспечивающих безопасную эксплуатацию кранов.

Стреловые краны, согласно законодательству РФ № 116 ФЗ⁶, относятся к потенциально опасным объектам IV класса опасности, которые должны соответствовать нормированным требованиям безопасности, таким как безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость [4, 5].

В ходе выполнения плановых экспертных обследований кранов установлено наличие отдельных ресурсоопределяющих (ресурсоограничивающих) узлов и элементов металлоконструкций [6]. Повреждение (выработка ресурса) таких узлов может привести к полному разрушению конструкции. Например, произошли аварии, связанные с: разрушением узла крепления рейки механизма изменения вылета стрелы у порталного крана типа «Альбатрос» (рис. 1), разрушением узла крепления аутригеров у башенного крана (рис. 2), разрушением механизма подъема у порталного крана (рис. 3).



а)



б)

Рис. 1. Авария порталного крана типа «Альбатрос» по причине разрушения узла крепления рейки механизма изменения вылета стрелы: а — общий вид; б — место разрушения

³ F.E.M. 1.001–1998. *Правила проектирования подъемных устройств*. VBOOK.PUB. URL: <https://vbook.pub/documents/fem-1001-3-edition-revised-1998101-rules-for-the-design-of-hoisting-appliances-5wglvlzj78o7> (дата обращения: 24.02.2025).

⁴ ГОСТ 34 017–2016. *Краны грузоподъемные*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200144610?ysclid=mb95dc232z408543082> (дата обращения: 24.02.2025).

⁵ Там же.

⁶ *О промышленной безопасности опасных производственных объектов*. Федеральный закон № 116 ФЗ от 21.07.1997. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/9046058?ysclid=mb95ftxllk548884359> (дата обращения: 24.02.2025).

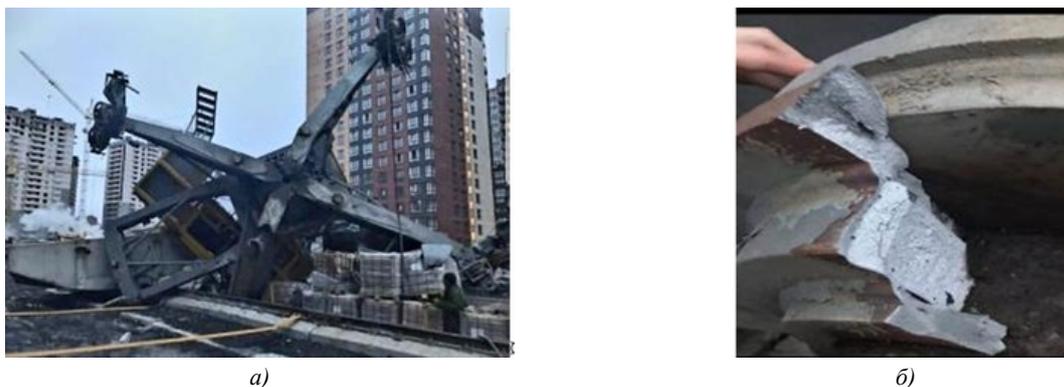


Рис. 2. Авария башенного крана по причине разрушения узла крепления аутригеров (выносных опор) ходовой рамы:
а — общий вид; *б* — место разрушения



Рис. 3. Авария портального крана по причине разрушения механизма подъема:
а — до аварии; *б* — после аварии

Описанные аварии объединены общей причиной [7], а именно, превышением группы классификации (режима) крана паспортного значения, что, в свою очередь, приводит к превышению назначенного ресурса крана в целом, а также ресурсоопределяющих конструктивных элементов крана в частности.

Актуальной представляется задача проведения объективной оценки технического состояния стрелковых кранов в процессе экспертизы промышленной безопасности. Поэтому целью данной работы стала разработка методики определения фактической группы классификации (режима) стрелковых кранов зарубежных компаний и проверка разработанной методики на конкретном примере.

Материалы и методы. Краны типа «Готвальд» имеют группу классификации режима работы крана А5 или А6 с рекомендованными параметрами по международным европейским нормам FEM 1.001–1998⁷ [8]:

- группа классификации крана А;
- группа классификации механизмов М;
- группа классификации иных компонентов Е;
- класс использования U для каждой группы;
- режим нагружения Q для каждой группы.

При данных параметрах должен быть реализован определенный срок службы узлов и механизмов крана [9], выраженный в моточасах (таблица 1).

⁷ F.E.M. 1.001–1998. *Правила проектирования подъёмных устройств*. VBOOK.PUB. URL: <https://vbook.pub/documents/fem-1001-3-edition-revised-1998101-rules-for-the-design-of-hoisting-appliances-5wglvlzj78o7> (дата обращения: 24.02.2025).

Диаграмма срока службы для кранов типа НМК, HSK

Компоненты	Рабочие часы	Срок службы компонентов								
		5 000	10 000	15 000	20 000	25 000	30 000	40 000 Q2	45 000	50 000 Q3
Металло-конструкция	Проверить каждые 5000 часов	■								
Дизельный агрегат	Капитальный ремонт				■			■		
	Генератор Муфта				■			■		
Механизм поворота	Редуктор									■
	Двигатель				■			■		
	Шестерня ОПУ Тормоз				■			■		
Оси	Ось									■
	Тормоза									■
Ходовая часть	Гидравлические двигатели									■
	Клапаны									■
Гидравлическая система	Насос			■			■		■	
	Уплотнения			■			■		■	
Электрическая система	Привод					■				■
	Система управления									
Механизм подъема	Редуктор Тормоз				■			■		
	Блоки		■							
	Двигатель				■			■		
	Канаты 6 000 час	■	■							
Система выносных опор	Цилиндры					■				
Механизм изменения вылета стрелы	Цилиндры					■				
Ходовая часть на рельсах					■			■		
Ходовая часть на шинах	Ось									■
	Двигатель				■			■		
	Тормоз									■
	Редуктор									■
Компоненты	Рабочие часы	5 000	10 000	15 000	20 000	25 000	30 000	40 000	45 000	50 000

По данной таблице определяются рекомендованные сроки службы в моточасах несущих металлоконструкций кранов, а также основных узлов и компонентов крана — механизмов подъема, поворота, ходовой части, электро- и гидрооборудования — при определенном режиме нагружения Q. Например, срок службы металлоконструкции крана составляет 40 000 моточасов при режиме нагружения Q2.

Согласно FEM⁸, в паспортах импортных кранов указан (рекомендован) режим нагружения Q2. Однако при анализе фактической загруженности нескольких обследованных кранов было установлено, что действующий режим нагружения соответствует уровню Q3, что превышает паспортные значения группы классификации (режима) крана [10].

⁸ F.E.M. 1.001–1998. *Правила проектирования подъёмных устройств*. VBOOK.PUB. URL: <https://vbook.pub/documents/fem-1001-3-edition-revised-1998101-rules-for-the-design-of-hoisting-appliances-5wglvlzj78o7> (дата обращения: 24.02.2025).

При проведении экспертизы промышленной безопасности особенно важно собрать данные о реальной загрузке крана [11]. Тем не менее, далеко не всегда есть возможность воспользоваться регистраторами параметров, так как они могут находиться в неработоспособном состоянии. Поэтому в таких ситуациях решено применить статистические данные о фактической загрузке кранов.

Загрузка стреловых кранов является функцией как минимум двух параметров — массы груза и вылета стрелы, произведение которых определяет грузовой момент. В общем случае эти параметры могут быть случайными величинами [12], их следует учитывать при определении загрузки крана.

Таким образом, ключевой задачей определения группы классификации (режима) крана является сбор первичной информации и построение гистограмм распределения перемещаемых масс грузов и вылетов стрелы испытуемого крана. Распределение случайных величин (массы перемещаемых грузов и вылет стрелы крана) характеризуется такими величинами, как среднее значение (математическое ожидание) и среднеквадратичное отклонение (дисперсия).

Принимаем закон распределения случайных величин (массы перемещаемых грузов и вылет стрелы крана) за нормальный, что значительно упростит расчеты в дальнейшем [13]. Принятые допущения подтверждаются исследованиями вылета и угла наклона стрел порталных кранов, представленными в работах [7, 8].

Результаты исследования. С целью получения более объективной информации для принятия обоснованного решения о дальнейшей эксплуатации стреловых кранов зарубежных компаний, разработана методика оценки фактической группы классификации (режима) для проведения экспертизы промышленной безопасности. Процесс включает несколько этапов. Первым шагом является определение фактического значения коэффициента распределения нагрузок K_p через грузовые моменты и его сравнение с паспортным значением. Вторым этапом является оценка остаточного ресурса по наработке и его сопоставление с нормативным значением. Затем проводится расчет максимальных напряжений на усталость ресурсопределяющего узла металлоконструкции с последующим сравнением полученного значения с предельным. Также осуществляется расчет вероятности разрушения конструкции и его сравнительный анализ с допустимым значением. Важным элементом оценки является анализ уровня риска аварии.

В качестве примера рассмотрен конкретный объект, на котором определена фактическая группа классификации (режима) стрелового крана, который рекомендован к списанию. На первом этапе определен коэффициент распределения нагрузок K_p определен через грузовые моменты из выражения:

$$K_p = \sum_i \left[\frac{C_i}{C_T} \right] \left(\frac{M_{(xy)}}{M_n} \right)^3, \quad (1)$$

где C_i / C_T — отношение количества циклов работы крана со средним грузовым моментом к общему количеству циклов (в расчетах принимаем равное 1); $M_{(xy)}$ — математическое ожидание грузового момента; M_n — максимальный грузовой момент крана, указанный в паспорте крана; $M_{xy} = 28 \cdot 40 = 1120$ т·м; $M_n = 33,4 \cdot 50 = 1670$ т·м (40 и 50 — среднее и наибольшее значение вылета в крюковом режиме; 28,0 и 33,4 — средняя и наибольшая грузоподъемность крана в крюковом режиме по грузовой характеристике).

$$K_p = 1 \cdot \left(\frac{1120}{1670} \right)^3 \cdot 3 = 0,30. \quad (2)$$

В соответствии с [5, 6, 9], группа классификации (режима) кранов в целом определяется в зависимости от класса использования (U0 – U9), характеризующегося величиной максимального числа циклов за срок службы, и режима нагружения (Q1–Q4). Расчетное значение коэффициента распределения нагрузок $K_p = 0,30$ соответствует группе классификации (режима) крана в целом А6, но выше паспортного значения А5 [14].

На втором этапе произведена оценка остаточного ресурса крана по текущему значению характеристического числа, которое является мерой ресурса крана, и определяется с учетом коэффициента распределения нагрузок крана для соответствующего режима нагружения и количества рабочих циклов [15].

Предельное состояние крана по наработке наступает при условии равенства или превышения текущего характеристического числа относительно нормативного значения. Остаточный ресурс определен из выражения:

$$C_{ост} = (N_n - N_T) \cdot \left(\frac{M_n}{M_{xy}} \right)^3, \quad (3)$$

где N_n — нормативное значение характеристического числа, принимаемое в зависимости от группы классификации крана по режиму работы в соответствии с [9, 10]; N_T — текущее значение характеристического числа.

$$N_T = C \cdot \left(\frac{M_{xy}}{M_n} \right)^3. \quad (4)$$

Для ранее рассмотренного примера дополнительные условия следующие:

$N_n = 125\,000$ — нормативное значение характеристического числа для группы классификации (режима) крана А5;

$C = 596\,228$ — расчетное количество рабочих циклов.

Тогда текущее значение характеристического числа:

$$N_T = 596228 \cdot 0,67^3 = 179\,323;$$

$$179\,323 > 125\,000;$$

$$N_T > N_n.$$

Вывод: ресурс исчерпан.

На следующем этапе произведен проверочный расчет ресурсопределяющего узла металлоконструкции [11] на сопротивление усталости по формуле.

$$\sigma_{max} = \alpha_V \cdot R_V \cdot \gamma_V \cdot \gamma_C, \quad (5)$$

где σ_{max} — наибольшее напряжение; α_V — коэффициент режима работы элемента; R_V — расчетное сопротивление усталости, определяемое с учетом временного сопротивления, стали и группы соединений элементов, учитывающих степень концентрации напряжений; γ_V — коэффициент, учитывающий вид напряженного состояния и асимметрию действующих напряжений; γ_C — коэффициент условий работы.

Значение коэффициента режима работы α_V определен в зависимости от группы режима крана и степени концентрации напряжений. Значение γ_V рассчитываем в зависимости от вида напряженного состояния и коэффициента асимметрии напряжений:

$$\rho = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}}, \quad (6)$$

где σ_{min} и σ_{max} — наибольшее и наименьшее по абсолютному значению напряжения в рассчитываемом элементе.

В качестве примера выполнен расчет опорного контура поворотного устройства порталного крана. Результаты расчета на сопротивление усталости представлены в таблице 5.

Таблица 5

Результаты расчета на сопротивление усталости

Параметр	Значение
Максимальное сжимающее напряжение, σ_{max}	65 МПа
Максимальное растягивающее напряжение, σ_{min}	55 МПа
Коэффициент режима работы элемента α_V	1,5
Расчетное сопротивление усталости R_V для 6-ой группы элементов по концентрации напряжений	60 МПа
Коэффициент режима работы элемента, α_V	1,5
Коэффициент, учитывающий вид напряженного состояния и асимметрию действующих напряжений, γ_V	1,08
Коэффициент условий работы, γ_C	0,7
Условие прочности на сопротивление усталости	65 МПа не более 68 МПа

Проверочный расчет опорного контура поворотного устройства порталного крана на сопротивление усталости показал, что расчетные максимальные значения напряжений близки к предельному значению.

Имея статистический материал о загруженности стрелового крана, определена вероятность разрушения ресурсопределяющего элемента металлоконструкции из выражения:

$$P_{разр} = \left[\frac{1}{2} - \Phi \left(\frac{\sigma_K - \sigma_{вер}}{\sigma_n} \right) \right] \left[\frac{1}{2} + \Phi \left(\frac{\sigma_K - \sigma_{пер}}{\sigma_n} \right) \right], \quad (7)$$

где $\Phi(x)$ — функция Лапласа; σ_n — среднее квадратичное отклонение напряжений в распределении фактора нагрузки; σ_n — среднее квадратичное отклонение напряжений в распределении фактора прочности; $\sigma_{вер}$ — среднее расчетное напряжение в конструкции; $\sigma_{пер}$ — среднее значение предела выносливости материала конструкции с учетом асимметрии цикла; σ_K — расчетное значение напряжения в точке пересечения распределения переменных напряжений и распределения пределов выносливости, которое можно получить из решения равенства уравнений распределений нагрузки и прочности. Результаты расчета приведены в таблице 6.

Таблица 6

Результаты расчета вероятности разрушения ресурсопределяющего элемента металлоконструкции

Параметр	Значение
$\sigma_{вср}$	58 МПа
σ_n	2,5 МПа
X(n)	1,6
$\Phi(n)$	0,4452
$\sigma_{пер}$	68 МПа
σ_n	3,3 МПа
σ_k	62 МПа
X(n)	1,81
$\Phi(n)$	0,4649
Расчетное значение вероятности разрушения $P = (0,5 - 0,4452) \cdot (0,5 - 0,4649) = 0,0548 \cdot 0,0351$	$2 \cdot 10^{-3}$
Допустимое значение вероятности	$1,0 - 0,9999 = 0,0001 (10^{-4})$

Условие безопасности не выполняется, т.к. расчетное значение вероятности разрушения равно $2 \cdot 10^{-3}$ превышает допустимое, равное 10^{-4} .

Для сравнения в таблице 7 приведены вероятности отказа элементов кранов стрелового типа.

Таблица 7

Вероятности отказа элементов кранов стрелового типа

Наименование	Событие	Вероятность
Тормоз	Отказ	$3,5 \cdot 10^{-5} - 3,3 \cdot 10^{-7}$
Канат	Обрыв проволок	$3,6 \cdot 10^{-4}$
	Износ	$3,8 \cdot 10^{-5}$
Блоки	Отказ	$2,7 \cdot 10^{-3} - 5,6 \cdot 10^{-4}$
Двигатель	Отказ	$1,28 \cdot 10^{-4} - 6,2 \cdot 10^{-7}$
Металлоконструкция	Повреждение	$2,5 \cdot 10^{-5}$
Пускорегулирующая аппаратура	Отказ	$9,5 \cdot 10^{-4}$
Ходовые колеса	Износ	$9,9 \cdot 10^{-6}$
Электропроводка	Отказ	$1,9 \cdot 10^{-4}$
Редуктор	Отказ	$8,7 \cdot 10^{-6}$

На заключительном этапе, основываясь на нормативно-технической документации, выполнена оценка уровня риска дальнейшей безопасной эксплуатации стрелового крана. Произведен расчет фонового значения риска аварий на грузоподъемные краны по статистическим данным за последние 27 лет:

- среднее количество кранов за период наблюдения — 254 250 ед.;
- среднее число аварий — 42,29;
- фоновая вероятность аварии — $42,29/254\ 250 = 0,000166 = 1,66 \cdot 10^{-4}$

Ущерб от аварий на опасных производственных объектах, где эксплуатируются грузоподъемные краны, включая прямые потери, затраты на локализацию и ликвидацию последствий аварий, экономический ущерб по статистическим данным из источников в открытой печати представлены в таблице 8.

Таблица 8

Экономический ущерб от аварий

Год	Экономический ущерб, руб.	Год	Экономический ущерб, руб.
2003	16 000 000	2014	50 000 000
2004	8 000 000	2015	78 000 000
2005	60 000 000	2021	150 000 000
2008	165 000 000	2022	73 778 191
2009	62 000 000	2023	70 648 042

В таблице 9 для сравнения приведены сведения о вероятности событий других типов оборудования, эксплуатируемого на опасных производственных объектах.

Таблица 9

Вероятности событий различных типов оборудования

Тип оборудования	Событие	Вероятность
Сосуды под давлением	Разгерметизация	$4,0 \cdot 10^{-5} - 6,2 \cdot 10^{-6}$
	Полное разрушение	$3,0 \cdot 10^{-7}$
Резервуары для горючих жидкостей	Полное разрушение	$5,0 \cdot 10^{-6}$
Резервуары со стационарной крышей	Пожар	$9,0 \cdot 10^{-5}$
Технологический трубопровод	Разрыв	$1,4 \cdot 10^{-6} - 6,4 \cdot 10^{-9}$
Цех металлургический	Пожар	$1,9 \cdot 10^{-5}$
Автомобильный транспорт (США)	Авария	$3 \cdot 10^{-4}$
Автомобильный транспорт (РФ)	Авария	$2,7 \cdot 10^{-4}$
Водный, воздушный транспорт (США)	Авария	$9 \cdot 10^{-6}$
Водный транспорт (РФ)	Авария	$2,2 \cdot 10^{-7}$
Воздушный транспорт (РФ)	Авария	$3,4 \cdot 10^{-7}$
Транспорт ж/д (США)	Авария	$4 \cdot 10^{-6}$
Транспорт ж/д (РФ)	Авария	$2 \cdot 10^{-8}$

Обсуждение и заключение. Полученные результаты на конкретном примере показали, что превышение группы классификации (режима) крана над паспортным значением и превышение назначенного ресурса крана в целом, включая ресурсоопределяющие конструктивные элементы, неизбежно приведет к возрастанию риска возникновения аварий с использованием стреловых кранов. Таким образом, установлено, что фактическая группа классификации (режима) крана определена как А6, что превышает паспортное значение А5.

Разработанная методика оценки фактической группы классификации (режима) стреловых кранов зарубежных компаний позволит значительно снизить вероятность разрушения конструкций стреловых кранов и уровень аварий в процессе экспертизы промышленной безопасности. В настоящее время уровень приемлемого риска в России принят на качественном уровне без конкретных численных значений вероятности аварий и величины ущерба. Численные значения вероятности аварий и размеры ущерба определяются на основе экономического и социального развития общества и могут варьироваться для отдельных отраслей промышленности. В связи с этим рекомендуется при расчетах использовать фоновую вероятность аварии грузоподъемного крана $1,66 \cdot 10^{-4}$, а среднее значение материального ущерба 73,2 млн. руб.

Список литературы / References

1. Tong Yang, Ning Sun, He Chen, Yongchun Fang. Motion Trajectory-Based Transportation Control for 3-D Boom Cranes: Analysis, Design, and Experiments. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019;66(5):3636–3646. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2853604>
2. Xing Pan, Zekun Wu Performance Shaping Factors in the Human Error Probability Modification of Human Reliability Analysis. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2020;26(3):538–550. <https://doi.org/10.1080/10803548.2018.1498655>
3. Xing Pan, Ye Lin, Congjiao He. A Review of Cognitive Models in Human Reliability Analysis. *Quality and Reliability Engineering International*. 2017;33(7):1299–1316. <https://doi.org/10.1002/qre.2111>
4. Che Haiyang, Zeng Shengkui, Guo Jianbin. Reliability Assessment of Man-Machine Systems Subject to Mutually Dependent Machine Degradation and Human Errors. *Reliability Engineering & System Safety*. 2019;190(3):106504. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106504>
5. Егельский В.В., Николаев Н.Н., Егельская Е.В., Короткий А.А. Влияние компетенций специалистов грузоподъемных кранов на вероятность возникновения аварийных ситуаций. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;(2):70–79. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-70-79>
- Egelsky VV, Nikolaev NN, Egelskaya EV, Korotkiy AA. Influence of the Competencies of Lifting Crane Specialists on the Probability of Emergencies. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;(2):70–79. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-70-79>

6. Егельская Е.В., Романенко М.Ю. Аспекты применения риск-ориентированного подхода на опасных производственных объектах. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2020;(4):45–49. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-4-45-49>

Egelskaya EV, Romanenko MYu. Aspects of Application of a Risk-Based Approach to Hazardous Production Facilities. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2020;(4):45–49. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-4-45-49>

7. Панфилов А.В., Дерюшев В.В., Короткий А.А. Рекомендательные системы безопасности для риск-ориентированного подхода. *Безопасность труда в промышленности*. 2020;(5):48–55. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-5-48-55>

Panfilov AV, Deryushev VV, Korotkiy AA. Recommended Safety Systems for Risk-Oriented Approach. *Occupational Safety in Industry*. 2020;(5):48–55. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-5-48-55>

8. Pullin R, Holford KM, Lark RJ, Eaton MJ. Acoustic Emission Monitoring of Bridge Structures in the Field and Laboratory. *Journal of Acoustic Emission*. 2008;26:172–181. URL: <https://www.ndt.net/article/ewgae2008/papers/136.pdf> (accessed: 15.05.2024).

9. Anastasopoulos AA, Kourousis DA, Cole PT. Acoustic Emission Inspection of Spherical Metallic Pressure Vessels. In: *The 2nd International Conference on Technical Inspection and NDT*. Tehran, Iran: 2008. URL: <http://www.ndt.net/article/tindt2008/papers/177.pdf> (accessed: 15.05.2024).

10. Gongtian Shen, Zhanwen Wu. Investigation on Acoustic Emission Source of Bridge Crane. *Insight - NonDestructive Testing and Condition Monitoring*. 2010;52(3):144–148. <https://doi.org/10.1784/insi.2010.52.3.144>

11. Aljets D, Chong A, Wilcox S, Holford K. Acoustic Emission Source Location in Plate-Like Structures Using a Closely Arranged Triangular Sensor Array. In: *Proceedings of the 29th European Conference on Acoustic Emission Testing EWGAE*. Vienna, Austria; 2010. P. 85–98.

12. Rong Chen, Xiao Yang Li, Lin Lin Zhang, Xiang Yu Wang. Numerical Simulation of Spherical Indentation Method to Identify Metal Material Properties. *Advanced Materials Research*. 2015;(1119):779–782. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1119.779>

13. Syngellakis S, Habbab H, Mellor BG. Finite Element Simulation of Spherical Indentation Experiments. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2018;6(4):749–763. <http://doi.org/10.2495/CMEM-V6-N4-749-763>

14. Андрианов Е.Н., Иванов А.Н. Актуальные вопросы конструирования и расчета механизмов изменения вылета стрелы порталных кранов. *Журнал университета водных коммуникаций*. 2012;(2):81–92.

Andrianov EN, Ivanov AN. Topical Problems of Construction and Design of the Gantry Crane Boom Outreach Control Mechanisms. *Zhurnal Universiteta Vodnykh Kommunikatsii*. 2012;(2):81–92. (In Russ.)

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

Об авторах:

Дмитрий Николаевич Симонов, главный конструктор ООО ИКЦ «Мысль» НГТУ (346428, Российская Федерация, г. Новочеркасск, ул. Троицкая,88)

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

Эльвира Анатольевна Панфилова, кандидат философских наук, доцент кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), korotkaya_elvira@mail.ru

Леонид Александрович Терновской, аспирант кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#)

Заявленный вклад авторов:

Д.Н. Симонов: разработка концепции, научное руководство, разработка методологии.

Р.В. Хван: административное руководство исследовательским проектом, проведение исследования, написание рукописи — рецензирование и редактирование.

Э.А. Панфилова: визуализация, формальный анализ, валидация результатов.

Л.А. Терновской: курирование данных, написание черновика рукописи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Dmitry N. Simonov, Chief Designer, “Mysl” Engineering and Consulting Center OOO NGTU (88, Troitskaya St., Novocherkassk, 346428, Russian Federation)

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

Elvira A. Panfilova, Cand. Sci. (Philosophy), Associate Professor of the Department of Transport Systems and Logistics, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), korotkaya_elvira@mail.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](#)

Claimed Contributorship:

DN Simonov: concept development, academic advising, methodology development.

RV Khvan: administrative management of a research project, conducting research, writing a manuscript – reviewing and editing.

EA Panfilova: visualization, formal analysis, validation of the results.

LA Ternovskoi: data curation, writing a draft manuscript.

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

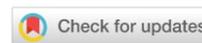
All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 10.03.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 07.04.2025

Принята к публикации / Accepted 16.04.2025

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



УДК 621.793.5

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-170-178>

Влияние предварительной цементации на структуру и свойства диффузионных покрытий на основе хрома на сталях, полученных в среде легкоплавких жидкометаллических растворов



EDN: WDDMOV

Л.И. Свистун , Э.Э. Бобылёв ✉, А.Д. Ниров ,И.Д. Стороженко , Р.А. Попов

Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Российская Федерация

✉ ebobylev@mail.ru

Аннотация

Введение. Диффузионная металлизация из среды легкоплавких жидкометаллических растворов (ДМЛЖР) позволяет формировать покрытия для изделий из металла. При этом под слоем карбидного покрытия сокращается содержание углерода в сплаве, что негативно сказывается на работе изделий в условиях контактных напряжений. Для нейтрализации обезуглероживания, а также получения глубоких упрочненных слоев предложена комплексная химико-термическая обработка (КХТО) — это предварительная цементация и последующая ДМЛЖР хромом. Важно сопоставить особенности покрытий на металлических образцах, прошедших и не прошедших цементацию. Результаты таких исследований ранее не публиковались. Цель работы — анализ влияния предварительной цементации на хромовые диффузионные покрытия и структуру покрываемого образца.

Материалы и методы. Покрытия получены путем погружения образцов из сталей Ст3 и 40Х в реакционно-транспортную среду PbLi с добавлением хрома. Часть образцов предварительно прошла вакуумную цементацию. На универсальном микроскопе NU-2E Carl Zeiss Jena («Карл Цейс Джина» (англ.)) определялись толщина покрытия и структура образца. Микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) проводился на электронном микроскопе Tescan Lyra 3 («Тискан Лира 3» (англ.)) с системой PCMA Oxford Ultim MAX («Пи-си-эм-эй Оксфорд Ультим МАКС» (англ.)). Микротвердость определял микротвердомер Dura Scan Falcon 500 («Дюра Скан Фалькон 500» (англ.)). Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Advance Eco («Брюкер Ди-8 Эдванс Эко» (англ.)).

Результаты исследования. Без цементации на образце из стали Ст3 сформировалось покрытие толщиной 12 мкм, с цементацией — 22 мкм. Разница — в 1,83 раза. Глубина диффузии хрома в образце без цементации составила 18 мкм, в образце с предварительной цементацией — 34 мкм. Цементация обеспечила значительное увеличение глубины упрочненного слоя. Без предварительной обработки после ДМЛЖР фиксировались показатели микротвердости покрытия: 1400 HV_{0,02} для Ст3 и 1650 HV_{0,02} для 40Х. После КХТО: 1500 HV_{0,02} для Ст3 и 1800 HV_{0,02} для 40Х. Однако на глубине 10 мкм микротвердость (160 HV_{0,02}) оказалась ниже показателя покрываемого материала для обоих образцов. После КХТО исчезают зоны с пониженной микротвердостью, глубина упрочненного слоя — 1,5 мм для Ст3 и 2 мм для 40Х.

Обсуждение и заключение. Предварительная цементация позволяет избежать формирования разупрочненного подслоя между покрытием и покрываемым материалом, что важно для эксплуатации изделий при контактных напряжениях. Следовательно, детали из конструкционных сталей с хромовым покрытием после цементации можно использовать в условиях абразивно-коррозионного воздействия и высоких механических нагрузок. Примеры такой эксплуатации — компрессорная техника и нефтегазовое оборудование.

Ключевые слова: химико-термические методы упрочнения, диффузионная металлизация, предварительная цементация, диффузионное легирование хромом, обезуглероженный ферритный подслоя

Благодарности. За помощь в получении результатов авторы благодарят сотрудников кафедры «Материаловедение и композиционные материалы» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» и лично доцента, кандидата технических наук А.И. Богданова.

Для цитирования. Свистун Л.И., Бобылёв Э.Э., Ниров А.Д., Стороженко И.Д., Попов Р.А. Влияние предварительной цементации на структуру и свойства диффузионных покрытий на основе хрома на сталях, полученных в среде легкоплавких жидкометаллических растворов. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(2):170–178. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-170-178>

Original Empirical Research

Influence of Pre-Carburization on the Structure and Properties of Chromium Coatings on Steels Formed by Diffusion Alloying in Liquid Metal Media Solutions

Lev I. Svistun , Eduard E. Bobylev  , Aslan D. Nirov , Ivan D. Storozhenko , Roman A. Popov

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

 ebobylev@mail.ru

Abstract

Introduction. Diffusion alloying from the medium of low-melting liquid metal solutions (DALMMS) allows us to form coatings for metal products. At the same time, the carbon content in the alloy is reduced under the carbide coating layer, which negatively affects the operation of products under contact stresses. To neutralize decarburization, as well as to obtain deep hardened layers, a complex chemical-thermal treatment (CCTT) is proposed. It means pre-carburization and subsequent DALMMS with chromium. It is important to compare the characteristics of coatings on metal samples that have undergone and have not undergone carburization. The results of such studies have not been published before. The aim of the work is to analyze the effect of pre-carburization on chromium-based diffusion coatings and the structure of the coated sample.

Materials and Methods. The coatings were obtained by immersing St3 and 40X steel samples in a PbLi reaction transport medium with the addition of chromium. Some of the samples were previously subjected to vacuum carburization. The coating thickness and structure of the coated sample were determined using a universal microscope NU-2E (Carl Zeiss Jena). Electron microprobe analysis was performed on a Tescan Lyra 3 electron microscope with the Oxford Ultim MAX PCMA system. Microhardness was determined by the Dura Scan Falcon 500 microhardness tester. X-ray phase analysis (XPA) was performed on a Bruker D8 Advance Eco X-ray diffractometer.

Results. Without carburization, a coating with a thickness of 12 μm was formed on the St3 steel sample, while with carburization it was 22 μm . The difference was 1.83 times. The chromium diffusion depth in the sample without carburization was 18 μm . In the sample with pre-carburization it was 34 μm . Carburization provided a significant increase in the depth of the hardened layer. Without pre-treatment, the microhardness values of the coating were recorded after DALMMS: 1400 HV0.02 for St3 and 1650 HV0.02 for 40X. After CCTT: 1500 HV0.02 for St3 and 1800 HV0.0 for 40X. However, at a depth of 10 μm , the microhardness (160 HV0.02) was lower than that of the coated material for both samples. After CCTT, the areas with reduced microhardness disappeared, and the depth of the hardened layer was 1.5 mm for St3 and 2 mm for 40X.

Discussion and Conclusion. Pre-carburization helps to avoid the formation of a softened sublayer between the coating and the coated material, which is important for the performance of products under contact stresses. Consequently, chrome-coated structural steel parts can be used after carburization in conditions of abrasive corrosion and high mechanical loads. Examples of these applications include compressor equipment and oil and gas equipment.

Keywords: chemical-thermal strengthening methods, diffusion metallization, pre-carburization, diffusion alloying with chromium, decarburized ferrite sublayer

Acknowledgements. The authors would like to express their gratitude to the team of the Department of Materials Science and Composite Materials, Volgograd State Technical University, in particular to Bogdanov A.I., Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor, for their assistance in obtaining the results.

For citation. Svistun LI, Bobylev EE, Nirov AD, Storozhenko ID, Popov RA. Influence of Pre-Carburization on the Structure and Properties of Chromium Coatings on Steels Formed by Diffusion Alloying in Liquid Metal Media Solutions. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(2):170–178. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-170-178>

Введение. В современном машиностроении широко используется поверхностное упрочнение деталей [1]. Известные технологии позволяют получать изделия с различными свойствами и структурой [2] за счет изменения свойств и структуры поверхностного слоя [3]. Отдельного внимания заслуживают химико-термические методы упрочнения. Они отличаются простотой [4], обеспечивают высокое качество упрочненной поверхности [5], а также плавное изменение структуры и свойств от покрытия к покрываемому материалу [6]. Технология диффузионной металлизации из среды легкоплавких жидкометаллических растворов (ДМЛЖР) относится к технологиям химико-термической обработки (ХТО) и перспективна с точки зрения получения функциональных покрытий [6]. При помощи данной технологии формируются покрытия на основе Cr, Ti, W, Mo, Ni, Cu и т. д. на поверхности изделий, изготовленных из сталей [6], твердых сплавов [7], чугунов [8].

Хром входит в число элементов, часто используемых как основа функциональных покрытий [9]. Они увеличивают износостойкость деталей [10] и сопротивляемость коррозии в агрессивных средах [11]. Хромовые покрытия способны также повысить устойчивость к одновременному комплексному воздействию механического и коррозионного износа [12]. Высокая стойкость к износу и коррозии обусловлена тем, что покрытия создаются на основе карбидов [13]. К тому же при формировании карбидов наблюдается диффузия углерода из покрываемого материала. Как следствие, под покрытием сокращается содержание углерода в сплаве, появляются обезуглероженные зоны, и из-за этого в процессе эксплуатации карбидный слой продавливается на покрытую деталь [14]. Для устранения эффекта обезуглероживания и дополнительного упрочнения покрываемого материала можно применить комплексную химико-термическую обработку (КХТО). Речь идет о предварительной цементации и диффузионном легировании образцов хромом в среде легкоплавких жидкометаллических растворов [15].

Цель работы — анализ влияния предварительной цементации на формирование диффузионных покрытий на основе хрома и структуру покрываемого образца.

Материалы и методы. КХТО и ДМЛЖР проводились на образцах цилиндрической формы диаметром 20 мм, длиной 30 мм. Образцы изготовлены из стали Ст3 и 40Х (таблица 1).

Таблица 1

Химический состав исследуемых материалов

Марка стали	Содержание элемента, вес. %							
	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
Ст3	0,140–0,220	0,150–0,300	0,400–0,650	до 0,300	до 0,050	до 0,040	до 0,300	до 0,300
40Х	0,360–0,440	0,170–0,370	0,500–0,800	до 0,300	до 0,035	до 0,035	0,800–1,100	до 0,300

Хромовые покрытия получили в результате диффузионного легирования образцов в среде легкоплавких жидкометаллических растворов. С этой целью задействовали установку для ДМЛЖР [16]. Реакционно-транспортная среда — эвтектический расплав PbLi. В него ввели 10 % порошка хрома. Покрытие наносили путем погружения и последующей изотермической выдержки образцов в расплаве при температуре 1050 °С в течение 8 часов. Пространство над расплавом было заполнено аргоном. Во время изотермической выдержки хром в жидкой фазе диффундирует к покрываемому образцу и адсорбируется на поверхности. Процесс включает также твердофазную диффузию с формированием твердых растворов и химических соединений.

До начала ДМЛЖР с целью насыщения поверхностных слоев сталей углеродом проводилась вакуумная цементация в пропан-бутановой смеси при температуре 950 °С в течение 8 часов.

Структура покрываемого материала и толщина покрытия исследовались с помощью универсального оптического микроскопа NU-2E (Carl Zeiss Jena). Микротвердость образцов после ДМЛЖР и КХТО исследовали на микротвердомере Dura Scan Falcon 500. Микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) проводился на сканирующем электронном микроскопе Tescan Lyra 3 с системой РСМА Oxford Ultim MAX. Для рентгенофазового анализа (РФА) задействовали рентгеновский дифрактометр Bruker D8 Advance Eco (Bruker AXS GmbH) с вертикальным θ - θ гониометром. Образцы травили в 4-процентном спиртовом растворе HNO₃.

Результаты исследования. На рис. 1 представлены микрофотографии образцов из стали Ст3 после ДМЛЖР и КХТО.

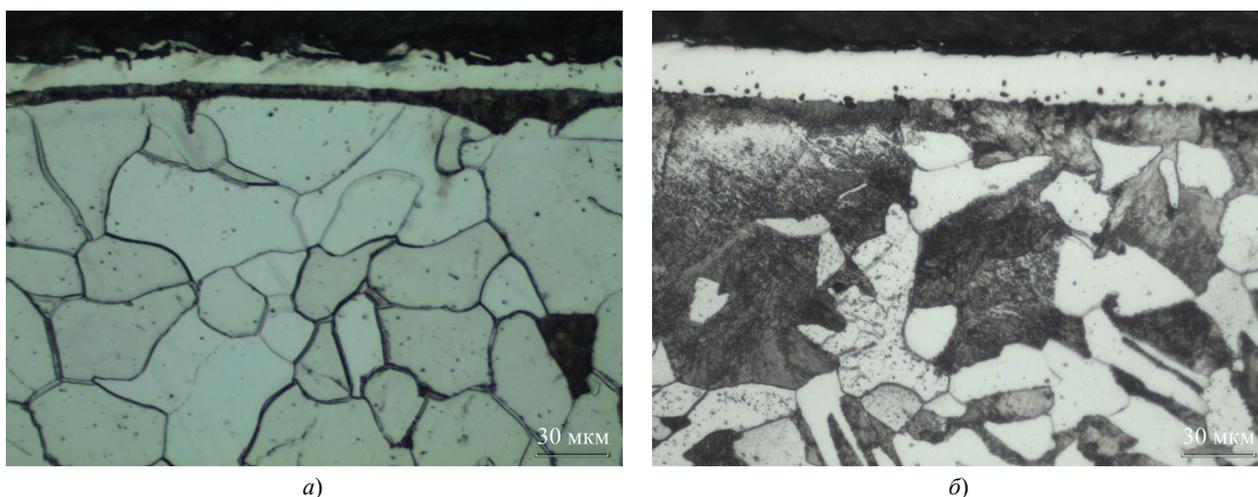


Рис. 1. Поверхностные слои стали Ст3 после 8-часовой ДМЛЖР при 1 050 °С:
a — без предварительной цементации; *б* — с предварительной цементацией

Итак, предварительная цементация влияет и на структуру стали после ДМЛЖР, и на структуру покрытия. Без предварительной цементации углерод диффундирует в зону под покрытием, образуя там перлитный слой и обезуглероженный ферритный слой, в котором нет перлитных зерен. Если же предварительная цементация проводилась, меняется структура покрываемого материала. В ней после КХТО не будет обезуглероженного ферритного подслоя даже при насыщении низкоуглеродистой стали Ст3. Структура материала представляет собой перлит с включениями феррита (рис. 1 б).

Можно выделить несколько зон, формирующих поверхностные слои материала после КХТО:

- непосредственно покрытие;
- переходная зона между покрытием и покрываемым материалом;
- зона цементации;
- переходная зона цементация — основа.

На рис. 2 представлена структура образца из стали 40Х после КХТО.



Рис. 2. Структура образца после КХТО

При ДМЛЖР без предварительной цементации под покрытием формируется зона пластинчатого перлита, легированного хромом, а за ней — мягкая ферритная прослойка. В предварительно обработанных образцах отсутствовала обезуглероженная прослойка. Без цементации на образце из стали Ст3 сформировалось покрытие толщиной 12 мкм, с цементацией — 22 мкм. Таким образом, предварительная цементация способствует увеличению толщины покрытия в 1,83 раза. У этого результата есть физическое объяснение. Предварительная цементация повышает интенсивность диффузии углерода из образца к адсорбированному хрому. Фиксируется гетеродиффузия углерода под воздействием высоких температур, характерных для ДМЛЖР. Это способствует выравниванию содержания углерода и ликвидации обезуглероженных зон, которые могут возникнуть в результате образования карбидов. На рис. 3 представлены микрофотографии стали 40Х после ДМЛЖР и КХТО. На образце после КХТО структура перлита тоньше, обезуглероженная зона отсутствует.

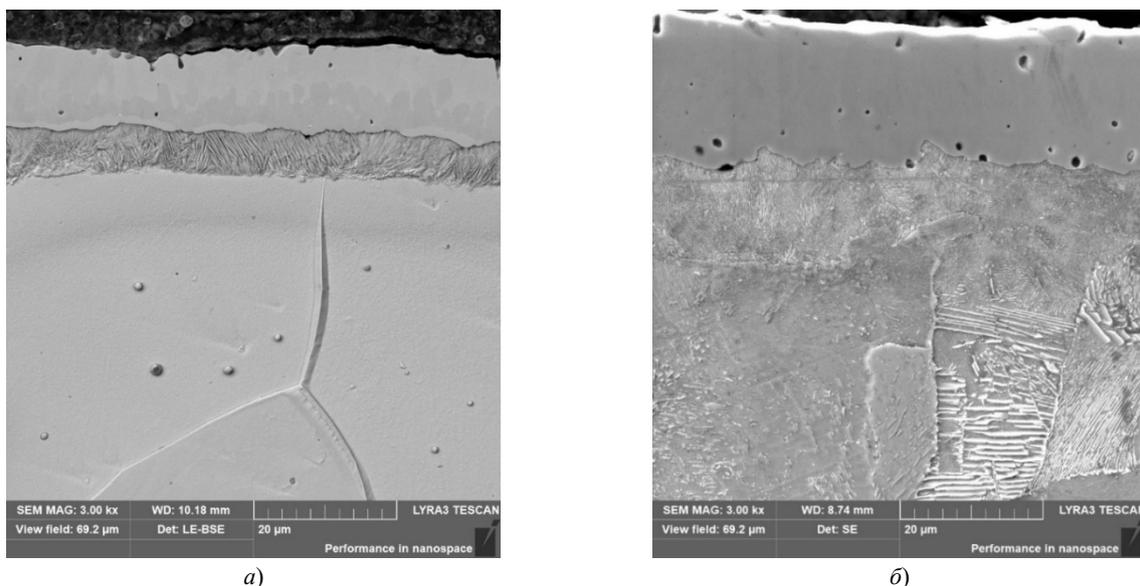


Рис. 3. Структура поверхностного слоя стали 40X после 8-часовой ДМЛЖР при 1 050 °С: *а* — ДМЛЖР; *б* — КХТО

Цементация не оказывает значительного влияния на химический и фазовый состав. В обоих случаях фиксировалось содержание хрома на поверхности 90 % (масс.). Однако глубина диффузии хрома в образце без цементации составила 18 мкм, в образце с предварительной цементацией — 34 мкм, то есть вдвое больше. Результаты МРСА образцов представлены на рис. 4.

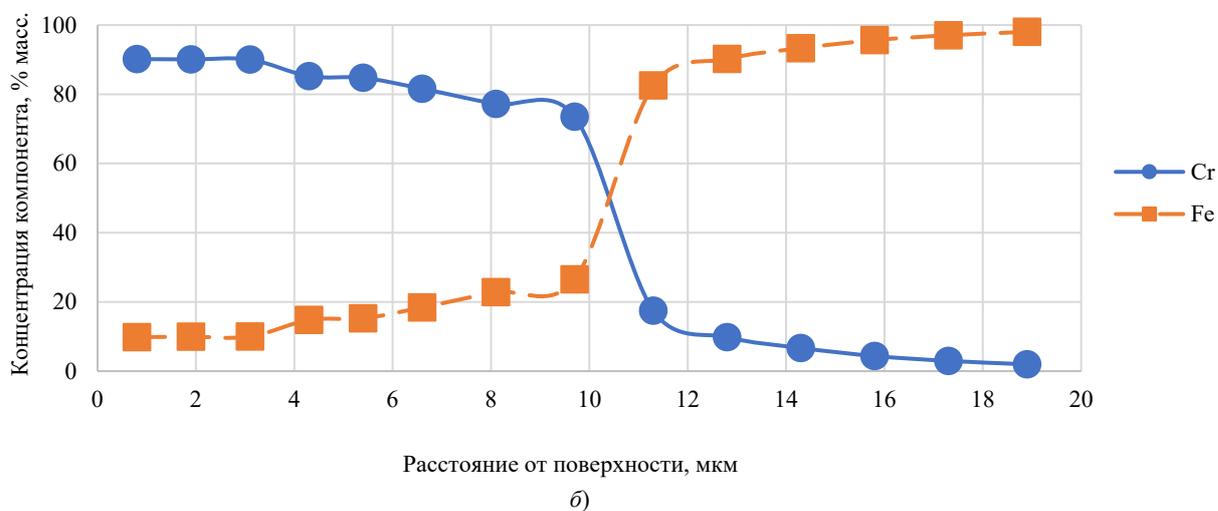
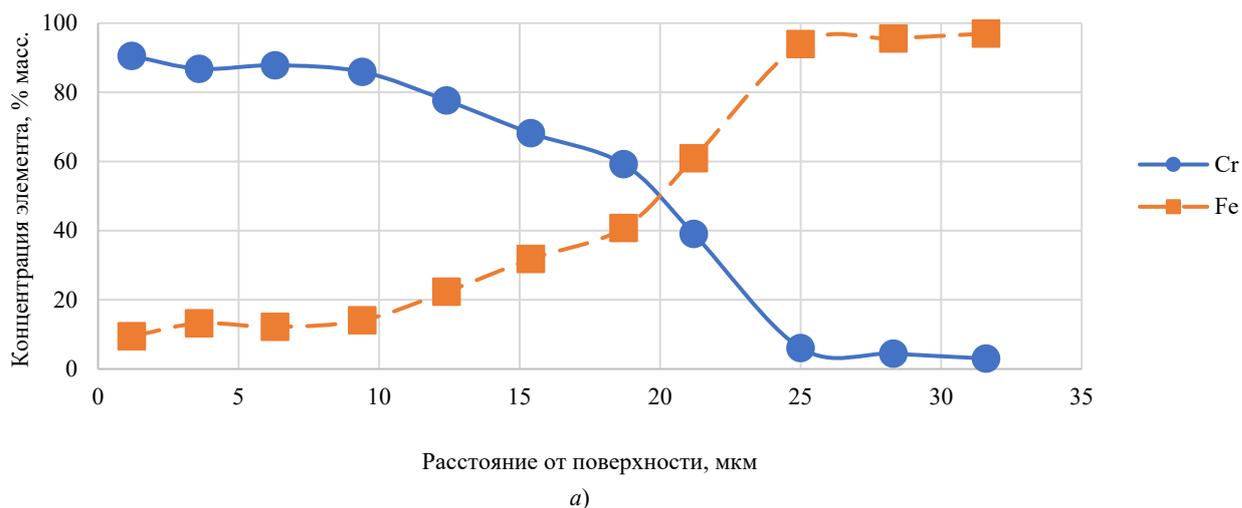


Рис. 4. Результаты МРСА покрытий после 8-часовой ДМЛЖР при 1 050 °С: *а* — без предварительной цементации; *б* — с предварительной цементацией

Фазовый состав покрытий был представлен карбидами хрома $M_{23}C_6$ и M_7C_3 . В образце без предварительной цементации наблюдалось незначительное содержание железа в карбиде хрома $M_{23}C_6$ (рис. 5).

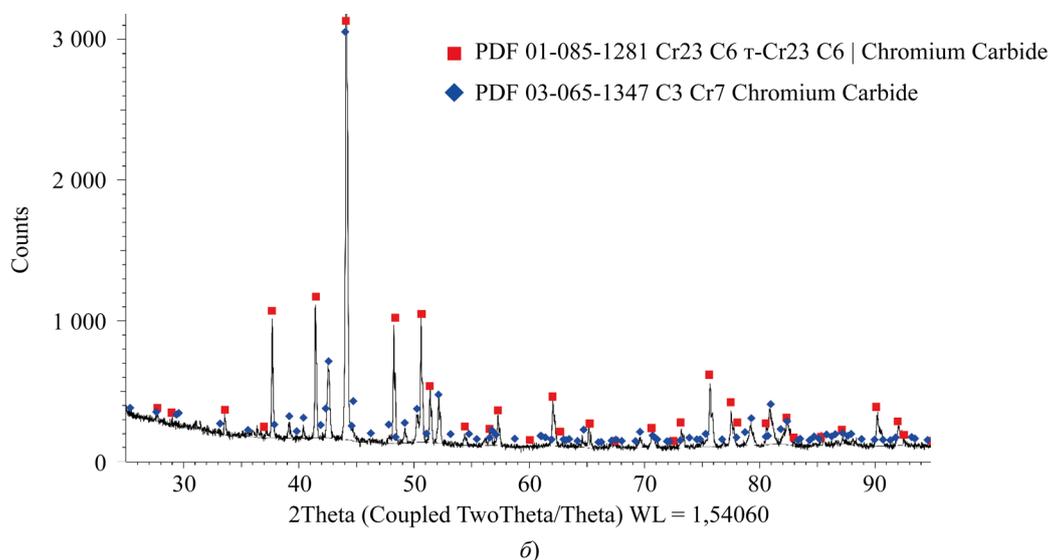
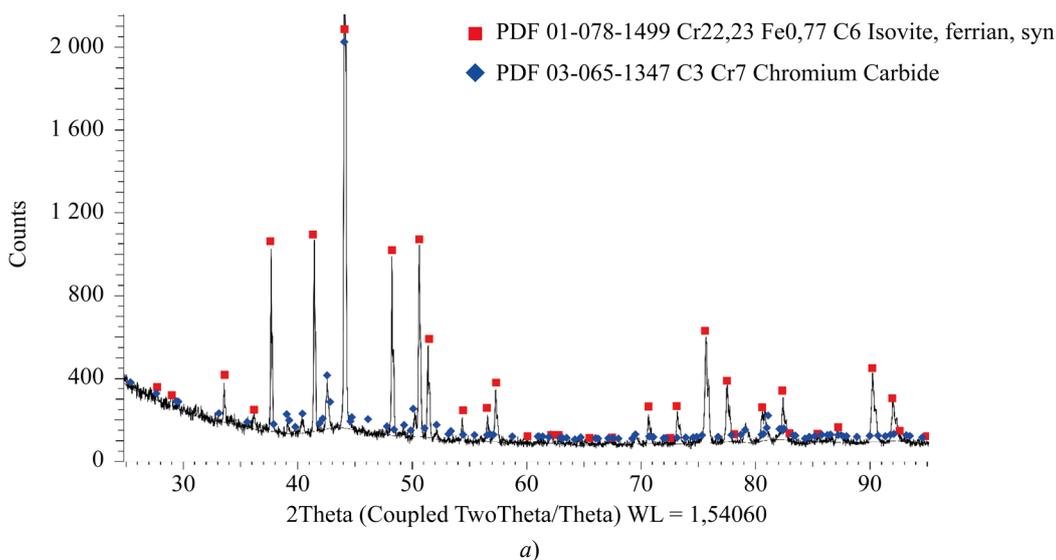


Рис. 5. Результаты РФА покрытий после 8-часовой ДМЛЖР при 1 050 °С:
а — без предварительной цементации; б — с предварительной цементацией

Предварительная цементация обеспечила значительное увеличение глубины упрочненного слоя (рис. 6).

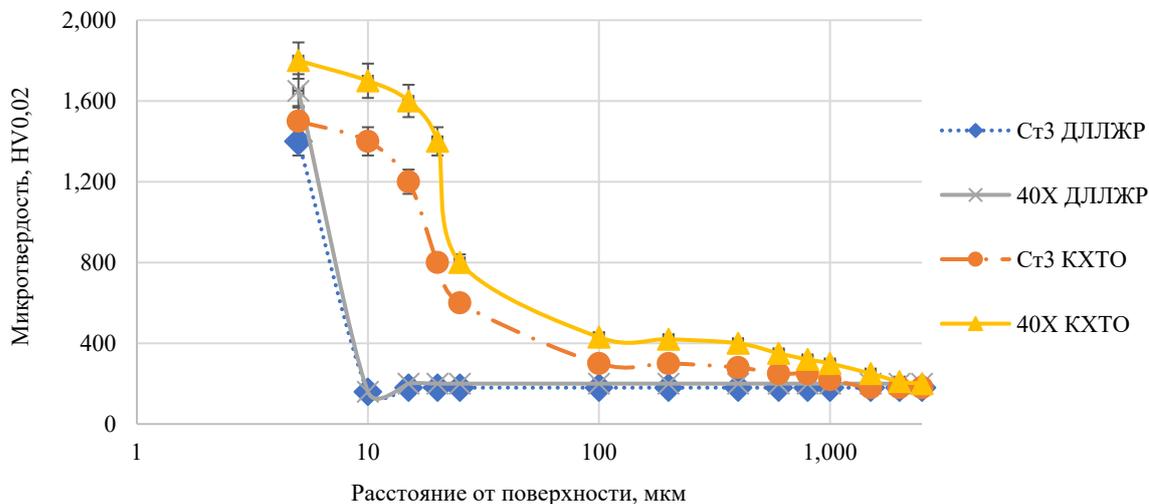


Рис. 6. Распределение микротвердости в образцах после 8-часовой ДМЛЖР при 1 050 °С

Согласно рис. 6, на образцах без предварительной цементации показатель микротвердости покрытия после ДМЛЖР для стали Ст3 — 1400 HV_{0,02}, 40X — 1650 HV_{0,02}. После КХТО микротвердость покрытия стали Ст3 — 1500 HV_{0,02}, 40X — 1800 HV_{0,02}. Однако на глубине 10 мкм микротвердость составляла 160 HV_{0,02}. Это ниже микротвердости покрываемого материала в обоих случаях (то есть для образцов из Ст3 и 40X). После КХТО распределение микротвердости имеет иной характер:

- отсутствуют зоны с пониженной микротвердостью;
- глубина упрочненного слоя составляет 1,5 мм для стали Ст3 и 2 мм для стали 40X.

Обсуждение и заключение. Итак, в рассмотренных условиях основное влияние цементации проявляется в интенсификации роста покрытия и исключения образования мягкой ферритной прослойки между покрытием и покрываемым материалом. От цементации не зависит состав покрытия и содержание хрома. Покрытия в любом случае состоят из карбидов хрома типа M₂₃C₆ и M₇C₃, содержание хрома на поверхности достигает 90 %.

КХТО влияет на структуру слоя между покрытием и основным материалом. При ДМЛЖР слой под покрытием имеет перлитную структуру, переходящую в ферритную и далее — в структуру покрываемого материала. Предварительная цементация делает более равномерной переходную зону. Здесь формируется перлитная структура с плавным изменением концентрации хрома — от 10 % на границе покрытия и перлитной зоны до 0,3 % на глубине 35 мкм.

Таким образом, доказаны положительные результаты предварительной цементации. Во-первых, увеличивается содержание углерода в поверхностных слоях изделия, и это позволяет интенсифицировать карбидообразование.

Во-вторых, появляется возможность получить насыщенный углеродом слой между покрытием и основным материалом, что также упрочняет структуру покрываемого материала. Значит, можно утверждать, что предварительная цементация перспективна в плане расширения сферы применения деталей с диффузионными покрытиями на основе карбида хрома. Она исключает продавливание слоя под покрытием и последующее его разрушение. Детали после КХТО способны работать при высоких контактных напряжениях без скалывания функционального слоя.

В-третьих, ускоряется формирование диффузионного покрытия. К тому же оно будет большего размера. В рамках данного исследования зафиксировали показатель 1,83. Во столько толще было покрытие, полученное после цементации (сравнение с технологией без предварительной цементации). Это свидетельствует о значительной роли углерода в механизме создания покрытия.

Список литературы/ References

1. Xiang Hou, Hao Wang, Qun Yang, Yanxia Chen, Linjiang Chai, Bo Song, et al. Microstructure and Properties of Cr-AlN Composite Coating Prepared by Pack-Cementation on the Surface of Al-Containing ODS Steel. *Surface and Coatings Technology*. 2022;447:128842. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128842>
2. Vikrant Singh, Anil Kumar Singla, Anuj Bansal. Impact of HVOF Sprayed Vanadium Carbide (VC) Based Novel Coatings on Slurry Erosion Behavior of Hydro-Machinery SS316 Steel. *Tribology International*. 2022;176:107874. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107874>
3. Jing Liang, Ye Liu, Sheng Yang, Xiuyuan Yin, Suiyuan Chen, Changsheng Liu. Microstructure and Wear Resistance of Laser Cladding Ti-Al-Ni-Si Composite Coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2022;445:128727. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128727>
4. Чжэн Ц., Гурьев М.А., Иванов С.Г., Мей Ш., Гурьев А.М. Влияние диффузионного покрытия бор–хром–лантан на жаростойкость и износостойкость стали 4X5MФ1С. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(3):22–29. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-22-29](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-22-29)
- Zheng Q, Guryev MA, Ivanov SG, Mei S, Guryev AM. Effect of Boron – Chromium – Lanthanum Diffusion Coating on the Heat Resistance and Wear Resistance of 4Kh5MF1S Steel. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;3(49):22–29. (In Russ.) [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-22-29](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-22-29)
5. Yusuf Kayali, Afra Kenar. Effect of Diffusion Annealing on Wear and Cohesion Behaviours of Boronized AISI 1040 Steel. *Tribology International*. 2023;184:108428. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108428>
6. Пряхин Е.И., Михайлов А.В., Сивенков А.В. Технологические особенности поверхностного легирования металлических изделий Cr-Ni комплексами в среде расплавов легкоплавких металлов. *Черные металлы*. 2023;2:58–66. URL: <https://rudmet.ru/journal/2191/article/36387> (дата обращения: 27.11.2024).
- Pryakhin EI, Mikhailov AV, Sivenkov AV. Technological Features of Surface Alloying of Metal Products with Cr – Ni complexes in the medium of Low-Melting Metal Melts. *Ferrous Metals* 2023;2:58–66. (In Russ.) URL: <https://rudmet.ru/journal/2191/article/36387> (accessed: 27.11.2024).
7. Соколов А.Г., Мансиа С. *Способ обработки инструмента из стали или твердосплавного инструмента*. Патент РФ № 2451108. 2012. 5 с.
- Sokolov AG, Mansia S. *A Method of Machining a Steel or Carbide Tool*. RF Patent, No. 2451108. 2012. 5 p. (In Russ.)
8. Соколов А.Г. Крайнев Н.А. *Способ обработки чугуновых изделий*. Патент РФ № 2439171. 2012. 6 с.
- Sokolov AG, Krainev NA. *Method of Machining of Cast Iron Products*. RF Patent, No. 2451108. 2012. 5 p. (In Russ.)

9. Fedrizzi L, Rossi S, Bellei F, Deflorian F. Wear-Corrosion Mechanism of Hard Chromium Coatings. *Wear*. 2002;253(11/12):1173–1181. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00254-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00254-5)
10. Maskavizan AJ, Quintana JP, Dalibón EL, Márquez AB, Brühl SP, Farina SB. Evaluation of Wear and Corrosion Resistance in Acidic and Chloride Solutions of Cathodic Arc PVD Chromium Nitride Coatings on Untreated and Plasma Nitrided AISI 4140 Steel. *Surface and Coatings Technology*. 2024;494(3):131476. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131476>
11. Castillejo FE, Marulanda DM, Olaya JJ, Alfonso JE. Wear and Corrosion Resistance of Niobium–Chromium Carbide Coatings on AISI D2 Produced through TRD. *Surface and Coatings Technology*. 2014;254:104–111. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.05.069>
12. Mohammad Reza Najari, Seyed Abdolkarim Sajjadi, Omid Ganji. Microstructural Evolution and Wear Properties of Chromium Carbide Coating Formed by Thermo-Reactive Diffusion (TRD) Process on a Cold-Work Tool Steel. *Results in Surfaces and Interfaces*. 2022;8:100059. <https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2022.100059>
13. Beck K, Ulrich AS, Thor N, Oskay C, Galetz MC. Chromium Diffusion Coatings for Improving the Oxidation Behavior of Refractory Metals at Intermediate Temperatures. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2024;121:106626. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2024.106626>
14. Соколов А.Г., Артемьев В.П., Шашерина С.А. Влияние углерода стали и природы элементов покрытия на процесс и механизм формирования диффузионных покрытий из среды легкоплавких жидкометаллических растворов. *Технология металлов*. 2009;11:40–44.
Sokolov AG, Artem'ev VP, Shasherina SA. Influence of Steel Carbon and Nature of the Coating Elements on Process and Formation Mechanism of Diffusive Coatings from Fusible Liquid Metal Solutions. *Technology of Metals*. 2009; 11: 40–44. (In Russ.)
15. Соколов А.Г., Артемьев В.П. *Способ повышения износостойкости стальных изделий*. Патент РФ № 2293792. 2007. 4 с.
Sokolov AG, Artem'ev VP. *Steel Article Wear Resistance Increasing Method*. RF Patent, No. 2293792. 2007. 4p. (In Russ.)
16. Соколов А.Г., Бобылёв Э.Э., Стороженко И.Д., Попов Р.А. *Устройство для диффузионной металлизации в среде легкоплавких жидкометаллических растворов*. Патент РФ № 2767108. 2022. 9 с.
Sokolov AG, Bobylev EE, Storozhenko ID, Popov RA. *Device for Diffusion Metallization in Medium of Low-Melting Liquid Metal Solutions*. RF Patent, No. 2767108. 2022. 9p. (In Russ.)

Об авторах:

Лев Иванович Свистун, доктор технических наук, профессор кафедры инженерии систем управления, материалов и технологий в машиностроении Кубанского государственного технологического университета (350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2), [SPIN-код](#), [ORCID](#), saas25@mail.ru

Эдуард Эдуардович Бобылёв, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерии систем управления, материалов и технологий в машиностроении Кубанского государственного технологического университета (350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2) [SPIN-код](#), [ORCID](#), [Scopus](#), ebobylev@mail.ru

Аслан Дантесович Ниров, кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных процессов и технологических комплексов Кубанского государственного технологического университета (350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2) [SPIN-код](#), [ORCID](#), nirovaslan@list.ru

Иван Дмитриевич Стороженко, старший преподаватель кафедры машиностроения Армавирского механико-технологического института (филиала) Кубанского государственного технологического университета (350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2) [SPIN-код](#), [ORCID](#), storojenko_armv@mail.ru

Роман Андреевич Попов, аспирант кафедры инженерии систем управления, материалов и технологий в машиностроении Кубанского государственного технологического университета (350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2), [SPIN-код](#)

Заявленный вклад авторов:

Л.И. Свистун: разработка концепции.

Э.Э. Бобылёв: рецензирование и редактирование рукописи.

А.Д. Ниров: написание черновика рукописи.

И.Д. Стороженко: проведение исследования.

Р.А. Попов: проведение исследования.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочли и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Lev I. Svistun, Dr.Sci (Eng.), Professor of the Department of Engineering of Control Systems, Materials and Technologies in Mechanical Engineering, Kuban State Technological University (2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), saas25@mail.ru

Eduard E. Bobylyov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Engineering of Control Systems, Materials and Technologies in Mechanical Engineering, Kuban State Technological University (2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [Scopus](#), ebobylev@mail.ru

Aslan D. Nirov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Transport Processes and Technological Complexes, Kuban State Technological University (2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russian Federation) [SPIN-code](#), [ORCID](#), nirovaslan@list.ru

Ivan D. Storozhenko, Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering, Armavir Institute of Mechanics and Technology, Kuban State Technological University (2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), storojenko_armv@mail.ru

Roman A. Popov, Postgraduate Student of the Department of Engineering of Control Systems, Materials and Technologies in Mechanical Engineering, Kuban State Technological University (350072, Russian Federation, Krasnodar Territory, Krasnodar, Moskovskaya str., 2), [SPIN-code](#)

Claimed contributorship:

LI Svistun: concept development.

EE Bobylyov: reviewing and editing the manuscript.

AD Nirov: writing a draft of the manuscript.

ID Storozhenko: conducting research.

RA Popov: conducting research.

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

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 10.02.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 05.03.2025

Принята к публикации / Accepted 15.03.2025