

ТОМ 9, №4, 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)

Регистрация:

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

*Индексация
и архивация:*

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

Сайт:

<https://bps-journal.ru>

Адрес редакции:

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

E-mail:

vestnik@donstu.ru

Телефон:

+7 (863) 2–738–372

Дата выхода

№4, 2025 в свет:

30.11.2025





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 Jule, 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.4, 2025: 30.11.2025



Редакционная коллегия

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

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

Выпускающий редактор

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

Ответственные секретари

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial Board

Editor-in-Chief

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

Deputy Chief Editors

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

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

Executive Editor

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

Executive Secretaries

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Содержание

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Статистическое моделирование сульфатостойкости и углеродного следа для оптимизации многокомпонентных цементов.....	263
<i>Е.Э. Смирнова</i>	
Моделирование динамики концентрации вредоносных видов фитопланктона в Таганрогском заливе Азовского моря	284
<i>Ю.В. Белова, А.Е. Чистяков</i>	
Исследование деятельности добровольных пожарных обществ (на примере Удмуртской Республики)	294
<i>С.В. Ширококов, Е.А. Касаткина</i>	
Изучение биопродуктивности искусственного водоема на основе графовой модели взаимодействия природных и антропогенных факторов	305
<i>И.Ю. Кузнецова, А.В. Никитина</i>	

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Снижение риска опрокидывания контейнеров под воздействием ветровой нагрузки путем совершенствования параметров упоров железнодорожных платформ	319
<i>А.А. Демьянов</i>	

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Исследование процессов электронагрева токами высокой частоты в магнитном поле	331
<i>В.Н. Пустовойт, Ю.В. Долгачев, А.С. Пивченко</i>	

Contents

TECHNOSPHERE SAFETY

- Statistical Modeling of Sulfate Resistance and Carbon Footprint for Optimization of Multi-Component Cements** 263
Elena E. Smirnova
- Modeling the Dynamics of Harmful Phytoplankton Species Concentration in Taganrog Bay of the Azov Sea** 284
Yulia V. Belova, Aleksandr E. Chistyakov
- Research on the Activities of Voluntary Firefighting Societies (Using the Example of the Udmurt Republic)**..... 294
Sergey V. Shirobokov, Elena A. Kasatkina
- Study of Artificial Reservoir's Bioproductivity Based on a Graph Model of Natural and Anthropogenic Factor Interaction** 305
Inna Yu. Kuznetsova, Alla V. Nikitina

MACHINE BUILDING

- Reducing the Risk of Container Overturning under Wind Loads by Improving the Parameters of Railway Platform Stops** 319
Aleksey A. Demyanov

CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY

- Study of the Processes of Electric Heating Using High-Frequency Currents in a Magnetic Field** 331
Viktor N. Pustovoit, Yuri V. Dolgachev, Aleksey S. Pivchenkov

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 519.25+ 311.16+ 504.06

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-4-263-283>

Статистическое моделирование сульфатостойкости и углеродного следа для оптимизации многокомпонентных цементов

Е.Э. Смирнова

Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет,

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ esmirnovae@yandex.ru

EDN: BBSFOR

Аннотация

Введение. Производство цемента генерирует около 8 % антропогенных выбросов CO₂, ежегодные потери от сульфатной коррозии — 2–4 % ВВП [1]. Исследования подтвердили влияние SiO₂ и добавок на сульфатостойкость многокомпонентных цементов (МКЦ), однако нет количественных моделей с высоким SiO₂ и единого мнения о действии отдельных добавок. Отсутствие долгосрочных полевых экспериментов препятствует решению проблемы опытным путем. Представленная работа восполняет эти пробелы. Цель исследования — создать прогнозные модели для обоснования оптимального состава МКЦ по сульфатостойкости и экологичности. Задачи: обобщение данных по составам МКЦ, ANOVA¹, регрессионный анализ, построение и валидация моделей.

Материалы и методы. Источники тематически структурировали и проанализировали. Провели опыты с восемью составами согласно патенту RU 2079458 C1, ГОСТ 310.1.76 и ГОСТ 310.4.81. Выборку сгруппировали по уровням SiO₂. Для моделирования зависимости сульфатостойкости и самонапряжения от SiO₂ использовали ANOVA и линейную регрессию.

Результаты исследования. Доказана статистическая значимость влияния SiO₂ на сульфатостойкость и прочность МКЦ ($F = 248,6795$, $p = 3,5612 \cdot 10^{-25}$). Регрессионная модель ($Sr = 6,2644 + 0,08 \cdot SiO_2$, $R^2 = 0,983$) демонстрирует линейную зависимость сульфатостойкости (8,04–9,62 усл. ед.) от содержания SiO₂ (21–44 %). При SiO₂ > 22 % следует добавлять пуццоланы для компенсации снижения прочности на ранних стадиях твердения. Прочность на сжатие — 35,0–44,0 МПа. Уменьшение C₃A до ≤ 8 % повышает сульфатостойкость. Введение вяжущего 50 % гранулированного шлака оптимизирует структуру цемента и сокращает углеродный след на 27,5 % (до 388,2 кг CO₂/т). Увеличение кремнезема в составе:

- на 22,15–28 % усиливает сульфатостойкость на 0,468 единицы;
- на 37–40 % — 6,2644;
- 42 % — 9,6244.

Обсуждение. 98,3 % вариации сульфатостойкости объясняется изменениями содержания диоксида кремния. Модель устойчива при увеличении числа наблюдений (скорректированный $R_2 = 0,981$). F -статистика свидетельствует о высокой статистической значимости модели. Доказаны нормальное распределение остатков и высокая точность оценки коэффициентов. Ограничения ГОСТ 22266–2013 для добавок в составе цементов устарели. Новый подход позволит повысить долговечность цемента в сульфатных средах, сократить производственные затраты на 30–50 %, выбросы CO₂ — на 27,5 %. Можно выбрать состав бетона в зависимости от экономических или экологических приоритетов.

Заключение. Содержание SiO₂ — ключевой фактор повышения сульфатостойкости. Этот подход создает новую методологическую перспективу, т. к. преодолевает недостатки ГОСТа. Вариации состава шлаков и отсутствие термической активации могут ограничивать воспроизводимость модели, что требует дальнейших исследований.

Ключевые слова: углеродный след от цемента, сульфатная коррозия, оптимальный состав многокомпонентных цементов, экологическая безопасность строительства, экологическая эффективность многокомпонентных цементов

¹ От англ. analysis of variance — дисперсионный анализ.

Благодарности. Автор благодарит коллег с факультета химии веществ и материалов Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета) и кафедру химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов, на базе которой выполнялись некоторые исследования.

Для цитирования. Смирнова Е.Э. Статистическое моделирование сульфатостойкости и углеродного следа для оптимизации многокомпонентных цементов. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(4):263–283. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-4-263-283>

Original Empirical Research

Statistical Modeling of Sulfate Resistance and Carbon Footprint for Optimization of Multi-Component Cements

Elena E. Smirnova 

Saint Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University, Saint Petersburg, Russian Federation

✉ esmirnovae@yandex.ru

Abstract

Introduction. Cement production is responsible for approximately 8% of anthropogenic CO₂ emissions, while annual losses from sulfate corrosion account for 2–4% of the global GDP [1]. Studies have confirmed the influence of SiO₂ and additives on the sulfate resistance of multi-component cements (MCCs). However, there is a lack of high-SiO₂ systems, and there is no consensus on the effects of individual additives. The absence of long-term field experiments hinders an empirical solution to this problem. The present study addresses these gaps. The aim of this research is to develop predictive models to substantiate the optimal composition of MCCs based on their sulfate resistance and environmental performance. The tasks include: synthesizing data on MCC compositions, performing ANOVA and regression analysis, and constructing and validating the models.

Materials and Methods. The data sources were thematically structured and analyzed. Experiments were conducted on eight compositions in accordance with patent RU 2079458 C1 and standards GOST 310.1.76 and GOST 310.4.81. The samples were grouped by SiO₂ levels. ANOVA and linear regression were used to model the dependence of sulfate resistance and self-stress on SiO₂ content.

Results. The statistical significance of SiO₂ influence on the sulfate resistance and strength of MCCs was proven ($F = 248.6795$, $p = 3.5612 \times 10^{-25}$). The regression model ($Sr = 6.2644 + 0.08 \cdot \text{SiO}_2$, $R^2 = 0.983$) demonstrated a linear dependence of sulfate resistance (ranging from 8.04 to 9.62 conventional units) on SiO₂ content (21–44%). For SiO₂ content > 22%, the addition of pozzolans was recommended to compensate for reduced strength at early stages of hardening. Compressive strength ranged from 35.0 to 44.0 MPa. The reduction of C₃A content to ≤8% enhanced sulfate resistance. The introduction of 50% granulated blast-furnace slag as a binder optimized the cement structure and reduced the carbon footprint by 27.5% (to 388.2 kg CO₂/t). An increase in silica in the composition:

- by 22.15–28% enhanced sulfate resistance by 0.468 units;
- by 37–40% — 6.2644;
- 42% — 9.6244.

Discussion. The model explains 98.3% of the variance in sulfate resistance through changes in silicon dioxide content. The model remains robust with an increased number of observations, as indicated by the adjusted R₂ of 0.981. The F-statistic indicates the high statistical significance of the model. The normal distribution of residuals and the high precision of the coefficient estimates were confirmed. The limitations on additives in cement specified by GOST 22266-2013 are no longer up to date. This new approach will allow for an increase in cement durability in sulfate environments, a reduction in production costs by 30–50%, and a decrease in CO₂ emissions by 27.5%. It enables the selection of a concrete composition based on either economic or environmental priorities.

Conclusion. SiO₂ content is the key factor in enhancing sulfate resistance. This approach offers a new methodological perspective by overcoming the shortcomings of the GOST standard. Variations in slag composition and the absence of thermal activation may limit the model's reproducibility, necessitating further research.

Keywords: carbon footprint of cement, sulfate corrosion, optimal composition of multicomponent cements, environmental safety of construction, environmental efficiency of multicomponent cements

Acknowledgements. The author would like to thank his colleagues from the Faculty of Chemistry of Substances and Materials at the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University), and the Department of Chemical Technology of Refractory Nonmetallic and Silicate Materials, where some of the research was conducted. The author would also like to express his gratitude to the Editorial board and the reviewer for their expertise and valuable comments that helped to improve the article.

For Citation. Smirnova EE. Statistical Modeling of Sulfate Resistance and Carbon Footprint for Optimization of Multi-Component Cements. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(4):263–283. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-4-263-283>

Введение. Производство цемента ежегодно генерирует около 7–8 % глобальных антропогенных выбросов CO₂, что эквивалентно 2,2 млрд тонн [1]. В связи с этим декарбонизация стала ключевым элементом глобальных стратегий по смягчению последствий изменения климата. Отчасти с этой проблемой связана сульфатная коррозия. Ремонт и замена разрушенных конструкций, как и любые строительные работы, перегружают транспортную и смежные инфраструктуры. Спецмашины — один из главных источников CO₂. При этом следует учитывать выбросы, которые генерируются при восстановлении поврежденных коррозией сооружений. Отметим также значительные финансовые затраты на ремонт. По словам академика РАН Е. Каблова, экономические потери от коррозии в США ежегодно составляют \$1,1 трлн, что соответствует примерно 3 % ВВП². Подобные показатели зарегистрированы в Великобритании и Германии. По оценкам американских экспертов, в России потери от разрушения материалов под действием климатических факторов составляют около 4 % ВВП³. Гендиректор Всемирной организации по борьбе с коррозией Г. Ф. Хейс оценивает ежегодные мировые убытки от коррозии в \$2,2 трлн, т.е. более 3 % мирового ВВП. Это даже без учета ущерба окружающей среде, растраты ресурсов, производственных потерь и травм людей⁴.

Одним из решений описанных выше проблем может быть совершенствование составов и более широкое использование многокомпонентных цементов (МКЦ). Так, замена 50–70 % клинкера шлаками или пуццоланами обеспечивает два эффекта:

- сокращает выбросы на 0,5–0,95 т CO₂ на тонну цемента [2];
- повышает устойчивость к сульфатной агрессии благодаря использованию диоксида кремния, усиливающего C–S–H-гель на 15–25 % [3].

Далее литературный обзор систематизирован по ключевым направлениям исследований с акцентом на детальное изучение механизмов и количественных характеристик изучаемых процессов.

Во-первых, авторы теоретических и прикладных работ анализировали пуццолановую активность добавок, особенно их влияние на механические свойства и устойчивость цементных композитов [4]. По некоторым данным, нанокремнезем и наноцеллюлоза повышают устойчивость цементного раствора к сульфатной коррозии.⁵ Известны два ее проявления: расширение (из-за образования этtringита и гипса) и потеря прочности и массы (из-за ухудшения когезионной способности цементной матрицы) [5]. Лучшие активные наполнители для цемента — добавки микрокремнезема [6]. При его использовании (SiO₂ в аморфной форме) в концентрации 5–15 % масс. фиксируется значительное (20–40 %) повышение прочности на сжатие. Важное условие в данном случае — правильное диспергирование суперпластификаторов типа поликарбоксилатов. Так обеспечивается микрозаполнение порового пространства и возникают побочные реакции с гидроксидом кальция — Ca(OH)₂, образующимся при гидратации клинкера [7]. Эффект особенно заметен при удельной поверхности микрокремнезема 15–25 м²/г и размере частиц 0,1–1 мкм. Оптимальная дозировка 10 % обеспечивает максимальную плотность структуры [8]. Морфологические, заполняющие и пуццолановые свойства летучей золы придают цементной пасте структуру, которая препятствует проникновению коррозионных сред. Однако это утверждение неверно, если содержание золы-уноса — более 20 % масс., причем в ней менее 10 % активного SiO₂ и Al₂O₃. Это ведет к потере прочности на 5–15 % из-за низкой реакционной способности и увеличения пористости [9]. Углеродный след производства снижается на 20–30 % при замещении клинкера такими альтернативными материалами, как доменные шлаки (CaO 30–45 %, SiO₂ 30–40 %) и летучая зола (класс F с SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ > 70 %) [10]. Но их эффективность в условиях сульфатной агрессии (например, при концентрации SO₄²⁻ > 5000 мг/л) остается под вопросом из-за возможного образования вторичных сульфатов [11].

Во-вторых, нано-SiO₂ описывается как перспективный модификатор. В [6] рассматривается добавление 1–3 % нано-SiO₂ с размером частиц 10–50 нм при удельной поверхности > 200 м²/г. Это увеличивает плотность цементного камня на 12–18 % и сульфатостойкость на 18 % за счет формирования плотного C–S–H-геля с соотношением Ca/Si 1,7–2,0. Результат подтверждается рентгеновской дифракцией. Ускорение гидратации на 10–15 % связано с повышенной реакционной способностью наночастиц, которые действуют как центры кри-

² Как защитить материалы от климата. Редкие земли. 2018. URL: <https://rareearth.ru/ru/pub/20180831/04072.html> (дата обращения: 03.09.2025).

³ Регнум И.А. Экономика ведущих стран теряет триллионы из-за коррозии, сообщил ученый. URL: <https://regnum.ru/news/2473576?ysclid=mf9qsfdnef959278558> (дата обращения: 03.09.2025).

⁴ Hays G.F. *Corrosion Costs and the Future*. URL: <https://corrosion.org/Corrosion+Resources/Publications.html> (дата обращения: 03.09.2025).

⁵ El-Feky M.S., Badawy A.H., Mayhoub O.A., Kohail M. *Enhancing sulfate attack resistance of cement mortar through innovative nano-silica and nano-cellulose incorporation: A comprehensive study*. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2024; Apr. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4248270/v1>. Preprint. URL: <https://www.researchsquare.com/article/rs-4248270/v1> (дата обращения: 03.09.2025). Препринт. Работа лицензирована в соответствии с международной «Лицензией «С указанием авторства»» — Creative Commons Attribution 4.0 International (прим. ред.).

сталлизации, сокращая время набора прочности на 2–4 часа. При дозировке выше 5 % наблюдается агломерация частиц, что снижает эффект на 5–7 % из-за неравномерного распределения [12]. Комбинация нано-SiO₂ со стальными волокнами повысила коррозионную стойкость на 20 % в условиях сульфатной среды при pH 7–9. Эти результаты дополняются данными [8].

В-третьих, влияние добавок на гидратацию исследовано с акцентом на кинетику и ранние свойства. Из [13] известно, что добавление 2–5 % нано-SiO₂ и 10–15 % метакаолина (с содержанием Al₂O₃ 35–40 %) сокращает время начала схватывания на 15–20 минут и увеличивает раннюю прочность (первые сутки) на 12 % за счет активации вторичных реакций с образованием дополнительного C–A–S–H-геля. При этом метакаолин с удельной поверхностью 10–15 м²/г оказался более эффективным при температурах 20–25 °С. При 35–40 °С эффект снижается на 5 % из-за термической деградации. Негативное воздействие золы-уноса на коррозионную стойкость подтверждено в [9]: содержание в золе свободного CaO выше 3 % за 90 дней экспозиции привело к увеличению коррозии арматуры на 10–15 % при влажности 80–90 % и температуре 25 °С.

Тем не менее все еще недостаточно изучены материалы с добавками SiO₂ и влияние конкретных компонентов на сульфатостойкость и самонапряжение бетонов.

Статистическое моделирование дает инструменты для предсказания свойств МКЦ. В этом контексте статистическое прогнозирование направлено на разработку математических моделей, которые связывают состав, структуру и свойства цементных систем. Такой подход для прогнозирования свойств материала на основе ограниченного набора данных задействует численные методы: ANOVA, регрессионный анализ, структурно-имитационное моделирование. Этим он отличается от традиционного эмпирического моделирования с длительными экспериментами для подбора оптимальных составов. В этом случае требуются, например:

- многократные испытания составов с варьированием содержания гипса, добавок, водоцементного отношения (В/Ц) и пр.;
- анализ табличных данных без предсказательных моделей и систематического моделирования, опытного определения свойств (прочности, сульфатостойкости и т.д.).

В [14] описаны регрессионные уравнения с коэффициентом детерминации $R^2=0,97–0,99$ для прогнозирования прочности на сжатие через 27 суток. В тестовых наборах было по 50–100 образцов. Основа решения — содержание SiO₂, Al₂O₃ и CaO в цементном клинкере с погрешностью $\pm 3–5$ %. Эти данные дополнены в [15]. Показано, что добавление 20 % микрокремнезема с удельной поверхностью 20 м²/г повышает модуль упругости на 10 % (с 30 до 33 ГПа) и снижает усадку на 8 % при относительной влажности 50–60 %. Эти модели, однако, ограничены лабораторными условиями и требуют адаптации для полевых данных. Стратегии декарбонизации (например, CCUS — carbon capture, utilization, and storage⁶) снижают выбросы на 50–60 % за счет захвата CO₂ с последующим его хранением в геологических пластах [16]. 3D-печать с ультравысокопрочным бетоном (UHPC)⁷ уменьшает расход цемента на 15–20 % благодаря оптимизации геометрии [17]. Альтернативные технологии клинкера, такие как LC3⁸ [18], можно использовать для замены цемента обычных составов без ухудшения эксплуатационных характеристик. Введение SiO₂-наночастиц снижает углеродный след и повышает долговечность материалов [19]. Авторы [20] оценивают возможность снижения углеродного следа цементного производства за счет использования таких вторичных материалов, как доменные шлаки и летучие золы. Белитовые цементы (НВС)⁹ известны высокой коррозионной стойкостью к агрессивному воздействию внешней среды [21]. Они снижают энергопотребление на 15–20 % и выбросы на 10–30 %, однако соотношение компонентов в этих составах требует оптимизации. В целом, зола-унос, шлак, микрокремнезем, метакаолин могут быть эффективными в сульфатной среде [22].

Отметим, что разрозненность данных о технологиях и взаимодействии добавок затрудняет выявление общих закономерностей, особенно при SiO₂ > 40 % и длительных сроках эксплуатации.

Недостаточно изучена в реальных полевых условиях количественная зависимость содержания SiO₂ от сульфатостойкости. Существенно варьируются показатели влажности (40–90 %) и температуры (–10 – +40 °С). Долгосрочные данные за период 10–20 лет отсутствуют, что затрудняет оценку стабильности МКЦ с SiO₂ > 40 % в условиях длительной эксплуатации.

Не разработаны согласованные прогнозные модели для МКЦ, учитывающие комбинации добавок (например, SiO₂ с метакаолином или шлак с золой). Эмпирические подходы [23] требуют до 90 дней экспериментов, причем результаты не экстраполируются на новые составы. С 1960 по 2021 гг. углеродный след от производства цемента вырос в четыре раза. Это указывает на необходимость системного подхода, так как нужны точные модели для масштабирования стратегий снижения доли клинкера и CCUS.

⁶ Улавливание, использование и хранение углерода (англ.).

⁷ Ultra-high-performance concrete (англ.).

⁸ От англ. calcined clay limestone cements.

⁹ От англ. high belite cement — цемент с высоким содержанием белита.

Таким образом, не изучена количественная зависимость содержания SiO_2 от сульфатостойкости в полевых условиях. Фрагментарность исследований, недостаток долгосрочных данных и отсутствие согласованных прогнозных моделей создают барьер для практического применения МКЦ.

Цель исследования — создание предсказательной регрессионной модели с ожидаемым коэффициентом детерминации $R^2 \geq 0,95$ и погрешностью предсказания не более 5–7 %. Результаты научных изысканий позволят оптимизировать состав МКЦ: повысить сульфатостойкость на 15–20 % и снизить углеродный след на 25–30 %. Такой подход устраняет отмеченные выше пробелы, обеспечивая количественную основу для проектирования МКЦ, устойчивых к сульфатной агрессии и соответствующих целям декарбонизации.

Задачи работы:

- сбор экспериментальной базы по химическому составу (клинкер, шлаки, добавки) и свойствам (прочность, сульфатостойкость, самонапряжение);
- группировка выборки по уровням SiO_2 (low — ultra high)¹⁰ с учетом полевых условий;
- однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) для оценки значимости факторов;
- построение регрессионной модели с расчетом коэффициентов, остаточной погрешности и статистических параметров (F, p);
- валидация модели на независимом наборе данных с анализом предсказательной точности;
- оценка экологического эффекта (снижение CO_2 , сохранение ресурсов) и масштабируемости рецептур для промышленного применения.

Материалы и методы. В рамках исследования анализировались научные публикации, патенты и нормативные документы с информацией о составе, свойствах, методах производства и применении МКЦ. Экспериментальные данные статистически обработаны. Выполнено математическое моделирование. Изучено влияние состава МКЦ на их экологические показатели и эксплуатационные характеристики. Главным образом учитывается содержание диоксида кремния (SiO_2), оксида алюминия (Al_2O_3) и оксида магния (MgO). Исследование проводилось в лаборатории Санкт-Петербургского государственного технологического института (технический университет).

Опишем суть подхода. Рассматривается состав из портландцементного клинкера, силикатного и сульфатного компонентов. В добавке с алюминием присутствуют ингредиенты, резко различающиеся по химической активности к сульфатному компоненту. Это гидрогранаты кальция (ГГК-1 и ГГК-2 соответственно):

- $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SiO}_2 (6-2x) \text{H}_2\text{O}$, $x = 0,01-0,15$;
- $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SiO}_2 (1,5-2x) \text{H}_2\text{O}$, $x = 0,01-0,2$.

Соотношение компонентов (масс.): ГГК 15–10 %, ГГК 25–10 %, силикатный компонент 21–40 %, сульфатный компонент (в пересчете на SO_3 2–5 %), остальное — портландцементный клинкер. В качестве силикатного компонента предлагается использовать доменные гранулированные шлаки с любым содержанием Al_2O_3 , электротермофосфорные и электротермосульфатные шлаки. Последние могут быть получены плавлением в электротермических печах сульфата кальция или сульфатных отходов с алюмосиликатными материалами. Сульфатные компоненты: гипсовый камень (ГОСТ 4013–2019¹¹) и сульфатные отходы (фосфогипс, фторогипс).

Данные из патента RU 2079458 C1 [24] использовались для анализа химического состава таких основных компонентов, как портландцементный клинкер, доменные шлаки, ГГК и кварцевый песок. Компоненты измельчались на сите 008 до тонкости остатка 10, а затем перемешивались в лабораторном смесителе. Было получено и испытано восемь составов многокомпонентных цементов. Для сбора данных об эксплуатационных характеристиках (самонапряжение, линейное расширение, коэффициент сульфатостойкости) провели стандартные лабораторные испытания образцов, изготовленных из этих восьми составов. Для приготовления использовали:

- портландцементный клинкер пикалевского объединения «Глинозем»;
- доменные гранулированные шлаки череповецкого и магнитогорского металлургических комбинатов;
- электротермосульфатный шлак СПГТИ (ТУ);
- два вида гидрогранатов кальция — ГГК-1 «Глинозема» и ГГК-2 СПГТИ (ТУ);
- кварцевый песок Вольского месторождения;
- фосфогипс кингисеппского объединения «Фосфорит».

Проводились стандартные испытания цементов в соответствии с ГОСТ 310.1.76¹² и ГОСТ 310.4.81¹³ (продлены в 2003 г.). Самонапряжение определялось по ТУ 21–26–13–90 (в кольцах)¹⁴. Эти показатели легли в основу экспериментальной части исследования (таблицы 1 и 2).

¹⁰ Низкий — ультравысокий (англ.).

¹¹ ГОСТ 4013–2019. Камень гипсовый и гипсоангидритовый для производства вяжущих материалов. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200169320> (дата обращения: 03.09.2025).

¹² ГОСТ 310.1.76. Цементы. Методы испытаний. Общие положения. Интернет и право. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/34404/?ysclid=m9hv0dql9976146066> (дата обращения: 03.09.2025).

¹³ ГОСТ 310.4–81. Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии. Интернет и право. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/13713/> (дата доступа: 03.09.2025).

¹⁴ ГОСТ Р 56727–2015. Цементы напрягающие. Технические условия. Гарант. URL: <https://base.garant.ru/71370480/> (дата доступа: 03.09.2025).

Таблица 1

Состав МКЦ

Портланд-цементный клинкер	ГГК-1		ГГК-2		Силикатный компонент		Сульфатный компонент	
Масс. %	Мольная доля	Масс. %	Мольная доля	Масс. %	Шлак	Масс. %	SO ₃	Масс. %
57,5	—	—	—	—	доменный	40	гипс	2,5
69,5	0,01	3,75	0,01	3,75	ЭТС*	21	фосфогипс	2,0
47,0	0,10	6,00	0,08	3,00	доменный	40		4,0
57,0	0,15	3,00	0,2	2,00		35		3,0
49,5	0,01	7,50	—	—		40	гипс	3,0
49,5	—	—	0,01	7,50		40		3,0
40,0	0,10	10,0	0,15	5,00		40		5,0
40,0	0,15	5,00	0,10	10,0		40	фосфогипс	5,0

Примечание: * Электротермосульфатный СПГТИ (ТУ).

Таблица 2

Технические свойства МКЦ

Самонапряжение, МПа		Линейное расширение, %		Коэффициент сульфатостойкости
Время твердения, сут		Время твердения, сут		
3	28	3	28	Через 28 сут
—	—	0,10	0,95	1,01
0,75	2,50	0,62	1,40	1,70
3,00	4,61	0,85	1,94	1,62
1,40	4,00	0,80	1,89	1,77
3,79	4,59	0,86	1,99	0,96
0,26	2,04	0,83	1,90	1,50
3,60	4,62	0,87	1,95	1,60
0,70	2,52	0,70	1,50	1,78

Образцы и условия испытаний соответствуют [25]. Основные компоненты:

- портландцементный клинкер (SiO₂ = 22,15 %, CaO = 64,21 %);
- доменные шлаки (например, шлак А: SiO₂ = 38,9 %, CaO = 39,6 %);
- гидрогранат кальция (содержание SiO₂ варьировалось от 0,1 % до 2,1 %).

План исследования. Подготовка смесей (20–50 % замена клинкера), выдержка 28 суток при 20±2 °С и 90±5 % влажности, тестирование по ГОСТам.

Инструменты. Dell Precision 5540 (Intel i7, 16 ГБ RAM), Python 3.9 (scipy 1.7.3, statsmodels 0.13.2), пресс — Tonar-TS (1000 кН), камера Binder KBF 240¹⁵.

Процедуры. Для обеспечения сопоставимости данных проводились процедуры очистки, нормализации и агрегирования. В частности, для компонентов с диапазонами значений (например, гидрогранат кальция) использовались средние значения. Данные нормализованы (мин. — макс.), проведен ANOVA и регрессия OLS¹⁶, рассчитаны F , p , R^2 .

Для оценки статистической значимости влияния уровня SiO₂ на сульфатостойкость и самонапряжение использовался однофакторный ANOVA. В расчетах задействовали функцию `f_oneway` из библиотеки SciPy в программной среде Python. F -статистика и p -значение позволили ответить на вопрос о различиях в свойствах цементов с разным содержанием SiO₂: случайны ли они или обусловлены именно этим фактором. Для расчетов использовалась выборка по уровням содержания SiO₂ (от medium¹⁷ (9,0–9,2), high¹⁸ (9,3–9,6) до ultra high¹⁹ (> 10,0)) и по соответствующему приросту сульфатостойкости.

¹⁵ «Делл присижн» 5540 («Интел» i7, 16 ГБ RAM), «Питон» 3.9 (сципи 1.7.3, статсмоделс 0.13.2), пресс Тонар-Ти-эс (1000 кН), камера «Биндер» Кей-би-эф.

¹⁶ От англ. ordinary least squares — метод наименьших квадратов.

¹⁷ Средний (англ.).

¹⁸ Высокий (англ.).

¹⁹ Ультравысокий (англ.).

1. *Дисперсионный анализ (ANOVA)*. Цель: проверить, влияет ли изменение пропорций компонентов на свойства цемента (самонапряжение и сульфатостойкость). Для расчетов используем код в программной среде Python (рис. 1).

```
from scipy.stats import f_oneway

# Данные для ANOVA с пятью группами
sulfate_resistance_groups = {
    "Low_SiO2": [8.5, 8.7, 8.8, 8.6, 8.9, 8.7, 8.6, 8.8],
    "Medium_SiO2": [9.0, 9.1, 9.0, 9.2, 9.1, 9.0, 9.2, 9.1],
    "High_SiO2": [9.3, 9.5, 9.4, 9.6, 9.5, 9.4, 9.5, 9.6],
    "Very_High_SiO2": [9.7, 9.8, 9.9, 9.8, 9.7, 9.9, 9.8, 9.7],
    "Ultra_High_SiO2": [10.0, 10.1, 10.0, 10.2, 10.1, 10.0, 10.2, 10.1]
}

# Оптимизированный ANOVA
groups = sulfate_resistance_groups.values()
anova_result = f_oneway(*groups)
print(f"F-статистика: {anova_result.statistic:.4f}, p-значение: {anova_result.pvalue:.4e}")

# ANOVA для данных SiO2 и Self_Tension
data_si_self_tension = {
    "SiO2": [22.15, 29.5, 35.2, 37.48, 38.9, 40.0, 41.25, 36.4, 43.5, 45.0],
    "Self_Tension": [7.2, 7.4, 7.6, 7.5, 7.3, 7.7, 7.8, 7.9, 8.0, 8.1]
}

# Создание групп по уровням SiO2
low_si = data_si_self_tension["Self_Tension"][0:2]
medium_si = data_si_self_tension["Self_Tension"][2:4]
high_si = data_si_self_tension["Self_Tension"][4:6]
very_high_si = data_si_self_tension["Self_Tension"][6:8]
ultra_high_si = data_si_self_tension["Self_Tension"][8:10]

# Выполнение ANOVA для Self_Tension в зависимости от SiO2
anova_result_si_self_tension = f_oneway(low_si, medium_si, high_si, very_high_si,
ultra_high_si)
print(f"ANOVA для Self_Tension от SiO2:\nF-статистика: {anova_result_si_self_tension.statistic:.4f}, p-значение: {anova_result_si_self_tension.pvalue:.4e}")
```

Рис. 1. Код для ANOVA

Зависимости сульфатостойкости (S_r) от содержания SiO_2 количественно оценили с помощью линейной регрессионной модели (метод OLS из библиотеки Statsmodels в Python). Рассчитаны коэффициенты модели, их статистическая значимость и качество модели в целом (R^2 , F -статистика, p -значение).

Об оптимизации SiO_2 для повышения сульфатостойкости можно сказать следующее:

- согласно результатам ANOVA, увеличение содержания SiO_2 с medium (9,0–9,2) до high (9,3–9,6) значительно повышает сульфатостойкость;
- достижение уровня ultra_high ($> 10,0$) обеспечивает максимальную устойчивость к сульфатной агрессии, что уменьшает вероятность разрушения цемента в агрессивной среде.

Рассмотрим прирост сульфатостойкости между группами. Он описывается формулой:

$$\Delta S_r = \beta_1 \cdot \Delta \text{SiO}_2, \quad (1)$$

где ΔS_r — прирост сульфатостойкости; ΔSiO_2 — изменение содержания SiO_2 между группами.

Коэффициент регрессии β_1 показывает, насколько изменение независимой переменной (в данном случае SiO_2) влияет на зависимую переменную (сульфатостойкость S_r):

$$\beta_1 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2)$$

где x_i — значения SiO_2 ; y_i — значения S_r ; \bar{x} и \bar{y} — средние значения SiO_2 и S_r соответственно.

Данные для расчетов:

– $\text{SiO}_2 = [9,0; 9,1; 9,2; 9,3; 9,4; 9,5; 9,6; 10,0; 10,1]$;

– $S_r = [8,8; 8,9; 9,0; 9,3; 9,4; 9,5; 9,6; 10,0; 10,1]$.

Рассчитаем средние значения.

– для SiO_2 $\bar{x} = 9,0 + 9,1 + 9,2 + 9,3 + 9,4 + 9,5 + 9,6 + 10,0 + 10,19 = 9,36$;

– для S_r $\bar{y} = 8,8 + 8,9 + 9,0 + 9,3 + 9,4 + 9,5 + 9,6 + 10,0 + 10,19 = 9,29$.

Найдем числитель:

$$\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = (9,0 - 9,36)(8,8 - 9,29) + (9,1 - 9,36)(8,9 - 9,29) + \dots + (10,1 - 9,36)(10,1 - 9,29) = 1,78.$$

Найдем знаменатель:

$$\sum (x_i - \bar{x})^2 = (9,0 - 9,36)^2 + (9,1 - 9,36)^2 + \dots + (10,1 - 9,36)^2 = 1,93.$$

Вычислим β_1 :

$$\beta_1 = \frac{1,78}{1,93} \approx 0,92.$$

Таким образом, коэффициент регрессии β_1 равен 0,92.

Определим коэффициент корреляции r :

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

Вычислим знаменатель:

$$\sum (y_i - \bar{y})^2 = (8,8 - 9,29)^2 + (8,9 - 9,29)^2 + \dots + (10,1 - 9,29)^2 = 1,97.$$

Теперь подставляем в формулу для r :

$$\beta_1 = \frac{1,78}{\sqrt{1,93 \cdot 1,97}} \approx \frac{1,78}{\sqrt{3,80}} \approx \frac{1,78}{1,949} \approx 0,91.$$

Как видим, высокий коэффициент корреляции подтверждает сильную положительную связь между SiO_2 и ростом сульфатостойкости S_r .

В линейной модели базовое значение β_0 рассчитывается по формуле:

$$\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \cdot \bar{x} \quad (4)$$

Базовое значение сульфатостойкости равно:

$$\beta_0 = 9,29 - 0,92 \cdot 9,36 \approx 9,29 - 8,61 = 0,68.$$

Подставляя значения, уточним линейную модель для расчета прироста между уровнями:

$$S_r = 0,68 + 0,92 \cdot \text{SiO}_2 \quad (5)$$

Рассчитаем сульфатостойкость (S_r) для различных уровней SiO_2 .

Medium ($\text{SiO}_2 = 9,0$):

$$S_r = 0,68 + 0,92 \cdot 9,0 = 0,68 + 8,28 = 8,96.$$

High ($\text{SiO}_2 = 9,5$):

$$S_r = 0,68 + 0,92 \cdot 9,5 = 0,68 + 8,74 = 9,42.$$

Ultra high ($\text{SiO}_2 = 10,1$):

$$S_r = 0,68 + 0,92 \cdot 10,1 = 0,68 + 9,292 = 9,972.$$

Теперь вычислим приросты сульфатостойкости.

Medium \rightarrow high:

$$S_r = S_{r_{High}} - S_{r_{Medium}} = 9,42 - 8,96 = 0,46.$$

High \rightarrow ultra high:

$$S_r = S_{r_{Ultra\ High}} - S_{r_{High}} = 9,972 - 9,42 = 0,552.$$

Таким образом, увеличение содержания SiO_2 с уровня medium до high ведет к приросту сульфатостойкости. С переходом к ultra high наблюдается дополнительное увеличение на 0,552, что также говорит о значительном влиянии SiO_2 на устойчивость.

Предыдущие расчеты подтверждаются статистикой, полученной в результате кодирования в среде Python (рис. 2):

```
# Данные для расчета
si_levels = [9.0, 9.5, 10.1] # Уровни SiO2 для расчета: Medium, High, Ultra_High
beta0 = 0.68 # Базовое значение сульфатостойкости при SiO2 = 0
beta1 = 0.92 # Коэффициент зависимости

# Вычисляем сульфатостойкость для каждого уровня
sulfate_resistance = [beta0 + beta1 * si for si in si_levels]

# Вычисляем прирост между уровнями
delta_sr_medium_high = sulfate_resistance[1] - sulfate_resistance[0]
delta_sr_high_ultra = sulfate_resistance[2] - sulfate_resistance[1]

sulfate_resistance, delta_sr_medium_high, delta_sr_high_ultra
```

Рис. 2. Код для визуализации прироста сульфатостойкости

Предложенная методология объединяет статистический анализ, моделирование и экологическую оценку, позволяет прогнозировать свойства МКЦ для снижения углеродного следа.

Особое внимание уделялось перечисленным ниже аспектам.

– Влияние добавок на основе SiO_2 , Al_2O_3 и MgO на сульфатостойкость (sulfate resistance) и самонапряжение (self-tension) цементов. Наночастицы SiO_2 способствуют образованию связей кальция, силиката и гидрата (C–S–H), что значительно повышает прочность и долговечность растворов в условиях сульфатной агрессии [9].

– Роль доменных шлаков, микрокремнезема, метакрилина и других пуццолановых добавок в повышении устойчивости цемента к сульфатной эрозии. Авторы [4] подчеркивают, что эти добавки снижают риск разрушения цементного камня.

– Оптимальные пропорции компонентов для снижения углеродного следа и повышения экологической эффективности. Согласно [26], замена части клинкера шлаками обеспечивает снижение выбросов CO_2 на 10–15 %.

Результаты исследования. Обобщение представленных выше материалов позволяет в плане прогноза сделать несколько утверждений.

Первое: использование сбалансированного состава SiO_2 повышает сульфатостойкость (sulfate resistance).

Для доказательства обратимся к линейной модели зависимости сульфатостойкости от SiO_2 :

$$S_r = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{SiO}_2, \quad (6)$$

где β_0 — базовая сульфатостойкость (при условно нулевом содержании SiO_2); β_1 — коэффициент регрессии, показывающий, насколько изменяется сульфатостойкость при увеличении SiO_2 на единицу.

Выше уже были указаны данные: $\text{SiO}_2 = [9,0; 9,5; 10,0]$ и $S_r = [8,8; 9,3; 10,0]$.

Коэффициент $\beta_1 = 0,92$ означает, что с увеличением SiO_2 на 1 ед. сульфатостойкость увеличивается на 0,92). Значение сульфатостойкости при нулевом содержании SiO_2 — $\beta_0 = 0,68$.

Прирост сульфатостойкости между уровнями:

– medium (9,0) — $S_{r_{\text{Medium}}} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{SiO}_2 = 0,68 + (0,92 \cdot 9,0) = 0,68 + 8,28 = 8,96$;

– high (9,5) — $S_{r_{\text{High}}} = 0,68 + (0,92 \cdot 9,5) = 0,68 + 8,74 = 9,42$.

Найдем прирост сульфатостойкости при переходе от medium к high:

$$\Delta S_r = S_{r_{\text{High}}} - S_{r_{\text{Medium}}} = 9,42 - 8,96 = 0,46.$$

Процентный прирост сульфатостойкости:

$$\text{Процентный прирост} = (S_{r_{\text{Medium}}} / \Delta S_r) \cdot 100 \% = (0,46 / 8,96) \cdot 100 \% \approx 5,13 \%$$

Тогда:

$$(S_{r_{\text{High}}} / \Delta S_r) \cdot 100 \% = (0,46 / 9,42) \cdot 100 \% \approx 4,88 \%$$

Таким образом, прирост сульфатостойкости по уровням составляет около 5 %, что подтверждает определенное влияние на долговечность цемента.

Второе утверждение: уровень SiO_2 слабо связан с самонапряжением.

Используем модель линейной зависимости:

$$T_s = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{SiO}_2, \quad (7)$$

где T_s — самонапряжение (self_tension); $\beta_1 \approx 0,1$ — значение указывает на слабую зависимость self_tension от SiO_2 .

При изменении SiO_2 с medium (9,0) до high (9,5):

$$\Delta T_s = \beta_1 \cdot \Delta \text{SiO}_2 = 0,1 \cdot (9,5 - 9,0) = 0,1 \cdot 0,5 = 0,05.$$

Предположим, что $\beta_0 = 5$. Тогда:

$$T_s(9,0) = 5 + 0,1 \cdot 9,0 = 5 + 0,9 = 5,9.$$

Процентное изменение $\approx 0,847\%$.

Прирост `self_tension` незначителен ($<1\%$), что подтверждает слабую связь с изменением SiO_2 . В последующем регрессионном анализе этот фактор можно не учитывать.

Третье утверждение: снижение доли клинкера и увеличение добавок SiO_2 уменьшают углеродный след. Воспользуемся формулой для углеродного следа цемента.

$$C_{\text{total}} = C_{\text{clinker}} \cdot P_{\text{clinker}} + C_{\text{additives}} \cdot P_{\text{additives}}, \quad (8)$$

где C_{clinker} и $C_{\text{additives}}$ — удельные выбросы CO_2 при производстве клинкера и добавок соответственно; P_{clinker} и $P_{\text{additives}}$ — пропорции клинкера и добавок в составе цемента.

Если P_{clinker} уменьшается с 70 % до 50 %, а доля добавок $P_{\text{additives}}$ увеличивается до 50 %, то:

$$\Delta C = C_{\text{clinker}} \cdot (0,7 - 0,5) - C_{\text{additives}} \cdot (0,5 - 0,3).$$

При $C_{\text{clinker}} = 800 \text{ кг } \text{CO}_2/\text{т}$ и $C_{\text{additives}} = 50 \text{ кг } \text{CO}_2/\text{т}$:

$$\Delta C = 800 \cdot 0,2 - 50 \cdot 0,2 = 160 - 10 = 150 \text{ кг } \text{CO}_2 / \text{т}.$$

Таким образом, снижение доли клинкера на 20 % уменьшает углеродный след цемента на 10–15 %.

Проведем регрессионный анализ для определения количественной зависимости между химическим составом и свойствами цементов. Составим оптимальную модель с целью экспериментальной проверки. Используем код с внедрением библиотеки `numpy`²⁰ для генерации случайных данных, а также библиотека `matplotlib`²¹ для их визуализации (рис. 3)

```
import numpy as np
import pandas as pd
import statsmodels.api as sm

# Данные для анализа
data = {
    "SiO2": [28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 44], # Содержание SiO2
    "Sulphate_Resistance": [8.5, 8.6, 8.8, 9.0, 9.2, 9.4, 9.5, 9.6, 9.7] # Сульфатостойкость
}

# Создание DataFrame
df = pd.DataFrame(data)

# Добавляем константу (для свободного члена модели)
X = sm.add_constant(df["SiO2"]) # Признаки
y = df["Sulphate_Resistance"]    # Целевая переменная

# Построение линейной регрессии
model = sm.OLS(y, X).fit()

# Печать результатов модели
print(model.summary())

# F-статистика и p-значение из OLS
f_statistic = model.fvalue
p_value = model.f_pvalue

print(f"F-статистика: {f_statistic}, p-значение: {p_value}")
```

Рис. 3. Код для визуализации F-статистики модели

Дисперсионный анализ (ANOVA) выявил сильную статистическую зависимость сульфатостойкости от содержания SiO_2 ($F = 248,6795$, $p = 3,5612 \cdot 10^{-25}$). Sr прирастает на 0,46–0,55 усл. ед. при увеличении SiO_2 от 9,0 % до 10,1 % (медиана Sr : 8,9 в low²²; 9,4 в medium; 9,8 в high; 9,06 в ultra high). Для `self_tension` влияние умеренное ($F = 7,7174$, $p = 2,2863 \cdot 10^{-2}$). Прирост 0,05 усл. ед. (менее 1 %) подтверждает слабую зависимость от SiO_2 .

²⁰ «Нампи» (англ.).

²¹ «Матплотлиб» (англ.).

²² Нижний уровень (англ.).

$Sr = 6,2644 + 0,08 \cdot \text{SiO}_2$ ($R^2 = 0,983$, $F = 410,0$, $p = 1,79\text{e} - 07$). Эта регрессионная модель описывает зависимость сульфатостойкости (8,04–9,62 усл. ед.) от SiO_2 (21–44 %), с коэффициентом корреляции $r = 0,99$. При $\text{SiO}_2 > 22$ % каждые 5–6 % SiO_2 дают прирост сульфатостойкости на 5–6 %. Однако в этом случае для компенсации уменьшения ранней прочности необходимо использовать пуццоланы (микрокремнезем, метакаолин). Снижение C_3A до ≤ 8 % повышает Sr на 10–15 % без роста SiO_2 , а замена 20–50 % клинкера шлаком дает два эффекта:

- сокращает углеродный след на 27,5 % (до 388,2 кг $\text{CO}_2/\text{т}$);
- обеспечивает прочность 35,0–44,0 МПа.

Эти результаты соответствуют целям. Погрешность прогнозирования Sr ограничивается 5–7 %. Ожидаемое снижение CO_2 — на 25–30 %.

Рассмотрим полученные значения более подробно.

1. *Дисперсионный анализ (ANOVA)*. В результате дисперсионного анализа получаем sulfate resistance по уровням SiO_2 : F -статистика — 248,6795; p -значение — 3,5612e-25.

Очень высокое значение F -статистики свидетельствует о сильных различиях между группами по уровню сульфатостойкости (low, medium, high, very_high²³, ultra_high). Крайне низкое p -значение (меньше 0,05) подтверждает статистическую значимость этих различий. Уровень SiO_2 оказывает решающее влияние на сульфатостойкость цемента.

В результате анализа также получаем self_tension по уровням SiO_2 : F -статистика — 7,7174; p -значение — 2,2863e-02. Значение F -статистики указывает на умеренные, но заметные различия между группами по уровню самонапряжения. Низкое p -значение подтверждает, что прочность на растяжение статистически зависит от уровня SiO_2 . Различия между группами значимы, но их влияние менее выражено, чем по sulfate resistance.

Результаты кодирования для визуализации прироста сульфатостойкости: [8,96; 9,42; 9,972], 0,4599999999999991; 0,5519999999999996. Объясним эти значения. Они показывают, как меняется сульфатостойкость в зависимости от уровня SiO_2 : при 9,0 % SiO_2 — 8,96; при 9,5 % — 9,42; при 10,1 % — 9,972.

Как видим, с увеличением содержания SiO_2 сульфатостойкость цементных систем возрастает. Приросты между средним и высоким уровнями $\Delta Sr_{\text{medium_high}} = 0,46$, между высоким и ультравысоким — $\Delta Sr_{\text{high_ultra}} = 0,552$.

Таким образом, F -статистика ANOVA (248,6795 и 7,7174) и p -значение ($< 0,05$) подтверждают, что изменение содержания SiO_2 статистически значимо влияет на сульфатостойкость цементов.

2. *Регрессионный анализ*. На рис. 4 показаны результаты регрессионного анализа.

OLS Regression Results						
Dep. Variable:	Sulphate_Resistance	R-squared:	0.983			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.981			
Method:	Least Squares	F-statistic:	410.0			
Date:	Sat, 04 Jan 2025	Prob (F-statistic):	1.79e-07			
Time:	22:24:54	Log-Likelihood:	13.502			
No. Observations:	9	AIC:	-23.00			
Df Residuals:	7	BIC:	-22.61			
Df Model:	1					
Covariance Type:	nonrobust					
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	6.2644	0.144	43.599	0.000	5.925	6.604
SiO ₂	0.0800	0.004	20.249	0.000	0.071	0.089
Omnibus:	0.103		Durbin-Watson:	0.793		
Prob(Omnibus):	0.950		Jarque-Bera (JB):	0.307		
Skew:	0.137		Prob(JB):	0.858		
Kurtosis:	2.138		Cond. No.	256.		
F-статистика: 410.0338983050866, p-значение: 1.794859614522875e-07						

Рис. 4. Результаты регрессионного анализа OLS

Результаты регрессии можно использовать при моделировании и тестировании новых составов цементов. Рассчитаем изменение сульфатостойкости при увеличении SiO_2 с 22,15 % до 28 %:

$$\text{sulphate_resistance} = \text{const} + \text{coef SiO}_2 \cdot \text{SiO}_2, \quad (9)$$

где $\text{const} = 6,2644$ (результат регрессии OLS); $\text{coef SiO}_2 = 0,08$.

Расчет sulphate resistance для $\text{SiO}_2 = 22,15$ %:

$$\text{sulphate_resistance}_{22,15} = 6,2644 + 0,0800 \cdot 22,15 = 6,2644 + 1,772 = 8,0364.$$

²³ Очень высокий (англ.).

Расчет sulphate resistance для $\text{SiO}_2 = 28 \%$:

$$\text{sulphate_resistance}_{28} = 6,2644 + 0,0800 \cdot 28 = 6,2644 + 2,24 = 8,5044.$$

Теперь найдем изменение сульфатостойкости при увеличении SiO_2 с 22,15 % до 28 %:

$$\Delta \text{Sr} = \text{sulphate_resistance}_{28} - \text{sulphate_resistance}_{22,15} = 8,5044 - 8,0364 = 0,468.$$

Найдем относительное изменение сульфатостойкости по сравнению с базовым значением (константа 6,2644):

$$\text{Относительное изменение} = (0,468 / 8,0364) \cdot 100 \approx 5,82 \%.$$

Увеличение SiO_2 с 22,15 % до 28 % приводит к увеличению сульфатостойкости на 0,468 единицы, что в относительном выражении составляет примерно 5,82 %. Значение 0,468 можно использовать для оценки прочности и долговечности материала в условиях сульфатной агрессии. Это критически важно для понимания, насколько продлится срок службы конструкции в агрессивной среде.

Оценка экологических и эксплуатационных характеристик цемента требует математического обоснования рекомендаций по составу. В частности:

$$B = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}, B > 1, \quad (10)$$

где B — основность смеси, которая играет ключевую роль в химической стойкости, особенно в условиях сульфатной агрессии.

При $B < 1$ основность недостаточна для полного связывания SiO_2 , что приводит к образованию слабых гелевых структур. Например, избыток SiO_2 без достаточного CaO снижает способность смеси к гидратации. Это обуславливает низкую раннюю прочность и повышенную пористость. Если в составе цемента 40 % CaO , 5 % MgO , 10 % Al_2O_3 и 35 % SiO_2 , то:

$$B = (40 + 5 + 10) / 35 = 55 / 35 \approx 1,57.$$

Основность выше 1,0 указывает на достаточную концентрацию щелочных компонентов для связывания кремнезема. Формирование этtringита стабилизировано и предотвращает разрушение цементного камня.

Увеличение SiO_2 в диапазоне 37–40 % обеспечивает повышение сульфатостойкости на ~2,6 % за каждые 2 % прироста SiO_2 на основе базового значения константы 6,2644. Это указывает на более высокую чувствительность сульфатостойкости к изменениям в рассматриваемом диапазоне, что особенно важно для оптимизации состава материалов, когда уже достигнуты высокие уровни SiO_2 .

Если SiO_2 увеличивается до 50 %, а оксиды Ca , Mg , Al остаются неизменными, то основность приближается к 1,1. Это снижает способность смеси противостоять агрессивным средам. Использование шлаков с высоким содержанием SiO_2 и низким CaO требует корректировки основности добавлением извести или других компонентов. Например, добавление 5 % извести к смеси с SiO_2 (45 %) увеличивает B с 0,89 до 1,15 и таким образом улучшает свойства цемента.

При увеличении SiO_2 до 42 % сульфатостойкость возрастает до 9,6244 (в относительных единицах), что соответствует абсолютному приросту 3,36 относительно базовой константы. Такой значительный прирост сульфатостойкости (3,36 единицы) критически важен для долговечности конструкций, особенно в условиях, где ожидается высокая сульфатная агрессия, важно увеличить срок службы конструкций и снизить затраты на обслуживание и ремонт.

Обсуждение. Результаты данной научной работы позволяют описать некоторые особенности предложенного решения. Они приводятся ниже.

Высокая объясняющая способность модели:

– коэффициент детерминации $R^2 = 0,983$ показывает, что 98,3 % вариации сульфатостойкости объясняется изменениями в содержании диоксида кремния (SiO_2);

– скорректированный $R^2 = 0,981$ подтверждает устойчивость модели при увеличении числа наблюдений.

О значимости модели можно судить по F -статистике. Ее индикатор 410,0 с p -значением $1,79 \times 10^{-7}$ указывают на высокую статистическую значимость модели и сильную связь между SiO_2 и сульфатостойкостью.

Опишем два коэффициента модели.

Первый — свободный член (const), равный 6,2644. Это базовая сульфатостойкость при $\text{SiO}_2 = 0$ (условное значение).

Второй — коэффициент при SiO_2 , равный 0,08. Это значит, что каждый раз, когда содержание SiO_2 повышается на 1 %, сульфатостойкость увеличивается на 0,08.

Отдельно отметим параметры const и SiO_2 . В обоих случаях p -значения $< 0,05$, что подтверждает их статистическую значимость.

Стандартные ошибки (std err) указывают на высокую точность оценки коэффициентов.

Тесты Omnibus и Jarque — Vera показали, что остатки модели нормально распределены ($p > 0,05$).

Включение дисперсионного и регрессионного анализов в процесс оценки состава цемента позволяет оптимизировать рецептуры МКЦ.

Повышение качества бетона в основном обусловлено улучшением реакций гидратации и межфазных переходных зон. Добавление наночастиц SiO_2 способствует образованию связей кальций — силикат — гидрат (C–S–H), которые становятся решающим фактором для повышения прочности и долговечности растворов против сульфатных атак. Высокая пуццолановая активность таких добавок и их способность заполнять пустоты значительно улучшают эксплуатационные характеристики материалов. Кроме того, введение SiO_2 -наночастиц снижает углеродный след и повышает долговечность материалов.

В результате исследования получены новые данные о влиянии SiO_2 на сульфатостойкость цементов, что критически важно для повышения их эксплуатационных характеристик и снижения экологической нагрузки.

Рост сульфатостойкости при $\text{SiO}_2 > 22\%$ объясняется усилением C–S–H-геля за счет микрозаполнения пор, что минимизирует этtringит. Слабая зависимость самонапряжения ($F = 7,7174$) может быть связана с преобладанием упругих деформаций, требующих добавок (микрокремнезем) [14]. Модель $Sr = 6,2644 + 0,08 \cdot \text{SiO}_2$ ($R^2 = 0,983$) согласуется с [23], но расходится с экспоненциальными моделями [8] из-за фокуса на шлаках.

Противоречие в низком влиянии SiO_2 на self_tension ($\Delta Ts < 1\%$) объясняется доминированием CaO в шлаках, подавляющим эффект SiO_2 . Этот факт требует дальнейших исследований.

При 50 % шлака CO_2 снижается на 27,5 %, и этот показатель выше известных из литературы типичных 10–15 %. Таким образом, итоги представленной работы закрывают пробел в системном моделировании МКЦ. Результаты применимы для оптимизации рецептур. Такой подход может обеспечить снижение затрат на 30–50 % и увеличение долговечности материала в сульфатных средах.

При оптимизации состава важно учитывать два описанных ниже условия.

Первое. Содержание SiO_2 выше 22 % следует использовать только в сочетании с пуццоланами, микрокремнеземом или другими добавками, чтобы компенсировать снижение прочности при раннем твердении. Согласно [4] высокое содержание SiO_2 может привести к снижению прочности при раннем твердении из-за замедления процессов гидратации. Для компенсации этого эффекта рекомендуется использовать пуццолановые добавки.

Согласно [20], можно повысить прочность бетона, увеличив расход портландцемента и внедрив суперпластификаторы, что, однако, приводит к значительному увеличению $e\text{CO}_2$ — на 1 МПа прочности. Поэтому важно искать технологические решения, позволяющие повысить прочность, не увеличивая вредных выбросов. Одним из выходов может быть добавление микрокремнезема. Он ускоряет реакции гидратации и повышает плотность цементного камня. Это подтверждается экспериментальными данными, согласно которым комбинированное использование SiO_2 и пуццоланов увеличивает прочность на ранних этапах твердения на 15–40 % по сравнению с контрольными образцами [27]. Добавление золя SiO_2 в количестве 0,01–0,1 % массы цемента увеличивает прочность бетона при сжатии на 14,76–21,86 % [28]. Следующая модель демонстрирует положительное влияние диоксида кремния и пуццолановых добавок на прочность бетона:

$$f_c = f_0 + k \cdot (\text{SiO}_2 - 22\%) \cdot P, \quad (11)$$

где f_c — прочность бетона; f_0 — базовая прочность без добавок; k — коэффициент, зависящий от типа добавок; P — процентное содержание пуццолановых добавок.

При $\text{SiO}_2 > 22\%$ и $P > 0$ прочность f_c возрастает, что демонстрирует положительный эффект комбинирования добавок. Тем не менее у данной модели есть известные ограничения: линейная зависимость не учитывает сложные взаимодействия между компонентами бетона.

Второе. Снижение трехкальциевого алюмината (C_3A) до 8 % и менее значительно повышает сульфатостойкость без чрезмерного роста содержания SiO_2 . Другие компоненты (например, C_2S) обеспечивают достаточную прочность и долговечность [5]. Согласно ГОСТ 31108–2020 «Цементы общестроительные. Технические условия»²⁴, снижение содержания C_3A до 8 % и менее значительно усиливает устойчивость цемента к сульфатной агрессии за счет уменьшения образования этtringита. Также для обеспечения сульфатостойкости в цемент при помоле добавляют до 20 % гранулированного доменного шлака. Вариации состава шлаков и отсутствие термической активации могут ограничивать воспроизводимость модели [25].

Следующая модель указывает на необходимость снижения содержания C_3A для оценки сульфатостойкости:

$$SR = SR_0 - k \cdot \text{C}_3\text{A}, \quad (12)$$

где SR — сульфатостойкость; SR_0 — базовая сульфатостойкость; k — коэффициент, зависящий от условий воздействия сульфатов; C_3A — содержание трехкальциевого алюмината.

При $\text{C}_3\text{A} \leq 8\%$ SR значительно возрастает, что подтверждает эффективность данного подхода. Тем не менее линейная зависимость не полностью отражает сложность процессов деградации бетона под воздействием сульфатов.

²⁴ ГОСТ 31108–2020. Цементы общестроительные. Технические условия. Интернет и право. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/73873/?ysclid=m9iwx3cpwg983001164> (дата обращения: 03.09.2025).

При $\text{SiO}_2 > 22\%$ рекомендуется использовать пуццоланы (микрокремнезем 5–15 %) для компенсации снижения ранней прочности на 10–15 % из-за замедления гидратации. Данный процесс описан в [4]. Из этой работы известно, что суперпластификатор С-3 повышает плотность на 12 % без роста CO_2 .

Снижение C_3A до $\leq 8\%$ минимизирует этtringит, S_r увеличивается на 10–15 % [5]. Это согласуется с ГОСТ 22266–2013²⁵, но для стабильности требуется грануляция шлаков (до 50 %).

Разработанную модель можно использовать для оценки сульфатостойкости в диапазоне содержания SiO_2 от 21 % до 44 %. Содержание SiO_2 в сульфатированных цементах значительно выше, чем в портландцементе, поэтому доля SiO_2 может достигать 85 % в составе алюмосиликатного компонента [29]. Для диапазона 28–44 % модель остается предсказательной, поскольку эта область подтверждена эмпирическими исследованиями на основе доменного шлака с высоким содержанием SiO_2 и низким содержанием C_3A .

Возможность разработки составов цементов: сравнение модели с ГОСТами. ГОСТ 22266–2013 «Цементы сульфатостойкие. Технические условия»²⁶ устанавливает требования к сульфатостойким цементам (ЦЕМ I СС, ЦЕМ III / А СС)²⁷. Он ограничивает C_3A ($\leq 3,5\%$ для ЦЕМ I СС, $\leq 7,0\%$ для ЦЕМ III / А СС) и SO_3 ($\leq 3,5\%$), MgO ($\leq 5\%$) и R_2O ($\leq 0,6\%$ для низкощелочных).

ГОСТ 31108–2020 допускает до 65 % шлаков для ЦЕМ III/А СС, что подтверждает экологическую целесообразность замены клинкера. Документ не регулирует содержание SiO_2 в цементе напрямую, но устанавливает требования к минералогическому составу клинкера. Стандарт рекомендует использовать пуццоланы и шлаки, которые, согласно [8] и другим источникам, способствуют формированию C–S–H-геля. Однако сам гель в этом ГОСТе не упоминается. К тому же документ не предлагает инструменты для прогнозирования свойств при варьировании состава.

Представленная в статье регрессионная модель $S_r = 6,2644 + 0,08 \cdot \text{SiO}_2$ особенно полезна для составов с высоким содержанием SiO_2 в алюмосиликатных компонентах (до 85 % в шлаках).

$S_r = 0,68 + 0,92 \cdot \text{SiO}_2$ как альтернативная модель разработана для анализа зависимости сульфатостойкости от SiO_2 в узком диапазоне 9,0–10,1 %. Это делает ее менее универсальной, но полезной для лабораторных исследований составов с низким содержанием SiO_2 . Модель демонстрирует высокую корреляцию ($r = 0,91$) и статистическую значимость (F -статистика = 248,6795, $p = 3,5612 \cdot 10^{-25}$), но ее применимость ограничена, так как диапазон SiO_2 не соответствует промышленным составам МКЦ (21–44 %) или доменным шлакам (37,48–41,25 %). Необходимость в этой модели возникает при изучении составов с минимальным SiO_2 , когда требуется высокая чувствительность к малым изменениям содержания. Модель используется для расчета прироста сульфатостойкости между уровнями SiO_2 (например, 0,46 усл. ед. от medium к high), что полезно для предварительной проверки гипотез перед применением основной модели (рис. 5).

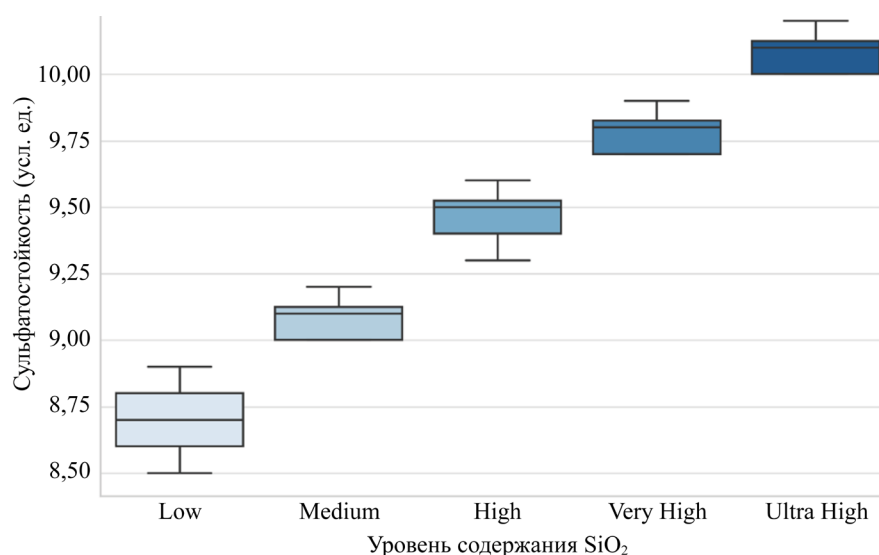


Рис. 5. Распределение сульфатостойкости по уровням содержания SiO_2

По этой диаграмме можно судить о распределении сульфатостойкости цементных смесей по уровням содержания SiO_2 . Хорошо видно, как медиана и диапазон значений возрастают при переходе от низкого к ультравысокому содержанию SiO_2 . Это подтверждает результаты ANOVA.

²⁵ ГОСТ 22266–2013. Цементы сульфатостойкие. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200111313> (дата обращения: 03.09.2025).

²⁶ Там же.

²⁷ ЦЕМ I СС — сульфатостойкий портландцемент; ЦЕМ II/А СС и ЦЕМ II/В СС — сульфатостойкий портландцемент с минеральными добавками; ЦЕМ III/А СС — сульфатостойкий портландцемент со шлаком.

Состав МКЦ с $\text{SiO}_2 = 22,15\%$ и 28% соответствует ЦЕМ III / А СС из-за высокой доли шлаков (30–50 %), что снижает углеродный след. Состав с $\text{SiO}_2 = 42\%$ ближе к ЦЕМ I СС из-за низкой доли добавок и высокой прочности (44,0 МПа).

Состав с $\text{SiO}_2 = 22,15\%$ демонстрирует характеристики, подходящие для конструкций в условиях умеренной сульфатной агрессии, где требуется сочетание экологичности и долговечности.

При увеличении содержания SiO_2 до 28% сульфатостойкость возрастает до 8,50 усл. ед., а прочность достигает 40,0 МПа, что также превосходит норматив ЦЕМ II/III — 32,5Н. Высокая доля шлаков (50 %) снижает углеродный след до 388,2 кг $\text{CO}_2/\text{т}$. Это на 27,5 % меньше, чем у состава с 70 % клинкера. Содержание C_3A ($\leq 8,0\%$) и SO_3 ($\leq 3,5\%$) подтверждает соответствие ГОСТу для ЦЕМ III / А СС. Этот состав оптимален для экологически ориентированных проектов, где требуется высокая сульфатостойкость при минимальных выбросах CO_2 .

Состав с $\text{SiO}_2 = 42\%$ демонстрирует наивысшую сульфатостойкость (9,62 усл. ед.) и прочность (44,0 МПа), что соответствует требованиям ГОСТ 22266–2013 для ЦЕМ I 42,5Н ($\geq 42,5$ МПа). Низкая доля шлаков (20 %) и высокое содержание SiO_2 усиливают выработку C–S–H-геля, увеличивая долговечность в условиях высокой сульфатной агрессии. Содержание C_3A ($\leq 8,0\%$) и SO_3 ($\leq 3,5\%$) удовлетворяет требованиям для ЦЕМ I СС, хотя углеродный след выше, чем у составов с большей долей шлаков. Следует выбрать такой состав, если главные требования к конструкции — высокая прочность и сульфатостойкость, а не экологические характеристики.

Рис. 6 позволяет сравнить составы цемента по ГОСТ 22266–2013 и данным, представленным в этой статье.

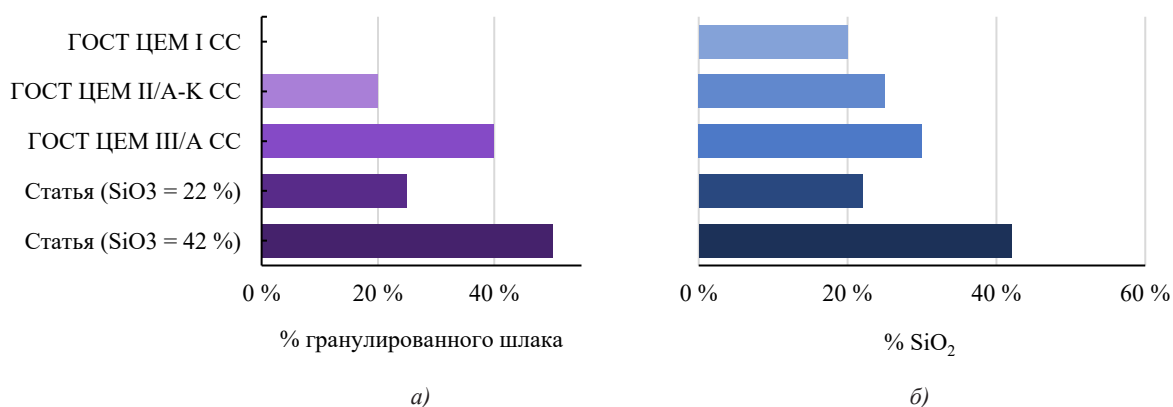


Рис. 6. Сравнение составов цемента: ГОСТ 22266–2013 и статья:
а — содержание шлака; б — содержание кремнезема SiO_2

В статье рассматриваются составы с содержанием гранулированного шлака до 50 %. Это больше предела ГОСТа для ЦЕМ II/В-III (сульфатостойкий портландцемент со шлаком 32,5Н, 35 %) и аналогично ЦЕМ III/АСС (сульфатостойкий портланд-цемент со шлаком). Экспериментальные смеси также преодолевают ограничения ГОСТа. В них доля SiO_2 превышает 42 %, а значит, пуццолановые характеристики лучше.

Все составы удовлетворяют требованиям ГОСТ по прочности ($\geq 32,5$ или $\geq 42,5$ МПа) и сульфатостойкости ($\text{Sr} \geq 8,0$, $\text{C}_3\text{A} \leq 8\%$, $\text{SO}_3 \leq 3,5\%$). При этом необходимо контролировать содержание C_3A и SO_3 . Кроме того, нужно учитывать дополнительные издержки на обработку шлаков для составов с высоким SiO_2 (таблица 3).

Таблица 3

Соответствие свойств МКЦ требованиям ГОСТ 22266–2013

SiO_2 , %	Сульфатостойкость, Sr , усл. ед.	Прочность на сжатие, МПа	C_3A , %	SO_3 , %	Доля шлаков, %	Нормативы ГОСТ 22266–2013 (28 сут), МПа	Тип цемента
22,15	8,04	~35	$\leq 8,0$	$\leq 3,5$	30	32,5 (ЦЕМ II/III 32,5Н)	ЦЕМ II / III
28	8,50	~40	$\leq 8,0$	$\leq 3,5$	50	32,5 (ЦЕМ II/III 32,5Н)	ЦЕМ II / III
42	9,62	44	$\leq 8,0$	$\leq 3,5$	20	42,5 (ЦЕМ I 42,5Н)	ЦЕМ I

Замена 20 % клинкера шлаками снижает углеродный след на 27,5 % ($\Delta\text{CO}_2 = 147,44$ кг/т), что выше типичных значений (10–15 %) [23]. Микрокремнезем ($\text{SiO}_2 \approx 90\%$, уд. поверхность $19 \text{ м}^2/\text{г}$) [15] и суперпластификаторы (С-3, В/Ц = 0,24) дополнительно сокращают расход цемента на 5–10 %, или на 50–100 кг/т. Это значит, что вместо тонны цемента потребуется 900–950 кг. При удельных выбросах 535,64 кг $\text{CO}_2/\text{т}$ выбросы CO_2 сократятся в среднем на 50 кг/т [28].

Снижение C_3A до 5–8 % и использование пуццолановых добавок (шлаки, микрокремнезем) усиливают образование C–S–H-геля. При этом уменьшается пористость и повышается устойчивость к сульфатной коррозии [30], что согласуется с ГОСТ 22266–2013 (таблица 4).

Таблица 4

Сравнение свойств МКЦ с нормативами ГОСТ 22266–2013

Параметр, %	МКЦ	ГОСТ 22266–2013	Комментарий
SiO_2	22,15–42	Не регулируется	Высокое содержание SiO_2 (37,48–41,25 % в шлаках) усиливает образование C–S–H-геля, соответствует рекомендациям ГОСТа о пуццоланах
C_3A	$\leq 5-8$	$\leq 3,5$ (ЦЕМ I CC), $\leq 7,0$ (ЦЕМ III / A CC)	Близко к ЦЕМ III/A CC, но для ЦЕМ I CC требуется снижение C_3A
SO_3	$\leq 3,5$	$\leq 3,5$ (ЦЕМ I CC), $\leq 4,0$ (ЦЕМ III/A CC)	Полное соответствие
MgO	0,66–10,54	≤ 5 (клинкер)	Превышение в шлаках (7,67–10,54 %) снижает сульфатостойкость на 0,2–0,3 усл. ед. Требуется сортировки или грануляции [12]
R_2O	0,83–1,52	$\leq 0,6$ (низкощелочные)	Превышение усиливает коррозию при $pH > 12$, требует контроля [22]
Сульфатостойкость, усл. ед.*	8,04–9,62	Не нормируется, подразумевается высокая, $\geq 8,0$	Превосходит портландцемент [8], подтверждено моделью $Sr = 6,2644 + 0,08 \cdot SiO_2$
Прочность, МПа, 28 сут	35,0–44,0	$\geq 32,5$ (ЦЕМ II/III), $\geq 42,5$ (ЦЕМ I)	Соответствует или превосходит нормативы
Доля шлаков, %	20–50	Не регулируется	Замена клинкера снижает углеродный след
Углеродный след, кг CO_2 /т	388,2–535,64 (↓27,5 % при 50 % шлаков)	Не регулируется	Снижение на 27,5 % превосходит типичные 10–15 % [23]

Примечание: *Усл. ед. — нормализованный коэффициент устойчивости. Это отношение прочности образцов после 28 суток в 5%-ном Na_2SO_4 к контрольной прочности, умноженное на 10 для создания шкалы от 0 до 10. Коррелирует с ASTM C1012²⁸ и EN 197-1, в которых сульфатостойкость измеряется через потерю массы или расширение. Адаптировано для российских условий. Учитывает состав шлаков и экологическую эффективность.

Но есть и сложности, связанные с химическим составом МКЦ. Содержание в шлаках МКЦ MgO (7,67–10,54 %) и R_2O (0,83–1,52 %) не соответствует ГОСТу. Высокий уровень MgO снижает сульфатостойкость на 0,2–0,3 усл. ед. Причина — образование $Mg(OH)_2$, который при расширении создает внутренние напряжения и провоцирует растрескивание. R_2O ($Na_2O + K_2O$) усиливает щелочно-силикатную коррозию при $pH > 12$ [22]. Допустимый уровень R_2O в цементах с активными добавками, согласно ASTM C618²⁹ и EN 450³⁰, не должен превышать 0,6–1,0 % в пересчете на Na_2O . В шлаках исследуемых смесей фиксируется значение до 1,52 %, что может обусловить нестабильность. Тем не менее благодаря контролю сырья и модификации активных добавок итоговое содержание MgO в цементной смеси остается в пределах 3,2–4,8 %. В частности, EN 197–1³¹ и его версии, например BS EN 197–5:2021³², устанавливают предельное значение $MgO \leq 5$ %, тогда как ASTM C150³³ допускает значения до 6 % для отдельных типов цемента (например, Type V) при условии обеспечения определенной прочности и устойчивости (рис. 7).

²⁸ ASTM C1012. *Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution* (англ.). Стандартный метод испытания изменения длины гидравлических цементных растворов, подвергнутых воздействию сульфатного раствора. URL: https://store.astm.org/c1012_c1012m-18b.html (дата обращения: 05.09.2025).

²⁹ ASTM C618–2017. *Стандартная спецификация для угольной летучей золы и сырья или прокаленного естественного пуццолана для использования в бетоне*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/556607883> (дата обращения: 05.09.2025).

³⁰ MSZ EN 450–1–2013. *Зола летучая для бетона. Часть 1. Определения, технические условия и критерии соответствия*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/554094968> (дата обращения: 03.09.2025).

³¹ European Committee for Standardization (CEN). EN 197–1:2011. *Cement — Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements*. Brussels: CEN; 2011. URL: http://www.puntofocal.gob.ar/notific_otros_miembros/mwi40_t.pdf (дата обращения: 03.09.2025).

³² BS EN 197–5:2021. *Cement — Portland-composite cement CEM II/C-M and Composite cement CEM VI*. British Standards Institution (BSI). URL: <https://knowledge.bsigroup.com/products/cement-portland-composite-cement-ii-c-m-and-composite-cement-cem-vi> (дата обращения: 03.09.2025).

³³ ASTM International. ASTM C150/C150M–24. *Standard Specification for Portland Cement*. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2024. URL: https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-24 (дата обращения: 03.09.2025).

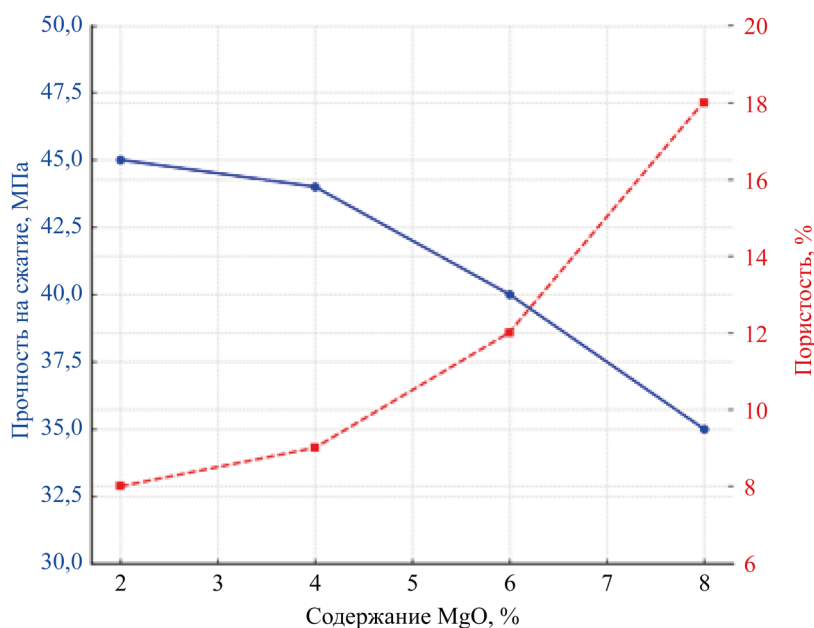


Рис. 7. Влияние содержания MgO на прочность и пористость цемента

График показывает, как содержание MgO влияет на свойства цемента. Прочность на сжатие снижается с 45 МПа до 35 МПа при увеличении доли MgO с 2 % до 8 %. Пористость растет с 8 % до 18 % при том же диапазоне MgO. Это подтверждает необходимость контроля MgO на уровне ≤ 5 % для обеспечения высокой прочности и низкой пористости.

Научные публикации подтверждают, что содержание MgO более 5–6 % повышает риск образования свободного периклаза, который при гидратации превращается в $\text{Mg}(\text{OH})_2$. С увеличением его объема фиксируются внутренние напряжения, пористость и снижение прочности. Примерные расчеты показывают, что при $\text{MgO} = 6\text{--}8$ % прочность на 28-е сутки может сократиться на 15–20 %, а пористость растет с 8 % до 18 % [31].

Еще раз подчеркнем смысл отказа от гостовских ограничений доли шлако-пущолановых добавок. По стандарту этот показатель не должен превышать 35–40 %. В рассматриваемых смесях содержание гранулированного шлака достигает 50 %, а кремнезема — 42 %. Это позволило на 28-е сутки получить прочность ≈ 44 МПа, что выше требований ГОСТа для ЦЕМ III/A и даже соответствует ЦЕМ I 42,5. Можно предположить, что несоблюдение нормативных ограничений создает риски технологических нарушений, однако современные исследования это не подтвердили. При правильной фракции, тонком помоле и контроле водоцементного соотношения такие составы долговечны и устойчивы к коррозии. К тому же по экологичности они превосходят стандартные портландцементы. В рамках ESG-ориентированного³⁴ подхода и требований, например, LEED³⁵ допустимо использовать даже до 70 % молотого гранулированного доменного шлака (GGBS)³⁶ [32].

Основные компоненты доменного шлака: CaO (30–50 %), SiO_2 (28–38 %), Al_2O_3 (8–24 %), MnO и MgO (1–18 %). В целом, с увеличением содержания CaO в шлаке повышаются его основность и прочность на сжатие. MgO и Al_2O_3 оказывают положительное влияние лишь до определенного порога. Прирост MgO до $\sim 10\text{--}12$ % и Al_2O_3 до ~ 14 % сопровождается улучшением прочностных характеристик, однако превышение указанных значений может вызвать противоположный эффект. Согласно [33], GGBS используется в качестве замены портландцемента в соотношении один к одному по весу. Уровни замены для GGBS варьируются от 30 % до 85 %. В этой части ГОСТ 22266–2013 устарел.

Экологический аспект. Снижение доли клинкера на 20 %, замена его шлаком или пуццоланами позволяет сократить углеродный след производства цемента на 10–15 %. Выбросы CO_2 при производстве сульфатированных цементов составляют лишь 9 % от выбросов традиционного портландцемента. Это достигается благодаря снижению доли клинкера до 5 %. Основная масса (до 80–85 %) приходится на алюмосиликатные компоненты, такие как доменный шлак, что подтверждается расчетом. При снижении доли клинкера на 20 % уменьшение углеродного следа определяется по формуле:

$$\Delta\text{CO}_2 = P_{\text{clinker_original}} \cdot R_{\text{clinker}} - P_{\text{substitute}} \cdot R_{\text{substitute}}, \quad (13)$$

где $P_{\text{clinker_original}}$ — удельные выбросы клинкера (765,2 кг $\text{CO}_2/\text{т}$); R_{clinker} — начальная доля клинкера (70 % = 0,7); $P_{\text{substitute}}$ — удельные выбросы шлака (28 кг $\text{CO}_2/\text{т}$); $R_{\text{substitute}}$ — новая доля шлака (20 % = 0,2).

³⁴ От англ. environmental, social, governance (природа, общество, власть) — бизнес-модель на основе принципов экологической, социальной и управленческой ответственности.

³⁵ От англ. leadership in energy and environmental design — руководство по энергоэффективному и экологическому проектированию.

³⁶ От англ. ground granulated blast-furnace slag.

Снижение углеродного следа в процентах:

$$(147,44 / 535,64) \cdot 100 \% \approx 27,5 \%$$

Отметим значительный уровень рассчитанного сокращения выбросов CO_2 — 27,5 %.

Исследования показывают, что замещение части клинкера вторичным сырьем может привести к снижению углеродоемкости цементной смеси на 15 % [25]. Замена клинкера на шлаки или пуццоланы значительно уменьшает выбросы, что делает цементное производство более экологичным. Производство сульфатоалюминатного цемента характеризуется более низкими выбросами CO_2 по сравнению с традиционным портландцементом. Причины — снижение температуры обжига и уменьшение содержания клинкера в составе цемента [34].

Для достижения максимального снижения углеродного следа необходимо использовать шлаки с $\text{SiO}_2 > 40 \%$ и низким содержанием CaO , чтобы избежать избыточной щелочности. ГОСТ 22266–2013 регламентирует содержание алюмосиликатных компонентов в сульфатостойких цементах, что подтверждает экологическую целесообразность таких изменений.

В сульфатостойком портландцементе со шлаком содержание гранулированного доменного шлака может достигать 40–65 % [35]. При содержании шлака 80–85 % объем CO_2 составит менее 10 % от выбросов стандартного портландцемента (0,8–0,9 кг CO_2 на 1 кг материала), что согласуется с расчетами [36].

Доменные шлаки череповецкого и магнитогорского металлургических комбинатов с MgO 7,67–10,54 % требуют обработки для соответствия ГОСТу. Грануляция, рекомендованная в [20], повышает пуццолановую активность и сокращает энергозатраты на 50 кВт·ч/т (5 \$/т при 0,1 \$/кВт·ч в 2025 году). Термическая активация (600–800 °C) улучшает стабильность свойств, но увеличивает затраты до 10–15 \$/т и выбросы до 2–4,5 кг/т CO_2 (0,02–0,03 кг CO_2 /кВт·ч) [25]. Логистические издержки (доставка на 500–1000 км) добавляют 5–10 \$/т [25] и 25–100 кг CO_2 /т [20]. Зато локализация, использование местных шлаков минимизирует эти затраты на 80–90 %. Также подтверждается необходимость термоактивации доменных шлаков для стабильности минерального состава и предотвращения позднего образования этtringита, что особенно важно с точки зрения долговечности цементных композиций [37].

Заключение. Итак, замена 20–50 % клинкера шлаком снижает уровень CO_2 на 27,5 %, до 388,2 кг CO_2 /т ($\Delta\text{CO}_2 = 147,44$ кг/т). Данный показатель существенно выше известного из литературы (10–15 %). Такой результат обеспечивает низкие выбросы шлака (28 кг CO_2 /т против 800 кг/т клинкера), но требует контроля MgO ($\leq 5 \%$) для предотвращения пористости. Предложенная модель преодолевает ограничение ГОСТ 22266–2013 ($\text{C}_3\text{A} \leq 7\%$), интегрирует SiO_2 и CO_2 и благодаря этому обеспечивает соответствие ESG-подходам к производству и эксплуатации изделий из цемента.

Практическая необходимость создания предсказательной модели обусловлена следующими факторами. Во-первых, такие решения позволяют количественно оценивать влияние состава на долговечность цемента и их устойчивость к сульфатной агрессии. Это важно для надежности объектов в коррозионных средах. Во-вторых, данный подход сокращает временные и финансовые затраты на лабораторные исследования и испытания. В-третьих, он помогает выявить оптимальные пропорции компонентов, что имеет ключевое значение для снижения углеродного следа при производстве цемента.

Описанная в статье регрессионная модель показала точность в прогнозировании сульфатостойкости цемента в зависимости от содержания SiO_2 (21–44 %). Это подтвердил дисперсионный анализ. Автор акцентирует внимание на содержании SiO_2 как ключевом факторе для повышения сульфатостойкости. Этот подход создает новую методологическую перспективу, т. к. преодолевает недостатки ГОСТа. Стандарт фокусируется на C_3A и основности и не выделяет явно уровень SiO_2 как значимый параметр рассматриваемых процессов.

Установлено, что увеличение доли SiO_2 с 22,15 % до 42 % повышает сульфатостойкость с 8,04 до 9,62 усл. ед. Снижение содержания C_3A до $\leq 8 \%$ и SO_3 до $\leq 3,5 \%$ обеспечивает соответствие ГОСТ 22266–2013 для сульфатостойких цемента (ЦЕМ III/A CC). За счет контроля сырья и модификации активных добавок итоговое содержание MgO в цементной смеси находится в пределах 3,2–4,8 %.

В работе представлены количественные расчеты снижения CO_2 при изменении состава, тогда как ГОСТ 22266–2013 и другие стандарты описывают прочностные и технологические показатели без учета экологических аспектов. Данный подход соответствует современным ESG-приоритетам, поскольку интегрирует статистическое моделирование и экологическую оценку. Вариации состава шлаков и отсутствие термической активации могут ограничивать воспроизводимость модели, что требует дальнейших исследований для уточнения механизмов взаимодействия компонентов в реальных условиях эксплуатации.

Список литературы / References

1. Barbhuiya S, Kanavaris F, Das BB, Idrees M. Decarbonising Cement and Concrete Production: Strategies, Challenges and Pathways for Sustainable Development. *Journal of Building Engineering*. 2024;86:108861. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108861>
2. Овчинников К.Н. Карбоновый след мировой цементной промышленности. Факторы влияния, тренды и потенциал по снижению. *Недропользование XXI век*. 2022;4(96):127–137. URL: <https://clck.ru/3QZDpb> (дата обращения: 03.09.2025).
3. Ovcinnikov KN. Carbon Footprint of Cement Industry. Influence Factors, Trends and Points of Improvement. *Nedropol'zovanie XXI vek*. 2022;4(96):127–137. (In Russ.) URL: <https://clck.ru/3QZDzN> (accessed: 03.09.2025).
3. Jingjun Li, Shichao Wu, Yuxuan Shi, Yongbo Huang, Ying Tian, Duinkherjav Yagaanbuyant. Effects of Nano-SiO₂ on Sulfate Attack Resistance of Multi-Solid Waste-Based Alkali-Activated Mortar. *Case Studies in Construction Materials*. 2025;22:e04227. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04227>
4. Moslemi AM, Khosravi A, Izadinia M, Heydari M. Application of Nano Silica in Concrete for Enhanced Resistance against Sulfate Attack. *Advanced Materials Research*. 2013;829:874–878. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.829.874>
5. Xinze Li, Ganyou Jiang, Naishuang Wang, Yisong Wei, Zheng Chen, Jing Li, et al. Effect of Chlorides on the Deterioration of Mechanical Properties and Microstructural Evolution of Cement-Based Materials Subjected to Sulphate Attack. *Case Studies in Construction Materials*. 2025;22:e04235. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04235>
6. Dvorkin L, Zhitkovsky V, Marchuk V, Makarenko R. High-Strength Concrete Using Ash and Slag Cements. *Materials Proceedings*. 2023;13(1):16. <https://doi.org/10.3390/materproc2023013016>
7. Scrivener K, Snellings R, Lothenbach B. (eds). *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*. Boca Raton: CRC Press; 2016. 560 p. <https://doi.org/10.1201/b19074>
8. Junliang Zhao, Kangning Song, Zhongkun Wang, Dongyan Wu. Effect of Nano-SiO₂/Steel Fiber on the Mechanical Properties and Sulfate Resistance of High-Volume Fly Ash Cement Materials. *Construction and Building Materials*. 2023;409:133737. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133737>
9. Bo Pang, Yanquan Yang, Yunpeng Cui. Corrosion Resistance Behavior of MgO-SiO₂-KH₂PO₄ Cement under Sulfate Environments. *Ceramics International*. 2024;51(6):8156–8167. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.12.251>
10. Imbabi MS, Carrigan C, McKenna S. Trends and Developments in Green Cement and Concrete Technology. *International Journal of Sustainable Built Environment*. 2012;1(2):194–216. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2013.05.001>
11. Snellings R, Suraneni P, Skibsted J. Future and Emerging Supplementary Cementitious Materials. *Cement and Concrete Research*. 2023;171:107199. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107199>
12. Mehta PK, Monteiro PJM. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. Columbus: McGraw-Hill Education; 2014. 675 p. URL: <https://www.amazon.com/Concrete-Microstructure-Properties-Kumar-Monteiro/dp/933920476X?asin=0071797874&revisionId=&format=4&depth=1> (accessed: 03.09.2025).
13. Шведова М.А., Артамонова О.В., Ракитянская А.Ю. Нано- и микромодифицирование цементного камня комплексными добавками на основе SiO₂. *Вестник гражданских инженеров*. 2021;6(89):105–114. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2021-18-6-105-114>
14. Shvedova MA, Artamonova OV, Rakityanskaya AYU. Nano- and Micro-Modification of Cement Stone with Complex Additives Based on SiO₂. *Bulletin of Civil Engineers*. 2021;6(89):105–114. (In Russ.) <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2021-18-6-105-114>
14. Акиева Е.А. Прогнозирование марочной прочности цементных систем по результатам краткосрочных испытаний и минералогическому составу. Дис. канд. тех. наук. Белгород: БГТУ; 2006. 150 с. URL: <https://new-disser.ru/avtoreferats/01003301328.pdf> (дата обращения: 03.09.2025).
15. Akieva EA. *Forecasting the Grade Strength of Cement Systems Based on the Results of Short-Term Tests and Mineralogical Composition*. Cand.Sci. (Engineering) diss. Belgorod: BSTU; 2006. 150 p. (In Russ.) URL: <https://new-disser.ru/avtoreferats/01003301328.pdf> (accessed: 03.09.2025).
15. Харитонов А.М. Принципы прогнозирования свойств цементных композиционных материалов на основе структурно-имитационного моделирования. *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2009;1:141–152.
16. Kharitonov AM. Principles of Forecasting the Properties of Cement Composite Materials Based on Structural Simulation Modeling. *Proceeding of Petersburg Transport University*. 2009;1:141–152. (In Russ.)
16. Benson SM, Orr JrFM. Carbon Dioxide Capture and Storage. *MRS Bulletin*. 2008;33(4):303–305. <https://doi.org/10.1557/mrs2008.63>
17. Laissy MY, Rashed HF. 3D Printing Technology for Construction: A Structural Shift in Building Infrastructure. In: *Proceedings of the ICSDI 2024. Lecture Notes in Civil Engineering*. Mansour Y, Subramaniam U, Mustaffa Z, Abdelhadi A, Al-Atroush M, Abowardah E. (eds). Singapore: Springer; 2025. Vol. 558. P. 135–142. https://doi.org/10.1007/978-981-97-8345-8_17

18. Sharma M, Bishnoi S, Martirena F, Scrivener K. Limestone Calcined Clay Cement and Concrete: A State-of-the-Art Review. *Cement and Concrete Research*. 2021;149:106564. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106564>
19. Ishrat Hameed Alvi, Qi Li, Yunlu Hou, Chikezie Chimere Onyekwena, Min Zhang, Abdul Ghaffar. A Critical Review of Cement Composites Containing Recycled Aggregates with Graphene Oxide Nanomaterials. *Journal of Building Engineering*. 2023;69:105989. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.105989>
20. Смирнова О.М., Казанская Л.Ф. Бетоны на основе побочных продуктов промышленности: оценка воздействия на окружающую среду *Транспортные сооружения*. 2022;2(9):1–22. <https://doi.org/10.15862/05SATS222>
- Smirnova OM, Kazanskaya LF. Industrial Waste Products Based Concrete: Environmental Impact Assessment. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2022;2(9):1–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.15862/05SATS222>
21. Cuesta A, Ayuela A, Aranda MAG. Belite Cements and Their Activation. *Cement and Concrete Research*. 2021;140:106319. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106319>
22. Elahi MA, Shearer CR, Reza ANR, Saha AK, Khan NN, Hossain M, et al. Improving the Sulfate Attack Resistance of Concrete by Using Supplementary Cementitious Materials (SCMs): A Review. *Construction and Building Materials*. 2021;281:122628. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122628>
23. Поспелова Е.А., Черноситова Е.С., Лазарев Е.В. Статистический анализ качества российских цементов. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2017;7:180–186. https://doi.org/10.12737/article_5940f01b05bef8.10658659
- Pospelova E, Chernositova E, Lazarev EV. Statistical Quality Analysis of the Russian Cement. *Bulletin of Belgorod State Technological University Named after. V.G. Shukhov*. 2017;7:180–186. (In Russ.) https://doi.org/10.12737/article_5940f01b05bef8.10658659
24. Андреев В.В., Смирнова Е.Э. Цемент, содержащий портландцементный клинкер, гидроксид кальция и сульфатный компонент. Патент РФ, № 2079458 C1. 1997. 6 с. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2079458C1_19970520.pdf (дата обращения: 03.09.2025).
- Andreev VV, Smirnova EE. Cement Containing Portland Cement Clinker, Calcium Hydroxide and Sulfate Component. RF Patent, No 2079458 C1. 1997. 6 p. (In Russ.) URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2079458C1_19970520.pdf (accessed: 03.09.2025).
25. 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>
- 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>
26. Скобелев Д.О., Потапова Е.Н., Михайлиди Д.Х., Рудомазин В.В. Возможности использования шлаков в зеленом строительстве в контексте устойчивого развития Арктики. *Север и рынок: формирование экономического порядка*. 2024;2(84):88–99. <https://doi.org/10.37614/2220-802X.2.2024.84.007>
- Skobelev DO, Potapova EN, Mikhailidi DKh, Rudomazin VV. Blast Furnace Slag as a Construction Material for Arctic Sustainable Development. *The North and the Market: Forming the Economic Order*. 2024;2(84):88–99. (In Russ.) <https://doi.org/10.37614/2220-802X.2.2024.84.007>
27. Бастрыгина 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/10.37614/2949-1182.2022.1.2.007>
- 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. Natural Sciences and Humanities Series*. 2022;1(2):58–66. (In Russ.) <https://doi.org/10.37614/2949-1182.2022.1.2.007>
28. Потапов В., Кашутин А., Сердан А., Шалаев К., Горев Д. Нанокремнезем: повышение прочности бетонов. *Наноиндустрия*. 2013;3(41):40–49. URL: <https://www.nanoindustry.su/journal/article/3682?ysclid=mge0xusa4q171412223> (дата обращения: 03.09.2025).
- Potapov V, Kashutin A, Serdan A, Shalayev K, Gorev D. Nanosilica: Increase of Concrete Strength. *Nanoindustry*. 2013;3(41):40–49. (In Russ.) URL: <https://www.nanoindustry.su/journal/article/3682?ysclid=mge0xusa4q171412223> (accessed: 03.09.2025).
29. Zehra Funda Akbulut, Soner Guler. Enhancing the Resilience of Cement Mortar: Investigating Nano-SiO₂ Size and Hybrid Fiber Effects on Sulfuric Acid Resistance. *Journal of Building Engineering*. 2024;98:111187. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.111187>

30. Овчинникова Е.В. *Исследование влияния вида магнезильного флюса на фазовый состав агломерата с целью повышения его прочностных характеристик*. Дис. канд. тех. наук. Москва: МИСиС; 2018. 148 с.
- Ovchinnikova EV. Investigation of the Effect of the Type of Magnesia Flux on the Phase Composition of the Agglomerate in Order to Increase Its Strength Characteristics. Cand.Sci. (Engineering) diss. Moscow: MISiS; 2018. 148 p. (In Russ.)
31. Vipulanandan C, Demircan E. Designing and Characterizing the LEED Concrete for Drilled Shaft Applications. *GeoFlorida 2009. Contemporary Topics in Deep Foundations, ASCE*. Iskander M, Laefer DF, Hussein MH. (eds.). Orlando: ASCE; 2009. P. 56–64. [https://doi.org/10.1061/41021\(335\)7](https://doi.org/10.1061/41021(335)7)
32. Snellings R, Mertens G, Elsen J. Supplementary Cementitious Materials. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2012;74(1):211–278. <https://doi.org/10.2138/rmg.2012.74.6>
33. Askarian M, Fakhretaha Aval S, Joshaghani A. A Comprehensive Experimental Study on the Performance of Pumice Powder in Self-Compacting Concrete (SCC). *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2019;7(6):340–356. <https://doi.org/10.1080/21650373.2018.1511486>
34. Мин Хейн Хтет, Потапова Е.Н., Бурлов И.Ю. Кинетика минералообразования при синтезе сульфоалюминатного клинкера. *Успехи в химии и химической технологии*. 2022;36(3):106–108. URL: <https://www.muotr.ru/upload/iblock/7ee/zb2awjbx0eaaorpzycxwfskfquwwmu.pdf> (дата обращения: 03.09.2025).
- Min Hein Htet, Potapova EN, Burlov IY. Kinetics of Mineral Formation in the Synthesis of Sulfoaluminate Clinker. *Uspexhi v Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2022;36(3):106–108. (In Russ.) URL: <https://www.muotr.ru/upload/iblock/7ee/zb2awjbx0eaaorpzycxwfskfquwwmu.pdf> (accessed: 03.09.2025).
35. Фалалеева Н.А., Фалалеев А.Г. Об экологии и перспективах расширения сырьевой базы при производстве шлакопортландцементов. *Вестник МГСУ*. 2011;3(2):52–58. URL: <https://www.litres.ru/> (дата обращения: 03.09.2025).
- Falaleeva NA, Falaleev AG. Environmental Issues and Perspectives of New Raw Materials in Production of Slag Portland Cement. *Vestnik MGSU*. 2011;3(2):52–58. (In Russ.) URL: <https://www.litres.ru/> (accessed: 03.09.2025).
36. Vanderley MJ. On the Sustainability of the Concrete. *Industry and Environment*. 2003;26(2):1–7. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/read/7615945/on-the-sustainability-of-the-concrete-vanderley-moacyr-john-usp> (accessed: 03.09.2025).
37. Thomas M, Folliard KJ, 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>

Об авторе:

Елена Эдуардовна Смирнова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная экология» 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 01.09.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 27.09.2025

Принята к публикации / Accepted 09.10.2025

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 517.95

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-4-284-293>

Моделирование динамики концентрации вредоносных видов фитопланктона в Таганрогском заливе Азовского моря

Ю.В. Белова , А.Е. Чистяков

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

✉ yvbelova@yandex.ru

EDN: YTBWWQ

Аннотация

Введение. Исследователи из Южного научного центра РАН путем натурных измерений неоднократно фиксировали обильные «цветения» микроводорослей в Таганрогском заливе. В связи с уменьшением биоразнообразия и ухудшением качества вод Азовского моря вследствие сокращения пресноводного стока, повышения температуры воды и увеличенного притока биогенных веществ риск развития токсичных фитопланктонных популяций еще больше возрастает, что непосредственно угрожает всей экосистеме, экономике региона и здоровью местного населения. Повышение среднегодовой температуры, увеличение объема поступлений соединений азота и фосфора как последствий урбанизации и деятельности сельскохозяйственных предприятий приводят к ускоренному росту цианобактерий, которое сопровождается обильным цветением и потенциальной токсичностью, особенно в Таганрогском заливе. В настоящее время, чтобы отслеживать изменения концентрации фитопланктонных популяций, используются модели на уровне лаг-процедур и реактивных норм. Однако применение их в условиях Азовского моря требует учета специфики перепадов глубин, солености и сезонных характеристик, то есть комплексного подхода к определению концентрации вредного планктона. В связи с этим целью данного исследования является построение среднесрочных прогнозов развития цианобактерий с использованием комплексного подхода к определению концентрации планктона, основанного на применении методов математического моделирования.

Материалы и методы. Прогнозирование динамики фитопланктонных популяций осуществлялось на основе трехмерной нестационарной математической модели, основанной на системе нестационарных уравнений в частных производных с нелинейными функциями источников. Входными данными для модели являлись значения компонент вектора водного потока, полученные на основе модели гидродинамики, а показатели солености, температуры, концентрации биогенных веществ и фитопланктонных популяций взяты из результатов многолетних наблюдений. Разностная аппроксимация модели выполнена на основе явно-неявных схем расщепления. Для построения трехмерной области вычислений использовался метод интерполяции значений глубин. Также этот метод применен для интерполяции значений солености и температуры по картографической информации.

Результаты исследования. В ходе численного эксперимента, проведенного с учетом влияния солености и температуры, лимитирования биогенными веществами фитопланктонных популяций получены трехмерные изображения распределения цианобактерий и зеленых водорослей в Таганрогском заливе в вегетационный период. Результатом применения метода интерполяции стали достаточно гладкие в точках склейки карты глубин, распределения солености и температуры, которые являются входными данными для разработанной модели по определению динамики концентрации вредоносных видов фитопланктона.

Обсуждение. Представленная в работе математическая модель динамики фитопланктонных популяций учитывает условия развития синезеленых и зеленых водорослей, оказываемое на них влияние со стороны окружающей среды. Она позволяет получать трехмерное изображение распределения планктона и дает возможность определять ареал распространения синезеленых и зеленых водорослей в Таганрогском заливе и в Азовском море.

Заключение. Описанные математическая модель и методы математического моделирования встроены в программный комплекс, что дает возможность моделировать и прогнозировать все изменения, которые происходят и будут происходить в водах Таганрогского залива. Это, несомненно, будет способствовать принятию обоснованных решений в деле дальнейшего развития акватории Азовского моря.

Ключевые слова: модель динамики фитопланктонных популяций, биологическая кинетика, методы интерполяции, опасные явления, прогноз развития природных систем

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

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22–71–10102–II, <https://rscf.ru/project/22-71-10102-II/>

Для цитирования. Белова Ю.В., Чистяков А.Е. Моделирование роста концентрации вредоносных видов фитопланктона в Таганрогском заливе Азовского моря. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(4):284–293. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-4-284-293>

Original Empirical Research

Modeling the Dynamics of Harmful Phytoplankton Species Concentration in Taganrog Bay of the Azov Sea

Yulia V. Belova  , Aleksandr E. Chistyakov 
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
 yvbelova@yandex.ru

Abstract

Introduction. Researchers at the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences have repeatedly observed abundant microalgae blooms in Taganrog Bay, which negatively impact the health of people, animals, the environment, as well as the economy. Given the increasing depletion of biodiversity and deterioration of water quality in the Azov Sea due to reduced freshwater inflow, rising water temperatures, and increased nutrient runoff, the risk of toxic phytoplankton populations is increasing. This threatens the ecosystem, regional economy, and health of local residents. The rise in average annual temperatures and increased nitrogen and phosphorus runoff caused by urbanization and agriculture leads to accelerated growth of cyanobacteria, particularly during warmer months. This results in abundant blooms with the potential for toxicity, especially in Taganrog Bay. Models of phytoplankton population dynamics exist at the lag-phase and reactive norm levels. However, their adaptation to the conditions of the Azov Sea requires the consideration of the specific variations in depth, salinity, and seasonal characteristics. The aim of this study is to construct medium-term forecasts for the development of cyanobacteria using an integrated approach based on the application of mathematical modeling methods.

Materials and Methods. Phytoplankton population dynamics were predicted using a three-dimensional, non-stationary mathematical model based on a system of non-stationary partial differential equations with nonlinear source functions. The input data for the model included values of water flow vector components from a hydrodynamic model, as well as measurements of salinity, temperature, nutrient concentrations, and phytoplankton populations from long-term observations. Difference approximation of the model was performed using explicit-implicit splitting schemes. A depth interpolation method was used to construct a three-dimensional computational domain. The described method was also applied to interpolate salinity and temperature values based on cartographic information.

Results. A numerical experiment yielded three-dimensional distributions of cyanobacteria and green algae in Taganrog Bay during the growing season. The experiment considered the effects of salinity and temperature, as well as the nutrient limitation of phytoplankton populations. The interpolation method resulted in a depth map, salinity, and temperature distributions that were relatively smooth at the junction points, and served as input data for the model.

Discussion. The mathematical model of the dynamics of phytoplankton populations presented in this paper takes into account the conditions for the development of blue-green and green algae and their environmental impact. It allows us to create a three-dimensional image of plankton distribution and determine the areas where blue-green and green algae are most abundant in Taganrog Bay and the Azov Sea.

Conclusion. The described mathematical model and mathematical modeling methods have been integrated into a software package. This allows us to simulate and predict all changes that have occurred and will occur in the waters of Taganrog Bay. This, in turn, will undoubtedly contribute to informed decision-making in the future development of the Azov Sea.

Keywords: model of phytoplankton population dynamics, biological kinetics, interpolation methods, hazardous phenomena, forecast of natural systems development

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

Funding Information. The research was done with the financial support of the Russian Science Foundation, grant No. 22–71–10102–II, <https://rscf.ru/project/22-71-10102-II/>

For Citation. Belova YuV, Chistyakov AE. Modeling the Dynamics of Harmful Phytoplankton Species Concentration in Taganrog Bay of the Azov Sea. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(4):284–293. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-4-284-293>

Введение. Обильное цветение вредоносных видов фитопланктона является проблемой многих водоемов России и всего мира. В большей мере этому процессу подвержены прибрежные системы эстуарного типа, такие как Таганрогский залив, в силу ряда особенностей: обильный сток биогенных веществ с речными водами, равномерный прогрев из-за небольшой глубины, перепады глубин и солености. Вспышки цветения потенциально токсичных водорослей несут угрозу здоровью местного населения, наносят вред рыбному хозяйству, могут приводить к заморным явлениям и другим негативным последствиям. В Таганрогском заливе опасными являются микроводоросли, относящиеся к отделу цианобактерий, их биомасса в летний период составляет около 70 %, а иногда достигает 90 % от общей биомассы фитопланктона [1].

Цианобактерии также называют цианобактериями, или менее формально синезелеными водорослями. Этот вид фитопланктона отличают от других видов несколько особенностей, являющихся преимуществами в их конкурентной борьбе за ресурсы, что и объясняет высокую долю их биомассы. В первую очередь, цианобактерии являются прокариотами и имеют очень простую клеточную структуру, подобную бактериальной, без ядра, митохондрий, аппарата Гольджи или эндоплазматической сети. По отдельности цианобактерии невелики, по сравнению с другими видами водорослей, но они часто образуют массивные колонии или нити. Плавающие синезеленые водоросли обеспечивают газовые вакуоли, которые позволяют им менять плотность, что приводит к движению их в водной толще в вертикальном направлении [2]. Такой механизм обеспечивает лучший доступ либо к свету, либо к питательным веществам [3], а наличие питательных веществ в водоеме играет большую роль в изменении плотности [4]. Все это дает цианобактериям преимущество перед другими видами планктона. Кроме того, турбулентная диффузия и скорость движения водной среды в вертикальном направлении могут влиять на вертикальную миграцию цианобактерий [5].

В прибрежных системах цианобактерии представляют интерес по причине их потенциальной токсичности, они к тому же играют важную роль в производстве первичной продукции фитопланктона. Токсины, выделяемые цианобактериями, у разных видов свои и могут быть нейротоксинами, гепатотоксинами или эндотоксинами. Токсины не всегда выделяются во время цветения. В настоящее время проводятся исследования, направленные на изучение природы токсинов и факторов, вызывающих их выделение [6].

В водах Таганрогского залива наиболее распространены *Aphanizomenon flos-aquae*, *Microcystis aeruginosa*, *Anabaena spp.* Эти виды могут выделять яды, относящиеся к гепатотоксинам и нейротоксинам [7].

Исследованию цветения потенциально вредоносных цианобактерий посвящено множество отечественных и зарубежных работ. В работе [8] исследуется роль фосфора в стимулировании развития синезеленых водорослей. В исследовании [9] моделируется процесс вертикального движения цианобактерий вида *Microcystis*, которое позволяет им занимать доминирующее положение в период цветения водоема. Влияние интенсивности светового излучения и перемешивания вод под действием ветра на развитие водорослей моделировалось с помощью систем Ansys Fluent и MATLAB, что описано в работе [10]. Авторами исследования [11] для прогнозирования развития синезеленых водорослей использовались авторегрессионные и многомерные версии линейной регрессии, случайного леса и нейронных сетей Long Short-Term Memory (LSTM). В работе [12] предлагается нестационарная трехкомпонентная математическая модель для изучения конкуренции между двумя типами фитопланктона (в том числе токсичного) и поглощения их зоопланктоном.

Проведенный авторами обзор современных исследований выявил пробел в научном знании, который заключается в отсутствии комплексного подхода, связывающего авторскую модель динамики фитопланктонных популяций, построенную на основе уравнений конвекции-диффузии, с моделью гидродинамики, в игнорировании влияния абиотических факторов, в использовании одно-, двумерных моделей и готовых комплексов программ, не дающих достоверных результатов для прибрежных систем. Авторы исследования считают, что этот пробел возможно устранить путем применения комплексного подхода к моделированию динамики фитопланктона в прибрежных системах Таганрогского залива, который учитывал бы их существенные особенности: значительные перепады глубин, солености, сложную геометрию расчетной области, повышенный приток биогенных веществ и др.

Согласно постановлению Правительства РФ № 219 от 10 апреля 2007 г., одной из целей мониторинга водных объектов является «своевременное выявление и прогнозирование негативного воздействия вод, а также развития негативных процессов, влияющих на качество воды в водных объектах и их состояние, разработка и реализация мер по предотвращению негативных последствий этих процессов»¹. Развитие методов математического моделирования и разработка на их основе программных комплексов позволяют получать прогнозы развития опасных явлений в сложных природных системах. Такие данные могут быть переданы лицам, принимающим решения, для контроля и управления ситуацией в прибрежных районах. Одним из способов реабилитации

¹ Об утверждении Положения об осуществлении государственного мониторинга водных объектов. Постановление Правительства РФ № 219 от 10 апреля 2007 года. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902037173/titles/656010> (дата обращения: 25.11.2025).

Таганрогского залива могут стать меры по замещению синезеленых водорослей зелеными. В работе [13] отмечается, что в тех областях водоема, где увеличилось количество зеленых водорослей по отношению к синезеленым и диатомовым, повысилась способность водного объекта к самоочищению. В работе [14] исследована динамика развития микроводорослей в местах забора питьевой воды, отмечено угнетающее влияние цветения цианобактерий, предложена система мониторинга динамики фитопланктонных популяций.

В связи с необходимостью прогнозировать возникновение опасных «цветений» микроводорослей построение комплексных математических моделей развития фитопланктонных популяций (с учетом адвективного и диффузионного переносов, погодных условий, геометрии расчетной области, лимитирования роста микроводорослей наличием питательных веществ, режимов солености и температуры [15]) обладает высокой актуальностью. Применение предложенных в статье математических методов обусловлено тем, что они дают достаточно высокую точность моделирования процессов, происходящих в сложных природных системах при небольшом наборе входных данных, а также выходят дешевле, чем экспедиционные исследования.

Целью данного исследования является среднесрочное прогнозирование развития синезеленых водорослей в период вегетации с применением методов математического моделирования. Для этого авторами решены следующие задачи:

1. Построение математической модели фитопланктонных популяций, дополненной начальными и граничными условиями. Модель оснащена входными данными: значениями вектора водного потока, полученными на основе модели гидродинамики, показателями глубин, солености и температуры, концентраций синезеленых и зеленых водорослей, а также соединений биогенных веществ, основанных на результатах многолетних наблюдений.
2. По картографической информации с применением авторского алгоритма интерполяции распределены значения глубин, солености и температуры воды.
3. Построен разностный аналог непрерывной задачи.
4. Реализована модель динамики фитопланктонных популяций в виде программного модуля.

Материалы и методы. Исследование основывается на трехмерной модели динамики фитопланктонных популяций, построенной на системе уравнений конвекции-диффузии-реакции с нелинейными функциями источников. Разностная аппроксимация модели выполнена на основе явно-неявных схем расщепления. Для построения трехмерной области вычислений применен авторский метод интерполяции значений глубин. Он также использован для интерполяции значений солености и температуры по картографической информации.

Трехмерная модель динамики фитопланктонных популяций базируется на работах Сухинова А.И., Якушева Е.В. [16, 17] и строится на системе нестационарных уравнений конвекции-диффузии-реакции:

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} + \frac{1}{2}(\nabla \cdot (\mathbf{V}q_i) + (\mathbf{V} \cdot \nabla)q_i) = \text{div}(\mu \cdot \nabla q_i) + R_{q_i}, \quad (1)$$

где q_i — концентрация i -ой компоненты, мг/л, $i = \overline{1,9}$; $\mathbf{V} = (u, v, w)$ — вектор скорости водного потока, м/с; $\mu = \{\mu, \mu, \nu\}$ — коэффициенты турбулентного обмена, м²/с; R_{q_i} — нелинейная функция-источник биогенных веществ, мг/(л с); ∇ — градиент; 1 — синезеленая водоросль *Aphanizomenon flos-aquae* (потенциально токсичная); 2 — зеленая водоросль *Chlorella Vulgaris* (входит в основание пищевой пирамиды); 3 — растворенный органический фосфор; 4 — взвешенный органический фосфор; 5 — фосфаты; 6 — нитраты; 7 — нитриты; 8 — аммиак; 9 — растворенный кислород: в основном попадает в водную среду с поверхности водоема в результате перемешивания (главным образом волнения под действием ветра), выделяется водными растениями в процессе фотосинтеза при наличии света и потребляется в процессе дыхания при отсутствии света.

Уравнения, описывающие циклы превращений моделируемых субстанций, приведены в работе [18].

Скорость роста фитопланктонных популяций определяется наличием питательных веществ (фосфатов, нитратов, нитритов и аммония), оптимальностью значений температуры, солености и освещенности. Биомасса уменьшается за счет экскреции и отмирания. Зеленые водоросли конкурируют с цианобактериями за ресурсы. Скорость роста фитопланктонных популяций выражается функцией зависимости от солености S , температуры T , освещенности I и достаточного количества молекул растворенного кислорода в воде. Также рост микроводорослей зависит от концентрации основных питательных веществ — соединений азота (нитраты NO_3 , нитриты NO_2 , аммиак NH_4) и фосфора (фосфаты PO_4 , растворенный органический фосфор DOP , взвешенный органический фосфор POP). Для системы (1) ставится начально-краевая задача, добавляются соответствующие начальные и граничные условия [18].

Численное решение задачи динамики фитопланктонных популяций заключается в преобразовании входных данных с использованием методов математического моделирования. При решении задачи (1) в качестве входных данных используются значения компонент вектора водного потока в узлах расчетной сетки, он рассчитывается на основе модели гидродинамики [19], значений солености S_0 , температуры T_0 и концентраций q_{0i} в момент времени t_0 .

Для разностной аппроксимации область моделирования покрывается расчетной сеткой $\omega_\tau \times \omega_h$, равномерной по времени и трем пространственным направлениям:

$$\omega_\tau = \{t_n = n\tau, n = 0, 1, \dots, N, N\tau = T\}, \omega_h = \{x_i = ih_x, y_j = jh_y, z_k = kh_z; \\ i = 0, \dots, N_x, j = 0, \dots, N_y, k = 0, \dots, N_z, N_x h_x = L_x, N_y h_y = L_y, N_z h_z = L_z\},$$

где τ — шаг по времени, $0 \leq t \leq T$; h_x, h_y, h_z — шаги в пространственных направлениях; L_x, L_y, L_z — максимальные размеры расчетной области в пространстве.

Для дискретизации задачи (1) использованы явно- неявные схемы:

$$\begin{aligned} & \frac{q_{i,j,k}^{n+1} - q_{i,j,k}^n}{\tau} + u_{i+1/2,j,k} \frac{q_{i+1,j,k}^n - q_{i,j,k}^n}{2h_x} + u_{i-1/2,j,k} \frac{q_{i,j,k}^n - q_{i-1,j,k}^n}{2h_x} + v_{i,j+1/2,k} \frac{q_{i,j+1,k}^n - q_{i,j,k}^n}{2h_y} + \\ & + v_{i,j-1/2,k} \frac{q_{i,j,k}^n - q_{i,j-1,k}^n}{2h_y} + w_{i,j,k+1/2} \frac{q_{i,j,k+1}^{n+\sigma} - q_{i,j,k}^{n+\sigma}}{2h_z} + w_{i,j,k-1/2} \frac{q_{i,j,k}^{n+\sigma} - q_{i,j,k-1}^{n+\sigma}}{2h_z} = \\ & = \mu \frac{q_{i+1,j,k}^n - q_{i,j,k}^n}{h_x^2} - \mu \frac{q_{i,j,k}^n - q_{i-1,j,k}^n}{h_x^2} + \mu \frac{q_{i,j+1,k}^n - q_{i,j,k}^n}{h_y^2} - \\ & - \mu \frac{q_{i,j,k}^n - q_{i,j-1,k}^n}{h_y^2} + \nu \frac{q_{i,j,k+1}^{n+\sigma} - q_{i,j,k}^{n+\sigma}}{h_z^2} - \nu \frac{q_{i,j,k}^{n+\sigma} - q_{i,j,k-1}^{n+\sigma}}{h_z^2} + R_{i,j,k}^n, \end{aligned}$$

где $q^{n+\sigma} = \sigma q^{n+1} + (1 - \sigma)q^n$, $\sigma \in [0, 1]$ — вес схемы.

Результатом применения такого подхода к аппроксимации уравнений конвекции-диффузии-реакции является цепочка двумерно-одномерных задач. В направлении осей Ox и Oy аппроксимация производится симметричной схемой с весами (Кранка-Николсона). В направлении оси Oz используется явная схема, а для программной реализации — метод прогонки.

Авторский метод интерполяции значений глубин, солёности и температуры применен для построения равномерной пространственно-временной сетки. Для определения границ области вычислений по вертикали используется картографическая информация, например лоцманские карты, применяемые для нужд судоходства и рыболовной промышленности. Часто информация о глубинах водоема задана в определенных точках или изолиниями уровня и может отсутствовать в точках расчетной сетки. На рис. 1 приведено исходное изображение рельефа дна Азовского моря, на котором глубины обозначены изолиниями уровня.



Рис. 1. Изолинии уровня глубин Азовского моря

Подобные карты не обладают достаточной степенью гладкости в точках склейки, поэтому в данной работе применен алгоритм интерполяции [20]. Для построения функции рельефа дна с достаточной степенью гладкости решается уравнение:

$$\Delta H - \frac{h^2}{12} \Delta^2 H = 0. \quad (2)$$

Фундаментальная система решений уравнения (2) имеет вид:

$$H_1(x) = 1, H_2(x) = x, H_3(x) = ch(kx), H_4(x) = sh(kx), k = \sqrt{12}/h. \quad (3)$$

Интерполяция значений глубин осуществляется на основе сплайнов функции (3).

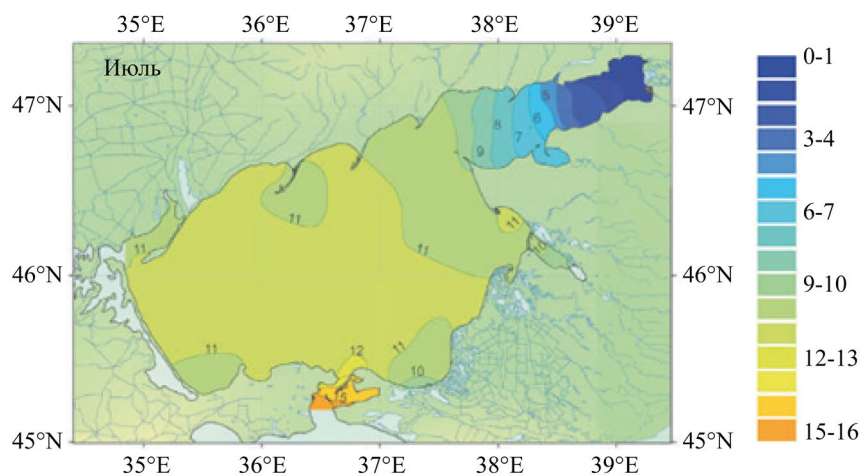
Алгоритм работы программного модуля: на вход подается файл в формате .txt, содержащий массив с изолиниями уровня глубин или точками, обозначающими глубины, далее строится схема четвертого порядка точности для оператора диффузионного переноса [20]. Полученные сеточные уравнения решаются адаптивным модифицированным попеременно-треугольным методом вариационного типа. На выходе получаем текстовый файл, содержащий массив значений глубин Азовского моря.

Результаты исследования. В результате исследования авторами получен среднесрочный прогноз распределения синезеленых и зеленых водорослей на основе комплексного подхода с использованием моделей динамики фитопланктонных популяций и гидродинамики. На рис. 2 представлен результат работы авторского алгоритма — восстановленная карта глубин Азовского моря.

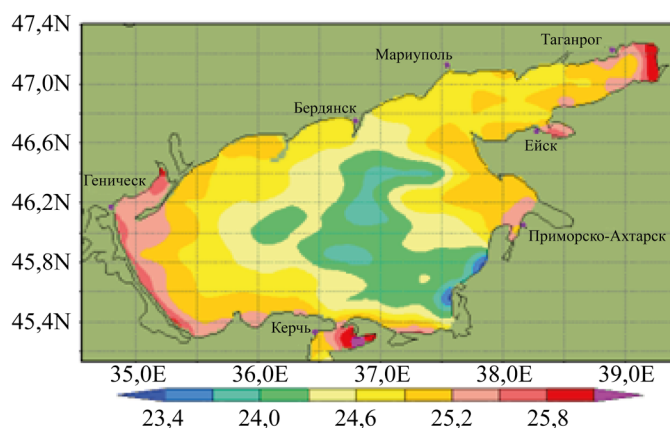


Рис. 2. Полученное изображение рельефа дна Азовского моря

На основе разработанного метода также были получены пригодные для моделирования достаточно гладкие распределения значений солёности и температуры, изображения которых приведены на рис. 3.



а)



б)

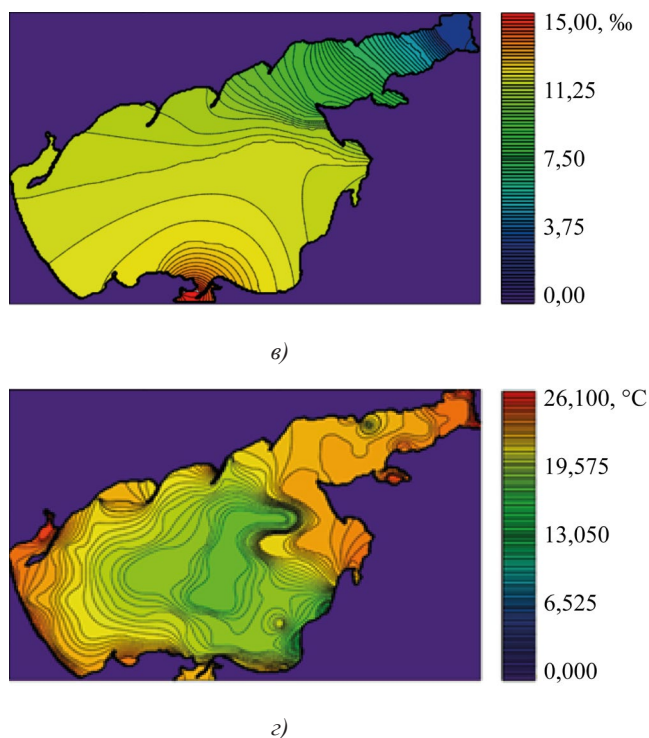


Рис. 3. Применение метода интерполяции: a — начальное изображение изогалин [21]; b — начальное изображение изотерм²; c — полученное изображение распределения солёности S , ‰; d — полученное изображение распределения температуры T , °C

Полученные распределения глубин, солёности и температуры были использованы в качестве входных данных для решения задачи (1). На рис. 4 изображены концентрации двух фитопланктонных популяций, полученные в результате вычислительного эксперимента. В качестве входных данных для программного модуля подавались равномерные распределения моделируемых субстанций, временной интервал — 30 дней.

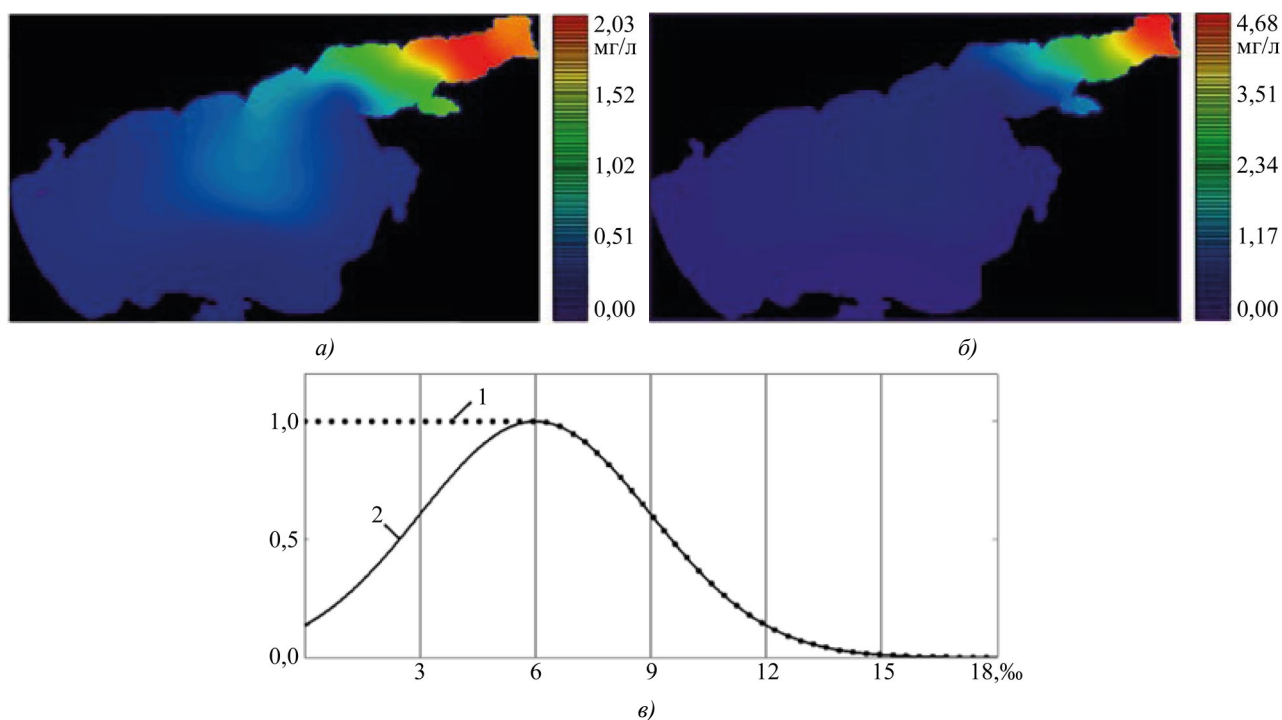


Рис. 4. Результаты решения задачи динамики фитопланктонных популяций: a — распределение концентраций синезеленых водорослей q_1 , мг/л; b — распределение концентраций зеленых водорослей q_2 , мг/л; c — график зависимости коэффициента роста фитопланктонных популяций от солёности S : 1 — зеленые; 2 — синезеленые водоросли

² Оперативный модуль ЕСИМО. Температура поверхности воды в Азовском море. Единая государственная система информации об обстановке в мировом океане. URL: http://hmc.meteorf.ru/sea/azov/sst/sst_azov.html (дата обращения: 25.11.2025).

Обсуждение. Интерполяции распределения глубин, солености и температуры, полученные с помощью представленного авторами данной работы алгоритма, обладают достаточной степенью гладкости в точках склейки. Проведенный вычислительный эксперимент показал, что ареал у синезеленых водорослей шире, чем у зеленых водорослей — они распространены по всему Таганрогскому заливу и течениями выносятся в основную часть Азовского моря.

Математическая модель динамики фитопланктонных популяций учитывает ограничение питательными веществами развития микроводорослей, влияние гидрологического режима на значение коэффициента роста, географическую динамику под действием процессов конвекции и диффузии, кислородный режим. Использование данной модели в комплексе с моделью гидродинамики позволяет получить трехмерные изображения распределения моделируемых субстанций и учесть, помимо биологических особенностей развития фитопланктона, пространственно-временную динамику биомассы и особенности геометрии расчетной области.

Заключение. Описанная математическая модель и предложенные методы встроены в программный комплекс Azov3D, что позволяет прогнозировать развитие опасных цветений фитопланктонных популяций (эвтрофикацию) при различных погодных условиях, учитывать изменения солености, температуры, картины течений, наличие питательных веществ и кислородный режим. Построенные прогнозы могут быть использованы в разработке стратегии по управлению устойчивым развитием такого важного природного объекта, как Таганрогский залив. В настоящее время разрабатываются различные стратегии управления этой сложной водной экосистемой, определяются механизмы ее безопасности — возможные сценарии предотвращения заморных явлений и эвтрофикации. Методы математического моделирования, развитию которых посвящена данная статья, представляют относительно недорогой и оперативный инструментальный мониторинга и прогнозирования состояния водных экосистем.

Список литературы / References

1. Ковалева Г.В. Проблема «цветения» воды в Азовском море. В: *Труды Южного научного центра Российской академии наук. «Моделирование и анализ опасных природных явлений в Азовском регионе»*. Т. VIII. Ростов-на-Дону: Южный научный центр Российской академии наук; 2020. С. 122–148.
2. Kovaleva GV. Problem of Water Bloom in the Sea of Azov. In: *Proceedings of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences “Modeling and Analysis of Natural Hazards in the Azov Region”*. Vol. VIII. Rostov-on-Don: Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; 2020. P. 122–148. (In Russ.)
3. Overman C, Wells S. Modeling Cyanobacteria Vertical Migration. *Water*. 2022;14(6):953. <https://doi.org/10.3390/w14060953>
4. Gerbersdorf SU, Schubert H. Vertical Migration of Phytoplankton in Coastal Waters with Different UVR Transparency. *Environmental Sciences Europe*. 2011;23:36. <https://doi.org/10.1186/2190-4715-23-36>
5. Brookes JD, Ganf GG. Variations in the Buoyancy Response of Microcystis Aeruginosa to Nitrogen, Phosphorus and Light. *Journal of Plankton Research*. 2001;23(12):1399–1411. <https://doi.org/10.1093/plankt/23.12.1399>
6. Hongru Zhao, Wei Zhu, Huaimin Chen, Xiaohua Zhou, Ruochen Wang, Ming Li. Numerical Simulation of the Vertical Migration of Microcystis (Cyanobacteria) Colonies Based on Turbulence Drag. *Journal of Limnology*. 2017;76(1):190–198. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2016.1501>
7. Chorus I, Welker M (eds.). *Toxic Cyanobacteria in Water*, 2nd edition. Boca Raton (FL): CRC Press; 2021. 858 p.
8. Матишов Г.Г., Фуштей Т.В. К проблеме вредоносных «цветений воды» в Азовском море. *Электронный журнал «Исследовано в России»*. 2003;(6):213–225.
9. Matishov GG, Fushitei TV. On the Problem of Harmful Algal Blooms in the Waters of Sea of Azov. *Electronic Journal “Researched in Russia”*. 2003;(6):213–225. (In Russ.)
10. Man Xiao, Burford MA, Wood SA, Aubriot L, Ibelings BW, Prentice MJ, et al. Schindler's Legacy: From Eutrophic Lakes to the Phosphorus Utilization Strategies of Cyanobacteria. *FEMS Microbiology Reviews*. 2022;46(6):fuac029. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuac029>
11. Wei Zhu, Ganyu Feng, Huaimin Chen, Ruochen Wang, Yongqin Tan, Hongru Zhao. Modelling the Vertical Migration of Different-Sized Microcystis Colonies: Coupling Turbulent Mixing and Buoyancy Regulation. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25(30):30339–30347. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3041-8>
12. Zongpu Xue, Wei Zhu, Yuyang Zhu, Xihui Fan, Huaimin Chen & Ganyu Feng. Influence of Wind and Light on the Floating and Sinking Process of Microcystis. *Scientific Reports*. 2022;12:5655. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08977-5>
13. Fournier C, Fernandez-Fernandez R, Cirés S, López-Orozco JA, Besada-Portas E, Quesada A. LSTM Networks Provide Efficient Cyanobacterial Blooms Forecasting Even with Incomplete Spatio-Temporal Data. *Water Research*. 2024;267:122553. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122553>

12. Neverova G, Zhdanova O. Mathematical Modeling of the Evolutionary Dynamics of a Planktonic Community Using a Discrete-Time Model. *Mathematics*. 2023;11(22):4673. <https://doi.org/10.3390/math11224673>
13. Kang Peng, Zhixiong Hu, Rui Pang, Mingyue Li, Li Liu. Spatiotemporal Dynamics and Driving Factors of Phytoplankton Community Structure in the Liaoning Section of the Liao River Basin in 2010, 2015, and 2020. *Water*. 2025;17(15):2182. <https://doi.org/10.3390/w17152182>
14. Bo Li, Jing Li, Yuehang Hu, Shaozhe Cheng, Shouchun Li, Xuezhi Zhang. Algal Community Dynamics in Three Water Intakes of Poyang Lake: Implications for Drinking Water Safety and Management Strategies. *Water*. 2025;17(13):2034. <https://doi.org/10.3390/w17132034>.
15. Кудинов Н.В., Филина А.А., Никитина А.В., Бондаренко Д.В., Развеева И.Ф. Моделирование вертикальных движений морской воды в стратифицированных водоемах. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(2):212–224. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-2-212-224>
- Kudinov NV, Filina AA, Nikitina AV, Bondarenko DV, Razveeva IF. Simulation of Vertical Movements of Seawater in Stratified Reservoirs. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(2):212–224. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-2-212-224>
16. Novikov M, Pakhomova S, Berezina A, Yakushev E. Model-Based Analysis of the Oxygen Budget in the Black Sea Water Column. *Water*. 2024;16(17):2380. <https://doi.org/10.3390/w16172380>
17. Yakushev EV, Pollehne F, Jost G, Kuznetsov I, Schneider B, Umlauf L. Analysis of the Water Column Oxidic/Anoxic Interface in the Black and Baltic Seas with a Numerical Model. *Marine Chemistry*. 2007;107:388–410. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2007.06.003>
18. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Белова Ю.В., Кузнецова И.Ю. Аналитическое и численное исследование задачи динамики планктонных популяций при наличии микропластика. *Математическое моделирование*. 2024;36(3):95–114. <https://doi.org/10.20948/mm-2024-03-07>
- Sukhinov AI, Chistyakov AE, Belova YuV, Kuznetsova IYu. Analytical and Numerical Study of the Problem of Plankton Population Dynamics in the Presence of Microplastics. *Matematicheskoe Modelirovanie*. 2024;36(3):95–114. (In Russ.) <https://doi.org/10.20948/mm-2024-03-07>
19. Сухинов А.И., Кузнецова И.Ю. Математическая модель транспорта трехкомпонентной взвеси. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2023;7(3):39–48. <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2023-7-3-39-48>
- Sukhinov AI, Kuznetsova IYu. Mathematical Model of Three-Component Suspension Transport. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2023;7(3):39–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2023-7-3-39-48>
20. Чистяков А.Е., Семенякина А.А. Применение методов интерполяции для восстановления донной поверхности. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2013;4(141):21–28.
- Chistyakov AE, Semenyakina AA. Use of Interpolation Methods for Recovery Bottom Surface. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2013;4(141):21–28. (In Russ.)
21. Матишов Г.Г., Бердников С.В., Жичкин А.П., Макаревич П.Р., Дженюк С.Л., Кулыгин В.В. и др. *Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария (1878–2013)*. Ростов-на-Дону: Южный научный центр РАН; 2014. 256 с.
- Matishov GG, Berdnikov SV, Zhichkin AP, Makarevich PR, Dzenyuk SL, Kulygin VV, et al. *Atlas of Climatic Changes in Large Marine Ecosystems of the Northern Hemisphere (1878-2013)*. Rostov-on-Don: Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; 2014. 256 p. (In Russ.)

Об авторах:

Юлия Валериевна Белова, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Математика и информатика» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), yvbelova@yandex.ru

Александр Евгеньевич Чистяков, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), cheese_05@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

А.Е. Чистяков: разработка концепции, научное руководство.

Ю.В. Белова: написание черновика рукописи, визуализация.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Yulia V. Belova, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Department of Mathematics and Computer Science, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), yvbelova@yandex.ru

Aleksandr E. Chistyakov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Mathematics and Computer Science, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), cheese_05@mail.ru

Claimed Contributorship:

AE Chistyakov: conceptualization, supervision.

YuV Belova: writing – original draft preparation, visualization.

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

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 12.09.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 08.10.2025

Принята к публикации / Accepted 16.10.2025

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 614.84

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-4-294-304>


Обзор предметного поля

Исследование деятельности добровольных пожарных обществ (на примере Удмуртской Республики)

С.В. Широбоков , Е.А. Касаткина

Удмуртский государственный университет, г. Ижевск, Российская Федерация

kora-tay@yandex.ru

EDN: RPBVLG

Аннотация

Введение. В современных условиях обеспечение пожарной безопасности — одна из приоритетных задач государственного управления во многих странах. Проблемы организации профессиональной пожарной охраны частично решаются за счёт института добровольных пожарных как в России, так и за рубежом. Трудности функционирования добровольных пожарных обществ во многом сходны, независимо от уровня социально-экономического развития территории. В Российской Федерации сохраняются заметные диспропорции в обеспечении пожарной безопасности, особенно в небольших и удалённых населённых пунктах, где содержание профессиональной пожарной охраны экономически затратно. Между тем принцип равной доступности и равного качества социальных услуг остаётся ключевым в государственной и региональной политике. Значительная роль в системе пожарной безопасности отводится добровольным пожарным формированиям. На практике одной из серьёзных проблем является недостаток информированности и низкая мотивация граждан к участию в добровольной пожарной охране и поддержке развития этого института. Цель исследования — изучить роль добровольных пожарных обществ (далее ДПО), проанализировать особенности их деятельности за рубежом с целью выявления общих практик и оценить восприятие данного института населением.

Материалы и методы. Исследование включало две взаимосвязанные части. Сначала проведён обзор источников, посвящённых роли добровольных пожарных в зарубежных странах, и анализ функционирования добровольных пожарных обществ в Российской Федерации. Во второй части выполнено социологическое обследование с последующей обработкой полученных данных. Обработка ответов предполагала агрегирование материалов и выявление причинно-мотивирующих факторов, формирующих позиции респондентов. Для региональной части исследования проанализированы статистические данные о деятельности добровольных пожарных обществ и динамике численности добровольцев с целью оценки вклада добровольных пожарных обществ в систему обеспечения пожарной безопасности.

Результаты исследования. Установлено, что институт добровольных пожарных широко распространён в системе пожаротушения как в России, так и за рубежом. Подходы к организации, финансированию и материальному стимулированию добровольцев в разных странах содержат как общие черты, так и специфические различия, в том числе в восприятии института населением. Зафиксирован рост числа филиалов ВДПО и увеличившееся участие подразделений ДПО в тушении пожаров в России, что свидетельствует об актуальности и эффективности их деятельности. Анализ распределения числа пожаров по участвующим в тушении субъектам показал ежегодное увеличение доли добровольных пожарных. Вместе с тем в Удмуртской Республике наблюдается сокращение общей численности добровольцев. По данным социологического опроса, подавляющее большинство респондентов не готовы вступать в добровольную пожарную охрану или активно содействовать развитию института.

Обсуждение. Работа подтверждает востребованность и социальную значимость добровольных пожарных как в России, так и за рубежом. Одновременно выявлены системные проблемы как на национальном, так и на региональном уровнях в организации деятельности ДПО. Наблюдается невысокая готовность населения вступать в ряды добровольцев; определены основные барьеры, препятствующие участию. Анализ позволил выделить мотивы и условия, при которых респонденты готовы принимать участие в деятельности ДПО. Полученные результаты указывают на необходимость комплексного подхода к повышению статуса добровольного пожарного и разработки мер, повышающих привлекательность этой деятельности для молодёжи.

© Широбоков С.В., Касаткина Е.А., 2025

Заключение. Исследования подтверждают важную роль добровольных пожарных в обеспечении пожарной безопасности в исследуемой предметной области как в России, так и за рубежом. Обзор показал, что ключевые проблемы организации ДПО являются сопоставимыми для большинства государств; эти выводы подтверждаются результатами анализа. В числе основных результатов — данные о динамике численности добровольных пожарных в регионе и факторы, определяющие мотивацию населения к участию в деятельности ДПО. Практическая значимость работы заключается в возможности использования её результатов для прогнозирования и разработки мероприятий по привлечению добровольцев. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку механизмов популяризации и повышения привлекательности деятельности добровольных пожарных.

Ключевые слова: добровольные пожарные общества, добровольный пожарный, региональное управление, опрос, финансирование ДПО, пожарная безопасность

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

Для цитирования. Широбоков С.В., Касаткина Е.А. Исследование деятельности добровольных пожарных обществ (на примере Удмуртской Республики). *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(4):294–304. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-4-294-304>

Scoping Review

Research on the Activities of Voluntary Firefighting Societies (Using the Example of the Udmurt Republic)

Sergey V. Shirobokov , Elena A. Kasatkina  

Udmurt State University, Izhevsk, Russian Federation

 kora-tay@yandex.ru

Abstract

Introduction. In today's world, fire safety has become a top priority for public administration in every country. The challenges of providing professional fire protection are addressed, among other measures, through the institution of volunteer firefighting both in Russia and abroad. Problems in ensuring the activities of volunteer firefighters are generally quite typical, regardless of the level of socio-economic development of the territory. Thus, in modern conditions in the Russian Federation, there are quite noticeable imbalances in the level of fire safety. These issues are particularly acute for small, remote settlements, where it is quite resource-intensive to maintain professional fire protection. Nevertheless, the principle of equal access and quality of public services is a key component of state policy and regional administration. The activities of volunteer fire brigades play an essential role in the fire safety system in Russia and abroad. However, as practice shows, there is a significant problem of ignorance and, in general, unwillingness of citizens to participate in voluntary fire protection and to assist in the development of this institution. In this regard, this study aims to investigate the role of volunteer firefighting societies (hereinafter referred to as VFFS) and analyze the specifics of their activities abroad in order to identify common practices and assess the perception of this institution by the population.

Materials and Methods. The research plan consisted of two interconnected parts. First, we planned to study the sources devoted to evaluating the role of volunteer firefighters in other countries and analyze the activities of volunteer firefighting organizations in the Russian Federation. Then, we conducted a sociological survey and processed the results. The processing of responses involved summarizing the collected data and identifying the reasons and motives behind the responses received. For the regional part of the study, statistical data on the activities of voluntary firefighting societies and the dynamics of the number of volunteers were analyzed in order to assess the contribution of voluntary firefighting societies to the fire safety system.

Results. It has been revealed that the institute of volunteer firefighters is widespread in the fire extinguishing system both in Russia and abroad. It has been found that approaches to the organization, financing and financial incentives of volunteer firefighters from different countries have both similarities and some differences, including the subjective perception of this institution by the population. It was found that the number of VFFS branches and the participation of VFFS units in extinguishing fires in the Russian Federation have increased significantly in the Russian Federation. This indicates the relevance and effectiveness of their work. An analysis of the distribution of the number of fires by fire extinguishing participants showed that the proportion of volunteer fire brigades participating in firefighting has been growing annually. However, the analysis has also showed a decrease in the overall number of volunteer firefighters in the Udmurt Republic. According to the sociological survey conducted, the vast majority of respondents were generally not ready to participate in voluntary fire protection and assist in the development of this institution.

Discussion. This work has shown that the institution of volunteer firefighters is a highly sought-after and socially significant phenomenon both in Russia and abroad. However, there are clear problems at both the national and regional levels with the organization of the VFFS system itself. Generally, the population is not very willing to join volunteer firefighting groups, and the reasons why people do not join these groups have been identified. The analysis revealed the motivations and conditions under which respondents were willing to participate in volunteer firefighting activities. The results show the need for a comprehensive approach to developing measures to improve the status of volunteers. It is also necessary to develop a set of measures to increase the appeal of the image of a volunteer firefighter to attract young people into this field.

Conclusions. The research confirms the important role of volunteer firefighters in ensuring fire safety in the subject area under study, both in Russia and abroad. The review showed that the key problems in organizing the work of voluntary firefighting services are identical for most countries. These conclusions are supported by the results of the analysis. The main results of the study include data on the dynamics of the number of volunteers in the region as well as factors that determine the motivation of the population to participate in volunteer firefighting activities. The practical significance of the research lies in its application in predicting additional measures to attract more volunteers to volunteer firefighting organizations. Further research will aim to develop mechanisms to promote volunteer firefighting activities.

Keywords: voluntary firefighting societies, volunteer firefighter, regional management, survey, VFFS financing, fire safety

Acknowledgements. The authors would like to express their gratitude to the reviewers and the Editorial team for their attention to the article and their assistance in improving its quality.

For Citation. Shirobokov SV, Kasatkina EA. Research on the Activities of Voluntary Firefighting Societies (Using the Example of the Udmurt Republic). *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(4):294–304. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-4-294-304>

Введение. В современных условиях Российская Федерация в силу объективных факторов характеризуется ощутимыми региональными диспропорциями и дифференцированными условиями развития многих сфер общественной жизни. При этом принцип равной доступности и равного качества предоставления социальных услуг остаётся определяющим в государственной политике и региональном управлении. В частности это касается гарантий обеспечения пожарной безопасности. Как отмечают авторы, «обеспечение требуемого уровня пожарной безопасности представляет собой одну из важнейших составляющих национальной безопасности страны» [1]. Поэтому в условиях современной России с её многообразием деятельность добровольных пожарных подразделений играет ключевую роль в системе обеспечения пожарной безопасности [2]. В этом контексте актуальны исследования факторов, определяющих целесообразность создания подразделений добровольной пожарной охраны в населённых пунктах [3]. Согласимся с тем, что «регулирование правоотношений, возникающих между органами государственной власти, органами местного самоуправления, организациями и гражданами в сфере деятельности добровольной пожарной охраны является неотъемлемой частью развития и модернизации нормативного пространства» [4], чему способствовало начало формирования современного правового поля государственного управления [5].

Практика взаимодействия с представителями различных сфер деятельности позволяет авторам предположить, что на сегодняшний день существенной проблемой является незнание и, в целом, нежелание граждан участвовать в добровольной пожарной охране и способствовать развитию этого института. Аналогичную тенденцию отражает опыт деятельности добровольных пожарных в ряде зарубежных стран.

Цель настоящего исследования — изучение деятельности добровольных пожарных обществ и рассмотрение специфики функционирования подразделений ДПО в зарубежных странах с целью получения комплексного представления о роли этих подразделений в повышении уровня пожарной защищённости населения. В целом содержание исследования сводится к анализу роли ДПО и восприятия этого общественного института представителями различных социальных групп.

Материалы и методы. В рамках исследования были проанализированы источники, посвящённые роли добровольных пожарных в зарубежных странах [1–3]. В основу изучения особенностей функционирования ДПО в конкретном регионе положен анализ данных о деятельности добровольных пожарных обществ с выявлением тенденций изменения численности добровольцев [4, 5]. Для оценки отношения населения к институту добровольных пожарных, уровня информированности об их деятельности, а также восприятия практик финансирования ДПО был проведён социологический опрос [6]. В работе применены метод контент-анализа, статистические методы и методы социологического опроса с последующей обработкой полученных результатов [7, 8]. Обработка ответов подразумевает обобщение данных, интерпретацию выявленных закономерностей и установление причинно-мотивированных факторов, определяющих позиции респондентов [9].

Контент-анализ публикаций охватывал материалы о роли добровольных пожарных и особенностях организации их деятельности в зарубежных странах. В релевантную выборку включались работы, содержащие сведения о состоянии, специфике и проблемах организации деятельности добровольных пожарных. Механизм привлечения добровольцев широко распространён в системе пожаротушения как в России, так и за рубежом. Институт добровольной пожарной охраны исторически присутствовал практически во всех государствах, а публикации по данной тематике достаточно широко представлены в научной литературе. Обзор предметного поля, отражающего особую роль подразделений добровольных пожарных в системе пожаротушения, представлен в работах [6–10].

Комплексный и всесторонний обзор организации деятельности добровольных пожарных зарубежных стран, таких как США, Франция, Германия, Италия, Венгрия, представлен в [11, 12]. При этом большинство обзорных публикаций ориентировано на изучение опыта западноевропейских государств, тогда как деятельность добровольных пожарных стран азиатского региона остаётся без детального рассмотрения. Между тем доступные обзоры научных статей демонстрируют специфику организации добровольной пожарной охраны в этих государствах. Так, систему добровольных пожарных Китая отличает высокий уровень общественной вовлечённости: «каждый знает, что делать в экстренной ситуации, при том, что ни о какой награде или материальном вознаграждении речь не идёт. В китайцах до сих пор очень сильно развито чувство общественного долга» [12]. В Японии добровольные пожарные отряды в значительной части формируются из сельского населения — это хорошо подготовленные граждане, способные профессионально справляться с поставленными задачами [13].

Проанализированные исследования подчёркивают значимую роль добровольных пожарных не только в тушении пожаров, но и в проведении спасательных операций в экстренных ситуациях.

В Российской Федерации возрождение интереса государства к добровольческой (волонтёрской) деятельности отмечается с конца XX века. Главной причиной стала потребность в решении ряда социальных проблем, обусловленных экономическими факторами [14].

Согласно п. 2 ст. 10 Федерального закона от 06.05.2011 № 100-ФЗ «О добровольной пожарной охране», добровольными пожарными могут быть физические лица, достигшие возраста восемнадцати лет и способные по состоянию здоровья исполнять обязанности, связанные с участием в профилактике пожаров и (или) в тушении пожаров, а также в проведении аварийно-спасательных работ. Государство справедливо «определяет правовой статус личного состава ДПО и признаёт ценность их работы» [15].

Региональное (субъектовое) законодательство предусматривает разработку соответствующих правовых актов, что обусловлено, в том числе, «необходимостью проведения учений с учётом локальных особенностей регионов» [16]. В Удмуртской Республике действуют закон Удмуртской Республики «О добровольной пожарной охране в Удмуртской Республике» № 30-РЗ¹ от 30 июня 2011 года и Постановление Правительства Удмуртской Республики от 16.04.2012 № 155 «Об утверждении Положения о предоставлении субсидий общественным объединениям пожарной охраны»².

Отметим, что в последние годы наблюдаются определённые сложности с получением цифровых данных по объективным причинам. Кроме того, исследование рассматриваемой сферы затруднено отсутствием единой базы, агрегирующей сведения о деятельности организаций различных уровней, задействованных в сфере предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций. В связи с этим в представленной работе использованы данные различных открытых источников, анализ проведен на основании официальных данных Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий³, ГУ МЧС России по Удмуртской Республике⁴, Общероссийской общественной организации «Всероссийское добровольное пожарное общество»⁵, УРО Общероссийской общественной организации «Всероссийское добровольное пожарное общество»⁶.

¹ О добровольной пожарной охране в Удмуртской Республике. Закон Удмуртской Республики № 30-РЗ от 30.06.2011. Система ГАРАНТ. URL: <https://base.garant.ru/15745029/> (дата обращения: 26.11.2025).

² Об утверждении Положения о предоставлении субсидий общественным объединениям пожарной охраны. Постановление Правительства УР № 155 от 16.04.2012. Система ГАРАНТ. URL: <https://base.garant.ru/15751256/> (дата обращения: 26.11.2025).

³ Официальный сайт Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. URL: <https://mchs.gov.ru> (дата обращения: 26.11.2025).

⁴ Официальный сайт Главного управления МЧС России по Удмуртской Республике. URL: <https://18.mchs.gov.ru> (дата обращения: 26.11.2025).

⁵ Официальный сайт Общероссийской общественной организации Всероссийского добровольного пожарного общества. URL: <https://vdpo.ru> (дата обращения: 26.11.2025).

⁶ Там же.

Результаты исследования. Как следует из официальных материалов, по итогам 2023 года на территории Российской Федерации зарегистрировано 20 834 общественных объединения пожарной охраны, в том числе: 556 общественных организаций пожарной охраны, зарегистрированных в качестве юридических лиц, и 20 278 общественных учреждений пожарной охраны без регистрации в качестве юридических лиц.

В состав общественных объединений пожарной охраны входят:

- добровольные пожарные дружины — 25 638 (аналогичный период прошлого года (далее АППГ) — 27 822, в динамике — 7 %), численность добровольцев — 268 619 человек (АППГ — 296 872, в динамике — 9 %);
- добровольные пожарные команды — 8 946 (АППГ — 8 866, в динамике +1 %), численность добровольцев — 55 351 человек (АППГ — 55 156, в динамике +3 %).

Данные по количеству пожаров с привлечением ДПО отражены на рис. 1⁷.

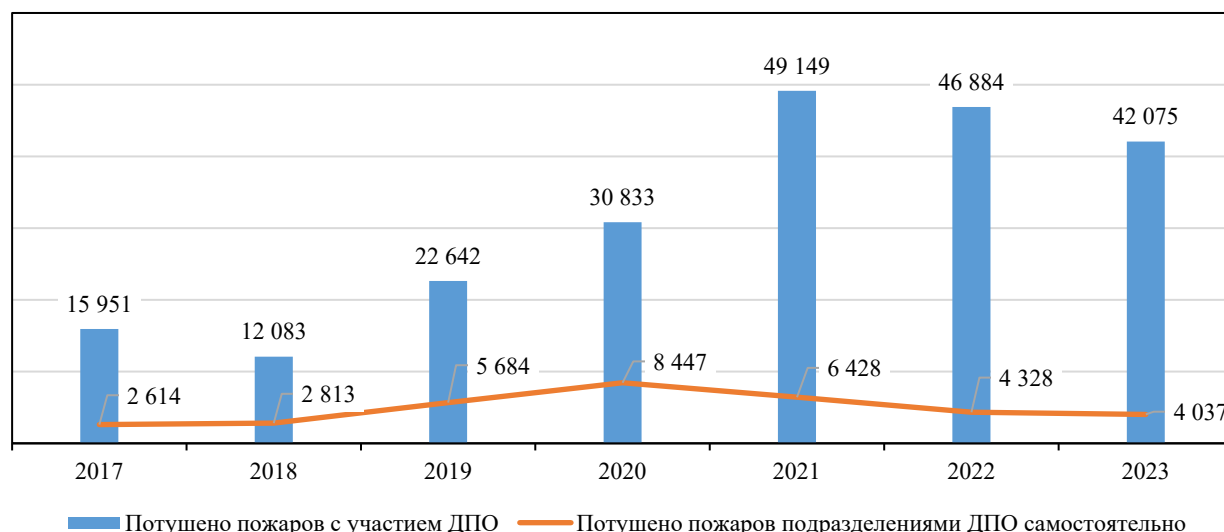


Рис. 1. Участие подразделений ДПО в тушении пожаров на территории Российской Федерации в 2017–2023 годах

На основании данных рис. 1 видно, что количество пожаров, потушенных с участием ДПО, в период с 2017 по 2021 гг. увеличилось на 33 198 ед. (или на 208,12 %), с 2021 по 2023 гг. произошло снижение на 7 074 ед. (или на 14,4 %).

Участие ДПО в тушении пожаров напрямую влияет на результативность в данной сфере в целом. Чем больше подразделений ДПО, тем очевидно меньше потерь от пожаров. В период с 2020 по 2024 год количество филиалов ВДПО увеличилось на 131 или на 23,33 %, что говорит о востребованности, актуальности и эффективности их деятельности. Свои филиалы ВДПО имеет в каждом федеральном округе и почти каждом регионе.

Государственное регулирование отраслевой деятельности исходит из принципа достижения положительной результативности. Результативность работы пожарной охраны оценивают по времени реагирования на вызовы, числу спасенных жизней и сохраненных материальных ценностей [17]. В прямой корреляции с этими показателями находится соотношение количества участников разных категорий. Анализ данных показывает, что доля участия добровольных пожарных объединений в тушении пожаров ежегодно растет. Если в 2016 году благодаря членам ДПО было потушено 11 594 пожара, то в 2022 году — 39 103 пожара (на 237,3 % больше, чем в 2016 году). Кроме того, среди всех участников тушения пожаров ДПО занимают четвертое место по доле. Они уступают только сотрудникам территориальных подразделений ФПС ГПС, работникам территориальных подразделений ФПС ГПС, а также работникам территориальных подразделений ППС субъекта РФ, для которых тушение пожаров является непосредственной профессиональной сферой деятельности.

По данным за 2024 год, в Удмуртской Республике функционируют 119 общественных учреждений добровольной пожарной охраны, в состав которых входят 436 территориальных и объектовых добровольных пожарных подразделений общей численностью 4 888 человек.

Динамика численности добровольных пожарных в Удмуртской Республике отражена в таблице 1.

⁷ Анализ развития добровольной пожарной охраны в Российской Федерации по итогам 2023 года. Москва: 2024. 6 с. URL: <https://mchs.gov.ru/uploads/document/2025-02-04/43e5a62d9d6f39c244d6bd6f7cb1ef41.pdf?ysclid=mha4bes5qv305014601> (дата обращения: 26.11.2025).

Таблица 1

Динамика численности добровольных пожарных в Удмуртской Республике в период с 2020 по 2024 гг., чел

Год	2020	2021	2022	2023	2024
Численность, чел.	5 234	5 457	5 683	5 206	4 888

Таким образом, за рассматриваемый период численность сократилась на 346 человек — или на 6,6 %. В соответствии с требованиями «Технического регламента» добровольными пожарными подразделениями прикрыто 392 населённых пункта Удмуртской Республики (20 %). При этом, по данным ГУ МЧС России по Удмуртской Республике, с начала 2024 года добровольцы самостоятельно ликвидировали 13 пожаров, 435 раз принимали участие в тушении пожаров в качестве дополнительных сил и 8 раз участвовали в ликвидации последствий дорожно-транспортных происшествий⁸.

Несмотря на значимость и высокий статус волонтерской деятельности, большинство исследований акцентируют внимание прежде всего на её мотивационной составляющей. В частности, подчёркивается, что «участие добровольцев в поисково-спасательных мероприятиях, тушении пожаров ... зачастую связано с риском для здоровья и даже жизни добровольцев, в связи с этим существенным для дальнейшего развития являются вопросы компенсации ущерба, понесённого добровольцем при выполнении соответствующих работ» [18]. Современные обзоры показывают, что финансовая поддержка играет ключевую роль в обеспечении стабильной работы добровольных пожарных зарубежных стран и одновременно выявляют проблемы в финансировании добровольных пожарных обществ [19, 20]. Аналогичные трудности характерны как для ряда иностранных государств, так и для современной России и её регионов, в частности Удмуртской Республики, что убедительно подтверждают результаты нашего исследования. Ситуацию усугубляют достаточно жёсткие требования, предъявляемые к добровольным пожарным, на что указывают исследования [11, 21].

Подводя итоги проведённого анализа, отметим, что одной из наиболее острых проблем остаётся отсутствие устойчивой положительной динамики численности добровольных пожарных. Снижение их количества на фоне высокой востребованности, оперативности реагирования на пожары, квалифицированного подхода к тушению и спасению людей и материальных ценностей рассматривается как негативная тенденция, исправление которой требует пристального внимания. Для выявления причин этого явления и определения мотивационных ожиданий населения в рамках настоящего исследования был проведён опрос. Выборка респондентов сформирована случайным образом, территориальные границы — жители Удмуртской Республики и соседних регионов.

Результаты социального опроса на тему «Добровольные пожарные общества в развитии территории»

Исследования в целом показывают многоаспектный характер факторов, влияющих на эффективность деятельности пожарной охраны. Так, имеются работы, посвящённые влиянию гендерного фактора на профессиональные компетенции [22]; отмечается также рост числа женщин в профессиональных сферах [23]. В рамках настоящей статьи мы сосредоточим внимание на субъективных аспектах, затронутых в опросе.

Первый блок вопросов был направлен на изучение возраста, пола и социального статуса респондентов; его результаты не предполагали статистической обработки. Тем не менее отметим, что в выборке представлены различные категории участников опроса (рис. 3).

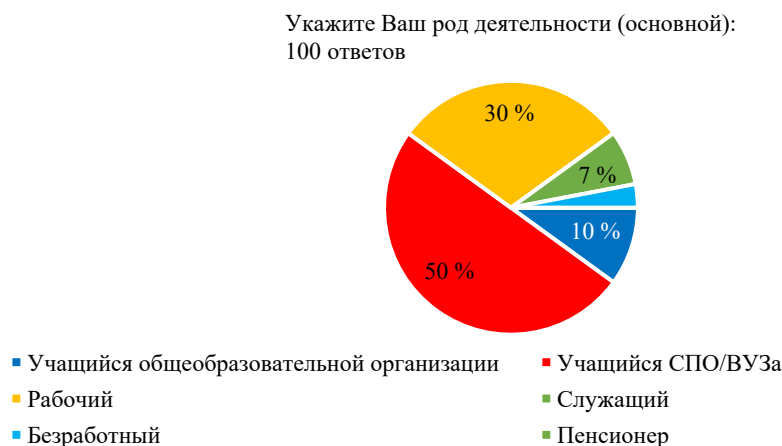


Рис. 2. Распределение респондентов по роду деятельности

Выяснено, что среди 100 опрошенных 34 % (34 чел.) знают о существовании ДПО, и 66 % (66 чел.) не знают о существовании ДПО (рис. 4).

⁸ Итоги развития и деятельности добровольчества в Удмуртии за 2024 год. Официальный сайт Главного управления МЧС России по Удмуртской Республике. URL: <https://18.mchs.gov.ru/devatelnost/press-centr/novosti/5441040> (дата обращения: 20.10.2025).

Знаете ли Вы о добровольных пожарных объединениях?
100 ответов

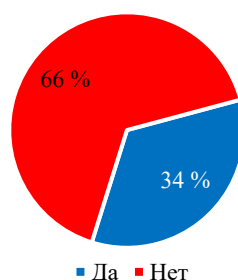


Рис. 3. Данные о количестве респондентов, владеющих информацией о деятельности ДПО

На вопрос «Как Вы считаете, нужны ли ДПО?» 90 чел. ответили положительно, 10 человек ответили «Нет». Исходя из этого можно сказать, что большинство человек считают, что ДПО нужны (рис. 5).

Как Вы считаете, нужны ли добровольные пожарные объединения?
100 ответов

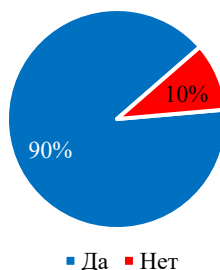


Рис. 4. Распределение ответов на вопрос о необходимости ДПО

Несмотря на широкое признание значимости добровольных пожарных обществ (ДПО), далеко не все опрошенные готовы вступить в их ряды. 86 % респондентов (86 чел.) не готовы стать добровольными пожарными, тогда как лишь 14 % (14 чел.) выражают готовность к вступлению.

Ключевой блок вопросов касался готовности респондентов вступить в ДПО и условий, при которых они это сделают. Подавляющее большинство положительных ответов (по 27,3 %) предполагают вступление лишь при соблюдении ряда условий — если организация обеспечит необходимое обучение и снаряжение, будет предоставлять медицинскую защиту и компенсацию за потраченное время, а также, если их навыки и умения будут реально способствовать спасению жизней и сохранению имущества в чрезвычайных ситуациях. Остальные варианты ответов носили характер допустимой погрешности: безвозмездно; в свободное от работы время, в заранее оговоренное время; дружный коллектив; человеческие условия при выездах; льготы и поощрения; ограничение числа часов работы в неделю; при условии, что не будут лично участвовать в ликвидации пожаров.

По поводу косвенных форм участия или содействия деятельности ДПО выяснено, что почти половина респондентов (46,7 %) не желают каким-либо образом помогать добровольным пожарным обществам; почти треть (26,7 %) готовы оказывать помощь в поиске ресурсов и информации; лишь 3,3 % готовы финансово поддерживать деятельность ДПО.

Очевидно, что вопрос финансирования является одним из ключевых в контексте исследования. Почти половина респондентов (43,3 %) полагают, что финансирование ДПО должно осуществляться исключительно за счёт государства; почти треть (26,7 %) допускают субсидиарную модель — государство и население совместно.

В рамках исследования также была предпринята попытка выявить причины, препятствующие вступлению в ДПО. На этот вопрос респондент мог выбрать несколько вариантов или указать собственную причину. Фиксированные варианты ответов распределились следующим образом:

1. Нет времени по причине работы или учёбы — 73 % (73 чел.).
2. Страшно/опасно — 28 % (28 чел.).
3. Нет материального стимулирования — 19 % (19 чел.).
4. Считаю бесполезным — 3 % (3 чел.).

Другие ответы, набравшие менее 5 % каждый: не хочу; не знаю, где искать объединение для вступления; не знаю требований к участнику добровольного пожарного объединения; недостаток информации об организации в целом; состояние здоровья; поддерживаю другое благотворительное направление; считаю, что это прежде всего мужская роль; нахожусь в другом городе; отсутствие физической подготовки.

Завершающим был открытый вопрос: «Какие изменения или улучшения Вы бы предложили для развития добровольных пожарных обществ?». Получены конструктивные предложения: усилить рекламную кампанию для привлечения добровольцев; шире освещать деятельность ДПО в СМИ для информирования населения; поощрять участников; обеспечить формой, транспортом и специализированной техникой; обсуждать эту тему с детства. Небольшая часть опрошенных полагает, что при отсутствии внутренней мотивации человека замотивировать невозможно.

Безусловно, не следует отождествлять профессиональных пожарных и добровольцев. Как отмечается в [24], существуют ситуации, «которые не являются сферой систематической деятельности гражданских волонтеров». Вероятно, здравым и продуктивным с точки зрения привлечения населения является мнение, что «подготовка добровольцев (волонтеров) при выполнении задач, не связанных с ведением аварийно-спасательных работ, может ограничиваться проведением инструктажа» [25].

Оптимальное решение поставленных задач возможно при соблюдении баланса полномочий и ответственности. С одной стороны, жители «при организационной и финансовой поддержке государственных органов могут успешно решать задачи по защите своей малой родины от пожаров» [26]. С другой стороны, необходимо совершенствовать «мотивационные инструменты, способные повлиять на заинтересованность и проактивное решение граждан стать добровольцами» [27]. Кроме того, особую роль в привлечении людей к деятельности ДПО играют волонтерские акции [28], наставничество как важнейший инструмент личностного и профессионального роста [29], а также государственная поддержка активной гражданской позиции.

Обсуждение. Проведённое исследование показало, что институт добровольных пожарных востребован и социально значим как в России, так и за рубежом. Вместе с тем существуют проблемы как национального, так и регионального уровня в организации системы ДПО. Полученные результаты указывают на необходимость комплексного подхода к разработке мер, способствующих повышению статуса добровольных пожарных. Следует также разработать пакет мер по повышению привлекательности образа добровольного пожарного для привлечения молодёжи. Что касается изучаемого региона, исследование продемонстрировало, что, несмотря на важнейшую роль ДПО в развитии территорий, имеется ряд проблемных направлений. Опрос показал, что большинство респондентов понимают значимость ДПО и считают их необходимыми для успешного социально-экономического развития территорий, однако уровень вовлечённости населения остаётся низким.

Заключение. Настоящая работа выявила, что население в целом не склонно массово вступать в ряды добровольных пожарных; основные причины нежелания — отсутствие свободного времени, недостаточная подготовка или возраст, а также слабая материальная мотивация. Анализ позволил также определить мотивы и условия, при которых респонденты готовы участвовать в деятельности ДПО — часть опрошенных готова вступить в ряды при условии достойной оплаты и совпадения графика с выходными на основной работе.

Список литературы / References

1. Калач А.В., Капустин А.А., Шавалеев М.Р. Анализ обстановки с пожарами и их последствиями на территории Российской Федерации. *Пожары и чрезвычайные ситуации: предупреждение, ликвидация*. 2024;(3):142–152. <https://doi.org/10.25257/FE.2024.3.142-152>
- Kalach AV, Kapustin AA, Shavaleev MR. Analysis of the Situation with Fires and Their Consequences on the Territory of the Russian Federation. *Fires and Emergencies: Prevention, Elimination*. 2024;(3):142–152. (In Russ.) <https://doi.org/10.25257/FE.2024.3.142-152>
2. Мусиенко Т.В., Лукин В.Н., Виноградов В.Н., Викулов С.Ф., Бардулин Е.Н. *Добровольная пожарная охрана: история и современность*. Монография. Серия: «Добровольная пожарная охрана: вековые традиции». Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России; 2022. 304 с.
- Musienko TV, Lukin VN, Vinogradov VN, Vikulov SF, Bardulin EN. *Voluntary Fire Protection: History and Modern Times*. Monograph. Series: “Voluntary Fire Protection: Age-Old Traditions”. Saint Petersburg: Saint Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia; 2022. 304 p. (In Russ.)
3. Ратникова О.Д., Бобринев Е.В. Разработка критериев целесообразности создания подразделений добровольной пожарной охраны. *Пожарная безопасность*. 2024;(1(114)):65–73. <https://doi.org/10.37657/vniipo.pb.2024.114.1.008>
- Ratnikova OD, Bobrinev EV. Elaboration of Feasibility Criteria for Establishing Volunteer Fire Service Divisions. *Fire Safety*. 2024;(1(114)):65–73. (In Russ.) <https://doi.org/10.37657/vniipo.pb.2024.114.1.008>
4. Гаврюшенко В.П., Володченкова В.В. Отдельные вопросы реализации правового статуса личного состава добровольной пожарной охраны. *Сибирский пожарно-спасательный вестник*. 2024;(2(33)):58–65. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2024.22.47.019>
- Gavriushenko VP, Volodchenkova VV. Certain Issues of the Implementation of the Legal Status of the Personnel of the Volunteer Fire Department. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 2024;(2(33)):58–65. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2024.22.47.019>

5. Лукин В.Н., Мусиенко Т.В. Управление пожарной безопасностью в условиях кризиса (из опыта Всероссийского добровольного пожарного общества). *Credo New*. 2022;(4(112)). URL: <https://credo-new.ru/archives/2823> (дата обращения: 26.11.2025).

Lukin VN, Musienko TV. Fire Safety Management in a Crisis (from the Experience of the All-Russian Voluntary Fire Society). *Credo New*. 2022;(4(112)). (In Russ.) URL: <https://credo-new.ru/archives/2823> (accessed: 26.11.2025).

6. Ратникова О.Д., Маторина О.С., Меретукова О.Г. Обзор организационно-методических подходов взаимодействия и привлечения добровольцев (волонтеров) к деятельности в области обеспечения пожарной безопасности и оказания помощи населению Германии. *Социология и право*. 2022;14(3):354–364. <https://doi.org/10.35854/2219-6242-2022-3-354-364>

Ratnikova OD, Matorina OS, Meretukova OG. Review of Organizational and Methodological Approaches to Interaction and Involvement of Volunteers in Activities in the Field of Fire Safety and Assistance to the Population of Germany. *Sociology and Law*. 2022;14(3):354–364. (In Russ.) <https://doi.org/10.35854/2219-6242-2022-3-354-364>

7. Райкова Ю.А., Шапошник Д.С., Столяров Д.В. Система профессиональной подготовки добровольных пожарных: опыт, проблемы, перспективы развития. *Вестник науки*. 2020;3(9(30)):21–31. URL: <https://www.вестник-науки.рф/article/3603> (дата обращения: 26.11.2025).

Raikova YuA, Shaposhnik DS, Stolyarov DV. The System of Professional Training of Volunteer Firefighters: Experience, Problems, Development Prospects. *Vestnik Nauki*. 2020;3(9(30)):21–31. (In Russ.) URL: <https://www.вестник-науки.рф/article/3603> (accessed: 26.11.2025).

8. Гурьев А.С., Кобяк В.В., Корнейчук О.Н. О создании добровольных пожарных формирований в Республике Беларусь. *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: научно-технический журнал*. 2014;(1(35)):15–29.

Gurev AS, Kobyak VV, Korneychuk ON. On the Creation of Voluntary Fire Brigades in the Republic of Belarus. *Emergency Situations: Prevention and Elimination*. 2014;(1(35)):15–29. (In Russ.)

9. Савенкова И.В., Морев А.А. История и современное состояние пожарного дела на севере Казахстана. *Современные научные исследования и инновации*. 2011;(2). URL: <https://web.snauka.ru/issues/2011/06/756> (дата обращения: 26.11.2025).

Savenkova IV, Morev AA. History and Current Status of Firefighting in Northern Kazakhstan. *Modern Scientific Researches and Innovations*. 2011;(2). (In Russ.) URL: <https://web.snauka.ru/issues/2011/06/756> (accessed: 26.11.2025).

10. Теemu Венескари, Алимова Г.Р., Ильницкий С.В. Опыт подготовки добровольных пожарных в области предупреждения пожаров и проведения профилактических мероприятий в Финляндской Республике. *Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности*. 2018;2018(3):40–42. URL: <https://journals.igps.ru/ru/storage/viewWindow/122118> (дата обращения: 26.11.2025).

Teemu Veneskari, Alimova GR, Il'nickiy SV. Opyt Podgotovki Dobrovol'nyh Pozharnykh v Oblasti Preduprezhdeniya Pozharov i Provedeniya Profilakticheskikh Meropriyatiy v Finlyandskoy Respublike. *Monitoring and Expertise in Safety System*. 2018;2018(3):40–42. (In Russ.) URL: <https://journals.igps.ru/ru/storage/viewWindow/122118> (accessed: 26.11.2025).

11. Малышева И.С., Дробушко А.Г. К вопросу деятельности добровольной пожарной охраны за рубежом. *Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций*. 2016;(1–2(5)):295–297.

Malysheva IS, Drobushko AG. On the Issue of Voluntary Fire Protection Activities Abroad. *Safety Issues in the Aftermath of Emergencies*. 2016;(1–2(5)):295–297. (In Russ.)

12. Губанова О.А. Зарубежный опыт подготовки пожарных. *Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России*. 2018;2018(2):169–174. URL: <https://journals.igps.ru/ru/nauka/article/68504/view> (дата обращения: 26.11.2025).

Gubanova OA. Foreign Experience in Training Firefighters. *Vestnik Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia*. 2018;2018(2):169–174. (In Russ.) URL: <https://journals.igps.ru/ru/nauka/article/68504/view> (accessed: 26.11.2025).

13. Виноградов В.Н. Из истории пожарной охраны Японии. *Психолого-педагогические проблемы безопасности человека и общества*. 2013;(3(20)):62–68.

Vinogradov VN. Stories from the Fire of Japan. *Psychological and Pedagogical Problems of Human and Social Security*. 2013;(3(20)):62–68. (In Russ.)

14. Уткин Н.И., Чебоксаров П.А. Добровольная пожарная охрана в России: основные векторы государственно-правовой поддержки и развития частной инициативы. *Правовая политика и правовая жизнь*. 2015;(4):76–84.

Utkin NI, Cheboksarov PA. Volunteer Fire Protection in Russia: The Main Vectors of State and Legal Support and Development of Private Initiative. *Legal Policy and Legal Life*. 2015;(4):76–84. (In Russ.)

15. Звенигородская Н.Ф. К вопросу о добровольной пожарной охране. *Вестник Санкт-Петербургской юридической академии*. 2017;(2(35)):36–39.
- Zvenigorodskaya NF. To the Question of Voluntary Fire Protection. *Vestnik of Saint Petersburg Juridical Academy*. 2017;(2(35)):36–39. (In Russ.)
16. Маторина О.С., Стрельцов О.В., Нестерова С.В. О правовом регулировании охраны труда пожарных подразделений. *Социология и право*. 2025;17(2):288–295. <https://doi.org/10.35854/2219-6242-2025-2-288-295>
- Matorina OS, Streltsov OV, Nesterova SV. Legal Regulation of Labor Protection in Fire Brigades. *Sociology and Law*. 2025;17(2):288–295. (In Russ.) <https://doi.org/10.35854/2219-6242-2025-2-288-295>
17. Маторина О.С., Удавцова Е.Ю., Шавырина Т.А. Обоснование показателей эффективности подразделений пожарной охраны для организаций. *Актуальные вопросы пожарной безопасности*. 2024;(4(22)):32–37. <https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2024.50.10.004>
- Matorina OS, Udavtsova EYu, Shavyrina TA. Justification of Performance Indicators of Fire Departments for Organizations. *Current Fire Safety Issues*. 2024;(4(22)):32–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2024.50.10.004>
18. Аюбов Э.Н., Бувевич О.Е., Гаврюшенко В.П., Новиков О.Н., Перегудова Н.В. Развитие добровольческой (волонтерской) деятельности в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, обеспечения пожарной безопасности и безопасности людей на водных объектах. *Технологии гражданской безопасности*. 2023;20(3(77)):75–80. <https://doi.org/10.54234/CST.19968493.2023.20.3.77>
- Ayubov EN, Buevich OE, Gavryushenko VP, Novikov ON, Peregudova NV. Volunteer Activities Development in the Field of the Population and Territories Protection from Emergency Situations, Ensuring Fire Safety and Water Safety of People. *Tekhnologii Grazhdanskoi Bezopasnosti*. 2023;20(3(77)):75–80. (In Russ.) <https://doi.org/10.54234/CST.19968493.2023.20.3.77>
19. Маштаков В.А., Бобринев Е.В., Маторина О.С., Удавцова Е.Ю. Исследование деятельности добровольной пожарной охраны в Российской Федерации и зарубежных странах. *Современные проблемы гражданской защиты*. 2019;(3(32)):5–13
- Mashtakov VA, Bobrinev EV, Udatsova EYu, Matorina OS. Research of Activity of Voluntary Fire Protection in the Russian Federation and Foreign Countries. *Sovremennye Problemy Grazhdanskoi Zashchity*. 2019;(3(32)):5–13 (In Russ.)
20. Moffitt TJ. *Difficult Shortages of Volunteer Firefighters in the US and Canada – Recruitment Crucial for Wildfire Fighting*. URL: <https://ctif.org/news/difficult-shortages-volunteer-firefighters-us-and-canada-recruitment-crucial-wildfire-fighting> (accessed: 26.11.2025).
21. фон Мекк Д.А. Пожарное добровольчество за рубежом. *Вестник МЧС*. 2011;(4):1 URL: <https://fire.ru/pojarnoye-dobrovolchestvo-za-rubejom-vestnik-mchs-2011> (дата обращения: 26.11.2025).
- Von Meck DA. Firefighting Volunteerism Abroad. *Bulletin of the Ministry of Emergency Situations*. 2011;(4):1. (In Russ.) URL: <https://fire.ru/pojarnoye-dobrovolchestvo-za-rubejom-vestnik-mchs-2011> (accessed: 26.11.2025).
22. Романюк Е.В., Сибиряков М.В. Формирование профессиональных компетенций в вузах пожарно-технического профиля с учётом гендерных особенностей. *Пожары и чрезвычайные ситуации: предупреждение, ликвидация*. 2024;(1):100–108. <https://doi.org/10.25257/FE.2024.1.100-108>
- Romanyuk EV, Sibiriyakov MV. Formation of Professional Competencies in Higher Education Institutions of Fire-Technical Profile, Taking into Account Gender Characteristics. *Fires and Emergencies: Prevention, Elimination*. 2024;(1):100–108. (In Russ.) <https://doi.org/10.25257/FE.2024.1.100-108>
23. Kubu CS. Who Does She Think She Is? Women, Leadership and the ‘B’(ias) Word. *The Clinical Neuropsychologist*. 2017;32(2):235–251. <https://doi.org/10.1080/13854046.2017.1418022>
24. Яницкий О.Н. Волонтеры в ЧС: постановка исследовательских вопросов в современном контексте. *Официальный портал ФНИСЦ РАН*. 2019;7. URL: https://www.isras.ru/files/File/publ/Yanitsky_Volontery_v_chs_2019.pdf (дата обращения: 20.10.2025).
- Yanitsky ON. Volunteering in the Critical Situations (the CS): Some Theoretical and Organizational Issues. *Official Portal of the Federal Research Sociological Center of the Russian Academy of Sciences*. 2019;7. (In Russ.) URL: https://www.isras.ru/files/File/publ/Yanitsky_Volontery_v_chs_2019.pdf (accessed: 20.10.2025).
25. Аюбов Э.Н., Бувевич О.Е., Новиков О.Н., Перегудова Н.В. Основные аспекты привлечения добровольцев (волонтеров) при ликвидации чрезвычайных ситуаций. *Технологии гражданской безопасности*. 2023;20(1(75)):99–106. <https://doi.org/10.54234/CST.19968493.2023.20.1.75>
- Ayubov EN, Buevich OE, Novikov ON, Peregudova NV. Main Aspects of Attracting Volunteers in Emergency Response. *Tekhnologii Grazhdanskoi Bezopasnosti*. 2023;20(1(75)):99–106. (In Russ.) <https://doi.org/10.54234/CST.19968493.2023.20.1.75>
26. Лугинов Р.Р. Проблемы развития добровольной пожарной охраны. *StudNet*. 2020;3(12):1448–1459.
- Luginov RR. Problems Development of Voluntary Fire Protection. *StudNet*. 2020;3(12):1448–1459. (In Russ.)
27. Аксенов С.Г., Кильдибаев Р.М. Развитие добровольной пожарной охраны Российской Федерации. *Научный аспект. Техносферная безопасность*. 2024;(5):1. URL: <https://clck.ru/3QWoXp> (дата обращения: 26.11.2025).
- Aksenov SG, Kildibaev RM. The Development of Voluntary Fire Protection in the Russian Federation. *Nauchnyi Aspekt. Tekhnosfernaya Bezopasnost'*. 2024;(5):1. (In Russ.) URL: <https://clck.ru/3QWoXp> (accessed: 26.11.2025).

28. Касаткина Е.А. Добровольные пожарные общества и их роль в социально-экономическом развитии региона. *Наука Удмуртии*. 2024;(4(107)):29–37. URL: <https://snioo.ru/izdat.html> (дата обращения: 26.11.2025).

Kasatkina EA. Voluntary Fire Companies and Their Role in the Socio-Economic Development of the Region. *Nauka Udmurtii*. 2024;(4(107)):29–37. (In Russ.) URL: <https://snioo.ru/izdat.html> (accessed: 26.11.2025).

29. Turner-Moffatt C. The Power of Mentorship: Strengthening Women in Professional Leadership Roles. *Professional Safety*. 2019;64(8):17–19.

Об авторах:

Сергей Валентинович Широбоков, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Защиты в чрезвычайных ситуациях и управления рисками» Удмуртского государственного университета (426034, Российская Федерация, г. Ижевск, ул. Университетская, д. 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), sergirt@mail.ru

Елена Анатольевна Касаткина, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Государственной службы и управления персоналом» Удмуртского государственного университета (426034, Российская Федерация, г. Ижевск, ул. Университетская, д. 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), kora-tay@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

С.В. Широбоков: разработка концепции, научное руководство, разработка методологии исследования, формальный анализ.

Е.А. Касаткина: визуализация, проведение исследования, 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:

Sergey V. Shirobokov, Cand. Sci. (Eng), Associate Professor, Head of the Department of Protection in Emergency Situations and Risk Management, Udmurt State University (1, Universitetskaya Str., Izhevsk, 426034, Russian Federation), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), sergirt@mail.ru

Elena A. Kasatkina, Cand. Sci. (Economics), Associate Professor of the Department of Public Service and Personnel Management, Udmurt State University (1, Universitetskaya Str., Izhevsk, 426034, Russian Federation), [SPIN-код](#), [ORCID](#), kora-tay@yandex.ru

Claimed Contributorship:

SV Shirobokov: conceptualization, supervision, methodology, formal analysis.

EA Kasatkina: visualization, investigation, writing – original draft preparation, 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 07.09.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 01.10.2025

Принята к публикации / Accepted 17.10.2025

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 504.062

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-4-305-318>

Изучение биопродуктивности искусственного водоема на основе графовой модели взаимодействия природных и антропогенных факторов

И.Ю. Кузнецова , А.В. Никитина

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

✉ mail@kuznetsova-i-yu.ru

EDN: OBWTCN

Аннотация

Введение. Игнорирование системной природы водохранилища обуславливает неэффективные и деструктивные управленческие решения. Однако изучение таких объектов часто фокусируются именно на отдельных факторах. Прогнозный потенциал графовых моделей для этих целей ограничивается дефицитом экспертной информации и устаревающей базой индикаторов. Представленная работа призвана восполнить эти пробелы. Цель — оценка эффективности мероприятий по улучшению состояния Цимлянского водохранилища. Основа решения — авторская графовая модель взаимодействия антропогенных и биотических характеристик объекта.

Материалы и методы. Анализировались литературные источники, информация о гидробиохимии и видовом составе рыб. В модели учли 20 факторов состояния Цимлянского водохранилища. Анализ гидробиологии позволил составить граф $G(V, E, Y)$. V — множество вершин, $v_k \in V$, $k = \overline{1, 20}$. E — множество ориентированных ребер $e_k = (v_i, v_j)$ в виде упорядоченных пар длины 2, $i \neq j$. Y — отображение, $Y: V \rightarrow V$. Матрицу весов построили по интегральной оценке экспертов для каждого фактора. Весовые коэффициенты ($\pm 0,5$ – ± 1) рассчитали по информационной базе гидробиологических и химических данных.

Результаты исследования. Выяснили, как повлияет на объект устранение дрейссены при однократной очистке (1-й сценарий) и трехлетней (2-й). Визуализировали динамику импульсов для состояния воды (v_{15}) и изменения концентрации биовеществ (v_{18}). В первом сценарии для первого фактора максимальный импульс (0,5) фиксируется с 3-го года воздействия, минимальный (0) — в течение 1-го. Для второго фактора за 3-й год импульс увеличивается с минимума (–0,5) до максимума (0,25). Во втором сценарии оба фактора не меняются в 1-й год. Затем импульс для v_{15} растет (до 0,75), v_{18} падает во 2-й год до –0,5, а потом увеличивается до –0,25.

Оценили воспроизводство леща при подкорме v_5 в течение года (3-й сценарий) и пяти лет (4-й). Учитывалось состояние нерестовой рыбы v_1 , пополнение молоди v_2 , промысел v_7 , эвтрофикация v_{14} . Два года остаются нулевыми импульсы v_2 , v_7 и v_{14} . Затем v_2 и v_7 растут до единицы, в 4-й год падают до нуля. Импульс эвтрофикации падает до –1, к концу 4-го года возвращается к нулю. При пятилетнем подкорме импульс v_1 падает до –1 в 1-й год, v_{14} — в 3-й, и его значение не меняется, а v_1 возвращается к 0 на 5-й год моделирования. Импульс для v_2 и v_7 за три года растет с нуля до единицы.

Обсуждение. Ежегодная очистка водоема от дрейссены более эффективна для улучшения состояния воды и менее — для концентрации биогенных веществ. Единоразовая подкормка повысит поголовье молоди и промысел. Эвтрофикация сократится, однако устойчивых результатов не будет. Ежегодный подкорм увеличит поголовье молоди, сократит эвтрофикацию и обусловит развитие промысла.

Заключение. Предложенное решение позволяет прогнозировать пользу или вред антропогенных воздействий на водохранилище. Модель можно совершенствовать за счет более тонкой настройки весовых коэффициентов, учета нелинейных и пороговых эффектов и других индикаторов.

Ключевые слова: цимлянское водохранилище, графовая модель состояния водоема, антропогенное воздействие на водоем, очистка водоема от дрейссены, воспроизводство леща при подкорме

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

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25–71–20001, <https://rscf.ru/project/25-71-20001/>

Для цитирования. Кузнецова И.Ю., Никитина А.В. Изучение биопродуктивности искусственного водоема на основе графовой модели взаимодействия природных и антропогенных факторов. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(4):305–318. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-4-305-318>

Original Empirical Research

Study of Artificial Reservoir's Bioproductivity Based on a Graph Model of Natural and Anthropogenic Factor Interaction

Inna Yu. Kuznetsova  , Alla V. Nikitina 

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

 mail@kuznetsova-i-yu.ru

Abstract

Introduction. Ignoring the systemic nature of a reservoir can lead to ineffective and damaging management decisions. However, the study of such objects often focuses on individual factors. The predictive potential of graph models is limited by a lack of expert information and outdated databases of indicators. This work aims to address these issues by evaluating the effectiveness of measures to improve the condition of the Tsimlyansk Reservoir. The solution is based on the author's graph model that takes into account the interaction of anthropogenic and biotic characteristics of the object.

Materials and Methods. The literature sources and information on hydrobiochemistry and species composition of fish were analyzed. A model was created that took into account 20 factors related to the state of the Tsimlyansk Reservoir. A hydrobiological analysis allowed us to create graph $G(V, E, Y)$. V — set of vertices, $v_k \in V$, $k = \overline{1, 20}$. E — set of oriented edges $e_k = (v_i, v_j)$ in the form of ordered pairs of length 2, $i \neq j$. Y — mapping, $Y: V \rightarrow V$. A weight matrix was created based on an integral assessment of each factor by experts. The weighting coefficients (± 0.5 – ± 1) were calculated using information from hydrobiological and chemical databases.

Results. We investigated how the removal of zebra mussels would affect the facility during a single cleaning (scenario 1) and a three-year cleaning (scenario 2). We visualized the dynamics of pulses for the state of the water (v_{15}) and changes in the concentration of biological substances (v_{18}). In the first scenario, for the first factor, the maximum pulse (0.5) was fixed from the third year of exposure; the minimum (0) was during the first year. For the second factor, the pulse increased from a minimum (–0.5) to a maximum (0.25) over the third year. In the second scenario, both factors did not change in the first year. Then the pulse for v_{15} increased (to 0.75), v_{18} fell in the second year to –0.5, and then increased to –0.25.

Bream reproduction with v_5 feeding was evaluated for a year (scenario 3) and five years (scenario 4). The state of spawning fish v_1 , replenishment of juveniles v_2 , fishing v_7 , and eutrophication v_{14} were taken into account. v_2 , v_7 , and v_{14} pulses remained zero for two years. Then v_2 and v_7 grew to one, and in the fourth year they fell to zero. The eutrophication pulse dropped to –1, and returned to zero by the end of the fourth year. With a five-year feeding, v_1 pulse dropped to –1 in the first year, v_{14} — in the third, and its value did not change, and v_1 returned to 0 in the fifth year of modeling. The pulse for v_2 and v_7 grew from zero to one in three years.

Discussion. Annual cleaning of a reservoir from zebra mussel was more effective for improving the water condition and less effective for the concentration of nutrients. One-time feeding would increase the number of juveniles and fishing. Eutrophication would decrease, but there would be no sustainable results. Annual feeding would increase the number of juveniles, reduce eutrophication and lead to the development of fishing.

Conclusion. The proposed solution makes it possible to predict potential benefits or harm of anthropogenic activities on the reservoir. The model can be improved by fine-tuning the weighting coefficients, taking into account non-linear and threshold effects as well as other indicators.

Keywords: Tsimlyansk Reservoir, graph model of reservoir condition, anthropogenic impact on the reservoir, cleaning the reservoir from zebra mussels, bream reproduction with feeding

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and the comments indicated, which made it possible to improve its quality.

Funding Information. The research was done with the financial support of the Russian Science Foundation, grant No. 25–71–20001, <https://rscf.ru/project/25-71-20001/>

For Citation. Kuznetsova IYu, Nikitina AV. Study of Artificial Reservoir's Bioproductivity Based on a Graph Model of Natural and Anthropogenic Factor Interaction. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(4):305–318. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-4-305-318>

Введение. Гидробиологическое исследование водоема позволяет оценить экологическое состояние водных экосистем и разработать меры по их сохранению и восстановлению. Водохранилища — важные объекты природопользования. Они обеспечивают водоснабжение населения, промышленности и сельского хозяйства. При этом качество водной среды ухудшается из-за антропогенного влияния. Городские и сельскохозяйственные стоки меняют температуру водоемов, нарушают естественную кормовую базу и способствуют размножению вредоносных растений и животных [1]. Все это ведет к сокращению биопродуктивности водоемов, т. е. генерирует экологические и экономические риски.

Цимлянское водохранилище — источник питьевой воды для миллионов жителей Ростовской и Волгоградской областей. Важно отслеживать изменения гидробиологических индикаторов водоема, разрабатывать методы защиты и восстановления экосистемы [2].

Создание эффективных стратегий сохранения и восстановления экосистемы водоема требует глубокого понимания механизмов взаимодействия его антропогенных и биотических характеристик. Российские и зарубежные ученые исследовали факторы продуктивности искусственных водоемов. Однако многие задачи не решены. К тому же все еще не стал нормой комплексный подход к проблемам качества среды искусственных водоемов.

Ключевой антропогенный фактор биотического благополучия водоема — уровень воды в водохранилище [3]. От него зависят успешность нереста [4], выживаемость молоди, доступность кормовых биотопов, зимовка [5]. Так, сработка (понижение) уровня воды в водохранилище может быть опасна. Из-за этого во время нереста погибает икра фитофильных рыб (каarp, сазан, лещ, карась, плотва). Однако после нереста сработка обеспечивает хороший прогрев мелководий и таким образом улучшает условия нагула молоди.

Как природные, так и антропогенные факторы могут быть причинами эвтрофикации. С одной стороны, она повышает продуктивность зоопланктона (корм для молоди), с другой — может вызвать токсичные цветения, а также гипоксию и гибель бентоса (корм для донных рыб) [6].

В [7] показано влияние токсичных веществ на состояние воды и продуктивность водоема. В книге [8] представлен комплексный анализ влияния рыболовства, перелова и выбора орудий лова на популяции рыб. В [9] анализируются причины и последствия вселения новых видов моллюсков и рыб в пресноводные водоемы. Показано, что чужеродные виды меняют биогеохимические циклы и биотический состав экосистем. Инвазивный вид может создать конкуренцию исконным или стать новым объектом промысла. В [10] обобщаются результаты многолетних исследований ученых Зоологического института Российской академии наук о причинах и механизмах расселения видов, о биоразнообразии наземных и водных экосистем и влиянии чужеродных видов. Авторы [11] оценивают риски биоинвазий в морские прибрежные экосистемы на примере Приморского края. Статья [12] посвящается исследованию биоразнообразия Цимлянского водохранилища. В ней выделены новые виды зоопланктона, определены зоны их расселения в водохранилище.

Отметим существенные для продуктивности акваторий биотические факторы:

- обилие и доступность кормовой базы (зоопланктон, бентос, рыбы);
- влияние хищников, включая чужеродные виды, на популяции промысловых рыб [13].

Итак, в открытом доступе есть литература об отдельных условиях, от которых зависит продуктивность водоемов. При этом недостаточно изучено взаимодействие этих факторов и их совокупное влияние на биоразнообразие и популяции промысловых рыб. Экосистемы водоемов характеризуются высокой динамикой трансформаций, пространственной неоднородностью и нелинейными связями между различными факторами [14]. В последние десятилетия широкое распространение получили сетевые модели, позволяющие анализировать динамические связи между отдельными видами и параметрами среды.

Графовые модели позволяют выявлять ключевые узлы, моделировать сценарии воздействий и количественно оценивать силу и направление связей. Такие решения показывают структуру взаимодействий (узлы — факторы, ребра — связи). Один из примеров использования графовых моделей в экологии — описание трофических сетей из нескольких переплетающихся пищевых цепочек. Такая схема нужна для анализа устойчивости и определения ключевых видов [15]. Данный подход широко используется при моделировании связности местообитаний и описании миграционных процессов [16], а также при моделировании влияния того или иного вида или фактора на экосистему [17]. В [18] графовая модель взаимодействия антропогенных и биотических факторов позволила оценить эффективность искусственного восстановления популяций Каспийского моря, подвергавшихся чрезмерному промысловому вылову.

Таким образом, исследование графовой модели взаимодействия антропогенных и биотических факторов открывает возможность качественного решения прикладных задач:

- развития устойчивого рыболовства;
- оптимизации процессов разведения рыбы.

К тому же благодаря предложенному подходу можно научно обосновать рекомендации по защите уникальных экосистем водохранилищ. Графовая модель наглядно отражает сложную структуру причинно-следственных связей в экосистеме водоема, дает возможность количественно оценивать силу, направление вли-

яния различных факторов и выполнять сценарный анализ последствий различных изменений в экосистеме. Цель данного исследования — построение графовой модели взаимодействия антропогенных и биотических факторов для Цимлянского водохранилища, а также оценка эффективности различных мероприятий по улучшению его экологического состояния.

Материалы и методы. При определении материалов и методов исходили, в частности, из особенностей объекта исследования. Цимлянское водохранилище, расположенное на реке Дон в Ростовской и Волгоградской областях, — один из крупнейших и наиболее значимых искусственных водоемов на юге России.

Цимлянское водохранилище относится к типу равнинных русловых, с сильно развитой береговой линией.

Его характеристики:

- большая площадь зеркала (~2700 км²);
- значительная протяженность (~260 км);
- относительно небольшие глубины (средняя ~8,8 м, максимальная ~35 м в старом русле Дона).

Значительные сезонные и многолетние колебания уровня воды определяются режимом работы водозаборов, гидроэлектростанции, а также климатическими условиями (снеговое питание, осадки, испарение). Слабое весеннее половодье объясняется зарегулированностью Дона выше водохранилища. Последние годы отмечается существенное сокращение объемов поступления воды¹.

Для зимы характерен устойчивый ледовый покров. Летом наблюдается четкая температурная стратификация. Из-за этого возникает дефицит кислорода, формируется гипolimнион, особенно в глубоководных участках.

Цимлянское водохранилище построили в 1952 году и полностью заполнили в 1953-м. Объект используется для рыболовства, водоснабжения населения в Ростовской и Волгоградской областях, орошения сельскохозяйственных угодий и выработки электроэнергии. Кроме того, водохранилище обеспечивает работу Волго-Донского судоходного канала.

В последние десятилетия наблюдается изменение гидробиологического режима водоема под влиянием природных и антропогенных факторов.

Хронически высокий уровень биогенных элементов (соединения азота, фосфора) со сточными водами и сельскохозяйственными стоками приводит к ухудшению кислородного режима, формированию заморных зон. В таких условиях развиваются токсичные виды цианобактерий, разрастается фитопланктон («цветение» воды) [19]. Другие особенности водохранилища:

- активное заиливание;
- высокая мутность воды в приплотинной части из-за аккумуляции наносов с Верхнего Дона².

Большая масса растительности на мелководье негативно влияет на естественное воспроизводство промысловых видов рыб [20].

Интенсивная многолетняя эксплуатация, мощное антропогенное воздействие и естественные процессы старения водохранилища привели к значительной трансформации его экосистемы и ухудшению гидробиологического состояния.

К тому же продуктивность водохранилища существенно сокращается минимум по двум причинам:

- чрезмерный вылов промысловых видов (лещ, судак, тарань, сазан, щука и толстолобик);
- инвазия чужеродных видов (например, моллюсков *Dreissena polymorpha*, *D. bugensis*, ракообразных).

Для разработки стратегий устойчивого управления водохранилищем³ и предотвращения его дальнейшей деградации критически важны мониторинг и оценка состояния системы, выявление ключевых проблем и прогнозирование их развития [21].

Ниже обосновывается выбор графовой модели и ее элементов.

Анализ искусственного водоема — это длительная, объемная работа. Необходимо учесть несколько факторов, определяющих состояние объекта:

- 1) сложность экосистемы, в которой нелинейно взаимодействуют гидрология, климат, загрязнение, биогены, биота и другие факторы;
- 2) пространственная неоднородность водохранилища с различными условиями (верхний участок, центральное плесо, приплотинная зона);
- 3) недостаток пространственных репрезентативных данных в высоком разрешении по всем компонентам экосистемы (особенно бентос, зоопланктон, микробиология, загрязнители) для калибровки и валидации модели;
- 4) неопределенность входных данных и параметров моделей.

¹ Цимлянское водохранилище и водохранилища бассейна Нижнего Дона. Федеральное агентство водных ресурсов. URL: https://voda.gov.ru/activities/tsimlyanskoe-vodokhranilishche-i-vodokhranilishcha-basseyna-nizhnego-dona/?sphrase_id=177953&PAGEN_1=2 (дата обращения: 28.10.2025).

² Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник-2023. Ростов: Росгидромет, Гидрохимический институт; 2024. 156 с. URL: <https://clck.ru/3QZ3Sk> (дата обращения: 28.10.2025).

³ Стратегия социально-экономического развития Ростовской области на период до 2030 года. Постановление Правительства Ростовской области № 864 от 26.12.2018. В редакции № 1100 от 19.12.2022). Раздел «Экология». Официальный портал Правительства Ростовской области. URL: <https://www.donland.ru/activity/2158/#pri435> (дата обращения: 28.10.2025).

Модели, описывающие гидробиологические процессы в водоеме, можно разделить на несколько классов.

1. Статистические. Базируются на данных мониторинга и широко используются для выявления значимых связей между отдельными факторами (объемы популяций рыб, фитопланктона, вылов). К недостаткам таких моделей можно отнести слабый учет косвенных эффектов и обратных связей, а также необходимость большого объема замеров [22].

2. Динамические (например, NPZD или NPZD⁺⁴). Позволяют моделировать потоки, в том числе популяции рыбы, но при этом требуют большого объема входных данных, сложны в калибровке, слабо учитывают некоторые антропогенные воздействия (например, точечное загрязнение) [23].

3. Агент-ориентированные. Моделируют поведение отдельных популяций. Крайне ресурсоемки и требуют детальных знаний о поведении, что ограничивает области их применения.

4. Гидродинамико-экологические (Delft3D, MIKE, Ce-Qual-W2, Azov3D). Позволяют учесть пространственную неоднородность, интегрировать гидрофизические, биологические и химические процессы. Однако их применение в моделировании сложной динамики популяций рыб и множественных антропогенных воздействий в искусственном водоеме — это трудоемкая задача с точки зрения вычислений [24].

5. Концептуальные (DPSIR⁵). Полезны для структурирования проблемы, но не позволяют проводить количественный анализ и прогнозирование.

Таким образом, известные модели либо слишком упрощены и не подходят для учета сложных взаимодействий (как статистические), либо чрезмерно сложны для построения и ресурсоемки для оперативного использования (динамические, агент-ориентированные и гидродинамические), либо не дают количественных прогнозов (концептуальные).

Графовые модели представляют собой относительно простой и гибкий инструмент, способный интегрировать разнородные данные (физические, химические, биологические, антропогенные) и наглядно представлять структуру их взаимодействий для анализа и прогноза состояния рыбных ресурсов.

Анализ моделей ихтиологии позволил детально изучить факторы, определяющие продукционно-дистракционные процессы в водоеме. Так, в статье [18] рассматривается графовая система влияния антропогенных и биотических факторов на продуктивность водоема. Автор указанной работы обозначил как вершины графа 12 факторов, во многом определяющих динамику популяции осетровых. В [25] показана роль промысла в динамике численности популяции с учетом возраста и пола особей. В [26] кроме промысла учитываются сезонные изменения среды обитания минтая *Theragra chalcogramma*.

К недостаткам рассмотренных моделей можно отнести отсутствие учета пространственно-неоднородных гидродинамических процессов. К тому же многие модели игнорируют важное условие воспроизводства промысловых рыб — механизм наружно-гормонального регулирования фито- и зоопланктона.

На основе анализа гидробиологического состояния Цимлянского водохранилища и некоторых математических моделей популяционной динамики при построении графовой модели учтены следующие факторы: v_1 — состояние нерестовой части стада рыб; v_2 — годовое пополнение молоди; v_3 — естественная (компенсационная) убыль поколения; v_4 — благоприятность условий полового созревания; v_5 — удельная эффективность естественного воспроизводства (подкорм); v_6 — масштабы искусственного выпуска; v_7 — уровень промысловой эксплуатации рыбных биоресурсов; v_8 — биомасса доминирующего вида кормового бентоса; v_9 — обеспеченность кислородом кладок икры на нерестилище; v_{10} — трансгрессия уровня Цимлянского водохранилища; v_{11} — численность основных естественных врагов молоди; v_{12} — доступная протяженность путей нерестовой миграции; v_{13} — зарастание ракушкой дрейссены (*Dreissena polymorpha*); v_{14} — эвтрофикация; v_{15} — состояние вод Цимлянского водохранилища; v_{16} — изменение биомассы леща; v_{17} — изменение концентрации фито- и зоопланктона; v_{18} — изменение концентрации биогенных веществ (соединения азота, фосфора, кремния); v_{19} — влияние абиотических факторов (соленость, температура); v_{20} — антропогенное воздействие (очистка дна водохранилища от инвазивного вида — ракушки дрейссены).

На основании анализа гидробиологического состояния Цимлянского водохранилища получен граф $G(V, E, Y)$. Здесь:

- V — множество вершин графа (концептов), $v_k \in V$, $k = \overline{1, 20}$;
- E — множество ориентированных ребер (связей) $e_k = (v_i, v_j)$, заданных в виде упорядоченных пар (кортежей) длины 2, $i \neq j$;
- Y — отображение, $Y: V \rightarrow V$.

⁴ От англ. nutrient — питательные вещества, phytoplankton — фитопланктон, zooplankton — зоопланктон, detritus — детрит.

⁵ От англ. driving forces — pressure — state — impact — response (движущие факторы — нагрузки — состояние — воздействие — реакция).

Полученная графовая модель (когнитивная карта) биопродуктивности Цимлянского водохранилища представлена на рис. 1. При изображении ребер графа на рис. 1 пунктирная линия обозначает положительный эффект, сплошная — отрицательный. Слабое воздействие отражается единичной стрелкой, сильное — двойной.

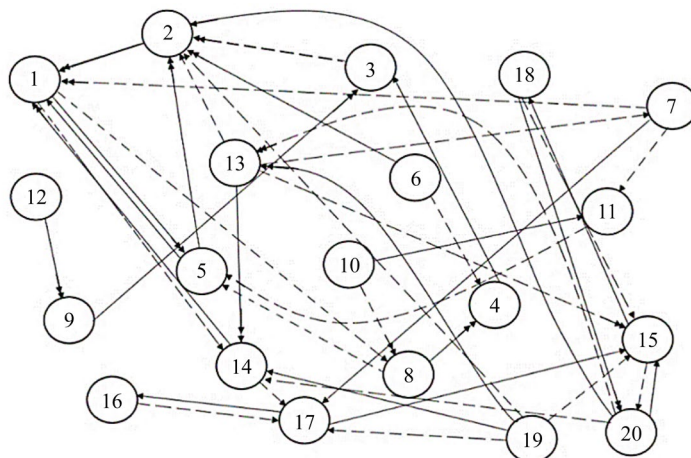


Рис. 1. Графовая модель биопродуктивности Цимлянского водохранилища

Матрица весов графовой модели получена на основе интегральной оценки экспертных мнений с учетом важности влияния каждого фактора (концепта). Эксперты — специалисты в таких областях, как гидробиология, экология водных экосистем, ихтиология, математическое моделирование, вычислительная математика, программирование и пр. При расчете весовых коэффициентов матрицы задействовали постоянно пополняемую информационную базу по гидробиологии и химии. Ее создали авторы в ходе многолетних экспедиционных исследований.

Кроме того, анализировались литературные источники, сведения, полученные при дистанционном зондировании Земли, а также данные:

- о гидробиохимии мелководных водоемов;
- о видовом составе ценных и промысловых рыб.

Далее при анализе влияния тех или иных факторов на продуктивность Цимлянского водохранилища для слабого воздействия (одиночная стрелка) весовой коэффициент составит $\pm 0,5$, а для сильного воздействия (двойная стрелка) — ± 1 .

Результаты исследования. Для численной реализации описанной графовой модели продуктивности Цимлянского водохранилища разработан программный комплекс на языке Python. Он позволяет задействовать и отдельные подграфы, и полную когнитивную карту биопродуктивности Цимлянского водохранилища (рис. 1). Так можно точнее описать процессы, влияющие на экосистему водоема.

Ниже перечислены основные шаги алгоритма реализации графовой модели продуктивности Цимлянского водохранилища.

Шаг 1. Определение множества вершин графа путем выбора рассматриваемых вершин графовой модели (рис. 1). Задание временного промежутка моделирования N (в годах) и номера временного слоя $n = 1$.

Шаг 2. Задание для построенной графовой модели начального вектора веса вершин (факторов):

$$X_{n-1} = \{x_{i(n-1)}\}_{i=1}^k,$$

где k — количество рассматриваемых вершин (факторов).

Шаг 3. Задание матрицы связей (вес ребер графа) U_n , полученной на основе экспертных мнений, для текущего временного слоя n . Для слабого воздействия — $\pm 0,5$, для сильного — ± 1 , при отсутствии воздействия — 0.

Шаг 4. Задание вектора внешних импульсов $Q_{n-1} = \{q_{i(n-1)}\}_{i=1}^k$ для текущего временного слоя n .

Шаг 5. Вычисление вектора импульса R_n для текущего временного слоя n [18]:

$$R_n = X_n - X_{n-1}, \quad n = \overline{1, N}. \quad (1)$$

Шаг 6. Пересчет вектора веса вершин (факторов) для текущего временного слоя n [18]:

$$X_n = X_{n-1} + UR_{n-1} + Q_{n-1}. \quad (2)$$

Шаг 7. Если $n < N$, то переход к шагу 5. Иначе — завершение работы и построение графика.

С учетом выражения (2) формулу (1) можно представить так:

$$R_n = UR_{n-1} + Q_{n-1},$$

или

$$R_1 = Q_0, \quad R_2 = U^1 Q_0 + EQ_1, \dots, \quad R_n = \sum_{k=1}^{n-1} U^k Q_{n-k-1} + EQ_{n-1}. \quad (3)$$

Полагаем, что возможны несколько сценариев повышения продуктивности Цимлянского водохранилища. В первом рассмотрим избавление водохранилища от инвазивного вида — ракушки дрейссена — в случае проведения разовых очистительных мероприятий (только в первый год).

Сценарий 1. Итак, антропогенное влияние — очистка дна Цимлянского водохранилища от ракушки дрейссена в первый год.

В графовую модель для данного сценария включим следующие факторы (вершины) из полной модели (рис. 1): v_{15} — состояние вод Цимлянского водохранилища; v_{18} — изменение концентрации биогенных веществ (соединения азота, фосфора и кремния); v_{20} — антропогенное воздействие (очистка дна водохранилища от инвазивного вида — ракушки дрейссена).

На рис. 2 представлена графовая модель (подграф графа с рис. 1) данного сценария. Цветом выделен фактор, на который воздействует положительный внешний импульс.

Моделируется развитие ситуации в течение трех лет.

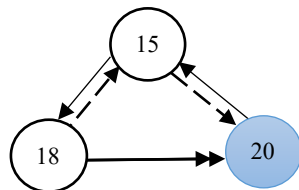


Рис. 2. Графовая модель для сценария 1

Зададим матрицу связей U для графовой модели (рис. 2):

$$U = \begin{pmatrix} 0 & -0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0 & -0,5 \\ \infty & -1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Зададим вектор внешних импульсов. Очистка происходит только в первый год, поэтому зададим положительный импульс (+1) в вершине v_{20} для Q_0 , а для остальных лет не будем задавать внешние импульсы:

$$Q_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad Q_1 = Q_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Вычислим импульсы R_n :

$$R_1 = Q_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad R_2 = UR_1 + Q_1 = \begin{pmatrix} 0,5 \\ -0,5 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad R_3 = UR_2 + Q_2 = \begin{pmatrix} 0,25 \\ 0,25 \\ 0,5 \end{pmatrix}.$$

На рис. 3 представлены результаты изменения импульсов R_n для факторов состояния воды (v_{15}) и изменения концентрации биогенных веществ (v_{18}).

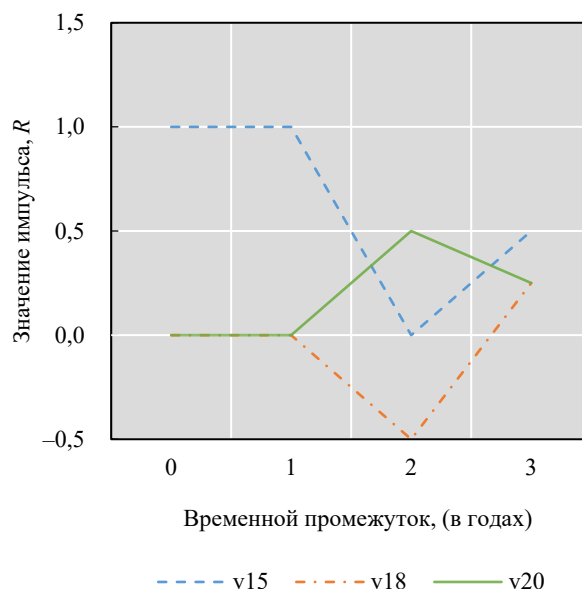


Рис. 3. Результаты моделирования для сценария 1

Сценарий 2. Рассмотрим антропогенное влияние — ежегодную очистку дна Цимлянского водохранилища от дрейссены в течение трех лет.

Когнитивная карта данного сценария также описывается рис. 3. Матрица связей U — как в сценарии 1.

Зададим вектор внешних импульсов (+1) в вершине v_{20} в каждый год моделирования:

$$Q_0 = Q_1 = Q_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Вычислим импульсы R_n :

$$R_1 = Q_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad R_2 = UR_1 + Q_1 = \begin{pmatrix} 0,5 \\ -0,5 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad R_3 = UR_2 + Q_2 = \begin{pmatrix} 0,75 \\ -0,25 \\ 1,5 \end{pmatrix}.$$

На рис. 4 представлены результаты изменения импульсов R_n для рассмотренных трех факторов с течением времени.

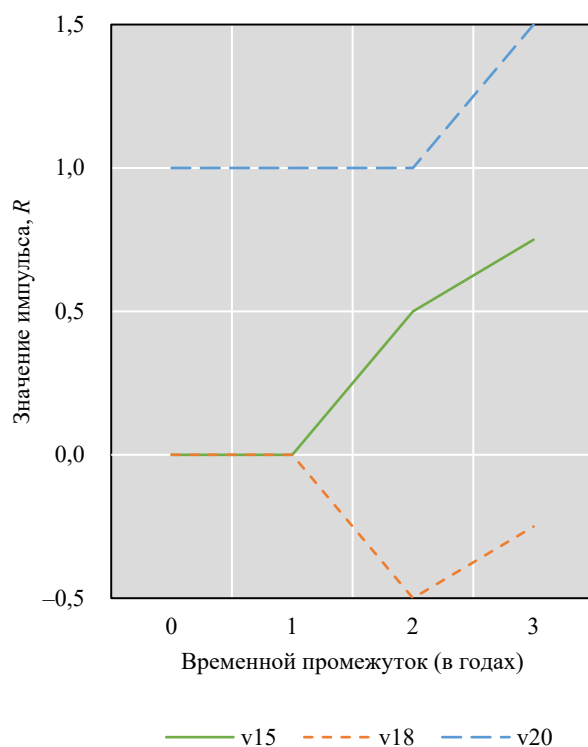


Рис. 4. Результаты моделирования для сценария 2

Рассмотрим два сценария антропогенного влияния на удельную эффективность естественного воспроизводства промысловой рыбы (лещ) в Цимлянском водохранилище — в течение года и пяти лет.

Сценарий 3. Представим удельную эффективность естественного воспроизводства леща в Цимлянском водохранилище при внесении кормовых добавок для его питания в первый год.

В графовую модель включим следующие факторы (вершины): v_1 — состояние нерестовой части стада рыб; v_2 — годовое пополнение молоди; v_5 — удельная эффективность естественного воспроизводства (подкорм рыбы); v_7 — уровень промысловой эксплуатации рыбных биоресурсов; v_{14} — эвтрофикация.

На рис. 5 представлена когнитивная карта данного сценария.

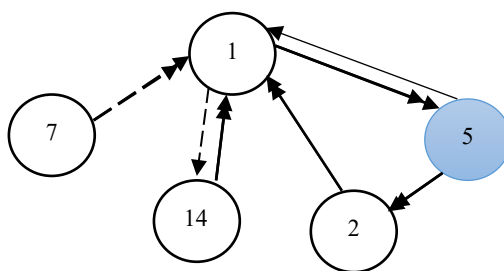


Рис. 5. Графовая модель для сценария 3

Моделируется динамика ситуации в течение пяти лет.

Зададим матрицу связей U , основанную на экспертных мнениях:

$$U = \begin{pmatrix} 0 & \infty & -1 & \infty & 0,5 \\ -1 & 0 & \infty & \infty & \infty \\ -0,5 & -1 & 0 & \infty & \infty \\ 1 & \infty & \infty & 0 & \infty \\ -1 & \infty & \infty & \infty & 0 \end{pmatrix}.$$

Зададим вектор внешних импульсов. Кормовые добавки вносятся только в первый год, поэтому зададим положительный импульс (+1) в вершине v_5 для Q_0 . Для остальных лет не будем задавать внешние импульсы:

$$Q_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Вычислим импульсы R_n , $n \in \overline{1,5}$:

$$R_1 = Q_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad R_2 = UR_1 + Q_1 = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad R_3 = UR_2 + Q_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0,5 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad R_4 = UR_3 + Q_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad R_5 = UR_4 + Q_4 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

На рис. 6 показано, как с течением времени менялись импульсы R_n для рассмотренных факторов.

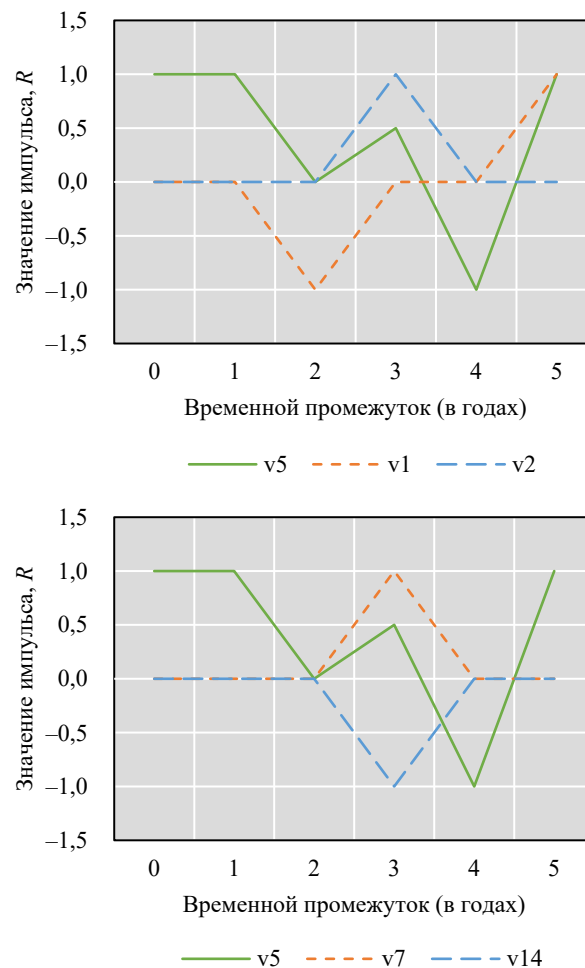


Рис. 6. Результаты моделирования для сценария 3

Сценарий 4. Рассмотрим удельную эффективность естественного воспроизводства промыслового леща в Цимлянском водохранилище при ежегодном внесении кормовых добавок в течение 5 лет.

Когнитивная карта данного сценария также описывается рис. 6. Матрица связей U аналогична сценарию 3.

Зададим вектор внешних импульсов (+1) в вершине v_5 в каждый год моделирования:

$$Q_0 = Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Вычислим импульсы R_n , $n \in \overline{1,5}$:

$$R_1 = Q_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad R_2 = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad R_3 = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 1,5 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad R_4 = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 0,5 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad R_5 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0,5 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

На рис. 7 представлены результаты изменения импульсов R_n для рассмотренных факторов с течением времени.

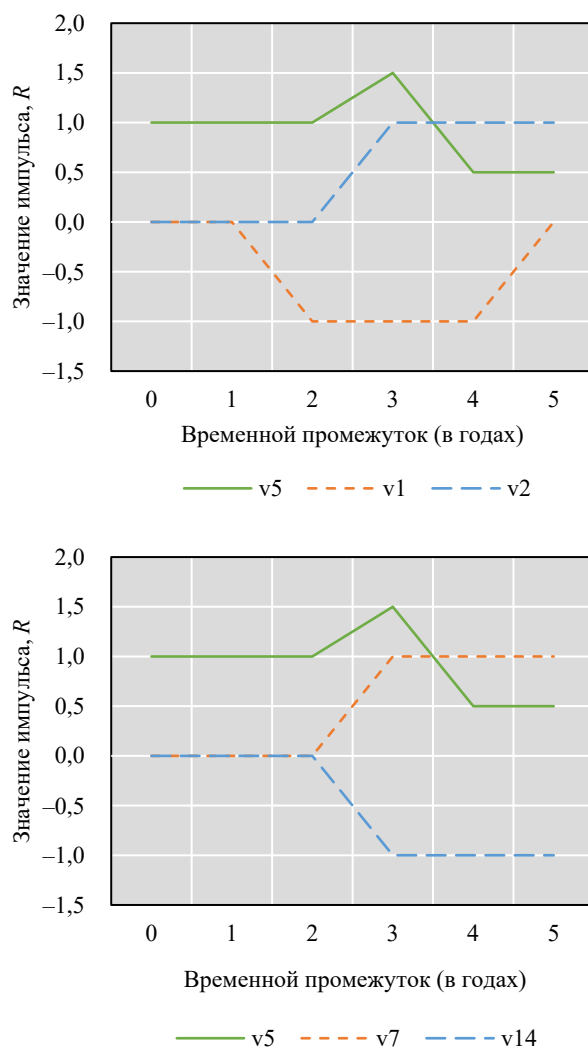


Рис. 7. Результаты моделирования сценария 4

Обсуждение. Итак, первые два сценария отражают влияние очистки дна водохранилища от инвазивного вида — ракушки дрейссена. В первом сценарии очистка проводится только в первый год, во втором — на протяжении всего периода моделирования (3 года). Сравнение результатов моделирования позволяет утверждать, что ежегодная очистка дна водохранилища от ракушки существенно улучшает состояние воды. Такое антропогенное воздействие позволяет сократить концентрацию загрязняющих биогенных веществ (соединения азота, фосфора, кремния). В результате уменьшается эвтрофикация водоема, его зарастание водной растительностью и заболачивание, природное старение, повышается прозрачность вод. При единовременной очистке положительный эффект сохраняется не более года. Далее, со 2-го по 3-й год концентрация соединений азота, фосфора и кремния будет расти, если не возобновить очистку дна от дрейссены.

Визуализация результатов моделирования для второго сценария (рис. 4) показала, что ежегодная очистка дна Цимлянского водохранилища в течение трех лет значительно улучшает состояние вод Цимлянского водохранилища. Эффект лучше, чем в первом сценарии, так как импульс состояния вод Цимлянского водохранилища продолжает более интенсивно расти и в третий год. На третий год импульс в сценарии 2 (рис. 4) составляет 0,75, а в сценарии 1 (рис. 3) — 0,25. Как и в первом сценарии (рис. 3), концентрация биогенных веществ (рис. 4) падает в течение первого года. Во второй год показатель увеличивается, но не столь резко и значительно, как в первом сценарии, то есть при однократной очистке дна. Для второго сценария не наблюдается почти зеркального соответствия графиков антропогенного воздействия и концентрации биогенных веществ. Таким образом, ежегодная очистка дна водоема от дрейссены более эффективна для улучшения состояния воды и менее — для концентрации биогенных веществ.

Вторую пару сценариев составили для ихтиологических процессов искусственного водоема. Рассматривалось влияние подкормки рыб на состояние нерестовой части стада, годовое пополнение молоди, уровень промысловой эксплуатации рыбных биоресурсов и эвтрофикацию водохранилища. В первом случае подкормка вносится только в первый год моделирования, во втором — на протяжении всего периода моделирования (5 лет). Единоразовое внесение подкормки положительно влияет на рост поголовья молоди и уровень промысловой эксплуатации, позволяет сократить эвтрофикацию, однако не дает устойчивых результатов. Ежегодные мероприятия по подкормке рыб позволяют существенно увеличить поголовье молоди и сократить эвтрофикацию. Это ведет к росту промысла.

Согласно данным рис. 6, в течение первого года подкорм не увеличивает ни пополнение молоди, ни уровень промысловой эксплуатации, ни эвтрофикацию водоема. То есть можно говорить об отложенном эффекте. В течение второго года нерестовой рыбы становится больше, растут годовое пополнение молоди и промысловая эксплуатация. Из-за активного промысла в течение третьего года сокращаются объемы пополнения молоди. Это взаимосвязанные факторы, поэтому промысловая эксплуатация падает в это же время. Эвтрофикация водоема сокращается в течение второго года. Это можно объяснить так: возросшая популяция рыб быстрее съедает водоросли. Затем молоди становится меньше, нерестовая часть популяции не растет. Как следствие, рыба съедает меньше водорослей — и в 3-й год эвтрофикация снова увеличивается. На протяжении 4-го года не растут графики пополнения молоди, промысла и эвтрофикации. Улучшение состояния нерестовой части можно объяснить подрастанием молоди.

Из представленных на рис. 7 графиков видно, что состояние водоема изменится более существенно, если продлить подкорм на пять лет. В течение первых трех лет результаты совпадают с результатами сценария 3. Затем наблюдается значительное улучшение годового пополнения молоди и рост промысловой эксплуатации рыбных биоресурсов. При этом отсутствуют столь явные циклические процессы увеличения и снижения поголовья, как это отмечалось по результатам моделирования 6-го сценария. Ухудшение состояния нерестовой части стада рыб до 4-го года можно объяснить ростом промысловой эксплуатации. Затем, к 5-му году, ситуация улучшается — видимо, благодаря подросшей молоди. Растущее поголовье рыбы вносит больший вклад в очистку водоема, так как съедает больше растительности. Поэтому заметно сокращается эвтрофикация.

На рис. 6 и 7 для первого года совпадает импульс от подкормки рыбы, рассчитанный по формуле (1). Во второй год импульс в сценарии 3 (рис. 6) падает до 0. Сценарий 4 (рис. 7) отражает возобновление подкормки, поэтому импульс достигает 1, а затем растет из-за накопительного эффекта и влияния подкормки на сопутствующие факторы. Развитие этой ситуации ведет к тому, что молоди становится больше, ей нужно больше пищи, и подкормка уже не дает столь значительного импульса.

Для интерпретации результатов важно учесть, что, согласно формуле (1), снижение импульса (в случае его положительного значения) не противоречит увеличению значения соответствующего фактора. Таким образом, рис. 6 и 7 математически отражают исследуемые биологические процессы.

На основании полученных результатов можно судить о том, как обеспечить устойчивое экологическое развитие Цимлянского водохранилища. Для этого необходимы ежегодные плановые мероприятия по экологическому мониторингу и антропогенному воздействию (с обязательной оценкой экономической составляющей).

Заключение. Предложенная графовая модель включает 20 факторов (концептов), существенно влияющих на состояние вод и биопродуктивность Цимлянского водохранилища. Решение создавалось в условиях дефицита экспертной информации и редко обновляющейся базы индикаторов. Матрица весовых коэффициентов, соответствующая предложенной графовой модели, основана на экспертных оценках. Они могут быть субъективными и не окончательными (т.е. изменяться с течением времени). Кроме того, при агрегировании данных не исключены погрешности при оценке значений импульсов. В рамках выбранного сценарного подхода предложенная графовая модель позволяет учитывать новую информацию и оперативно, с минимальными вычислительными затратами анализировать эффективность планируемых мероприятий по улучшению экологического состояния водоема.

Итоги работы можно масштабировать, чтобы оценить экономический эффект и ущерб антропогенных воздействий на изучаемые водные экосистемы, которые в идеальном случае должны стремиться к гомеостазу.

Представленную модель можно совершенствовать за счет более тонкой настройки весовых коэффициентов, учета нелинейных и пороговых эффектов, а также других индикаторов.

Список литературы / References

1. Герасимов Ю.В., Малин М.И., Соломатин Ю.И., Косолапов Д.Б., Лазарева В.И., Сабитова Р.З. и др. Итоги комплексного исследования структуры и функционирования экосистем каскада волжских водохранилищ в 2017 г. В: *Тезисы докладов конференции «Экспедиционные исследования на научно-исследовательских судах ФАНО России и архипелаге Шпицберген в 2017 г.»* Севастополь: ФГБУН МГИ РАН; 2018. С. 178–187.

Gerasimov YuV, Malin MI, Solomatina YuI, Kosolapov DB, Lazareva VI, Sabitova RZ, et al. Results of a Comprehensive Study of the Structure and Functioning of Ecosystems of the Volga Reservoir Cascade in 2017. In: *Proceedings of the Conference "Expeditionary Research on Research Vessels of the Federal Agency for Scientific Organizations of Russia and the Spitsbergen Archipelago in 2017"*. Sevastopol: Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences; 2018. P. 178–187. (In Russ.)

2. Белова Ю.В., Никитина А.В. Применение методов усвоения данных наблюдений для моделирования распространения загрязняющих веществ в водоеме и управления устойчивым развитием. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2024;8(3):39–48. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-39-48>

Belova YuV, Nikitina AV. Application of Methods of Observational Data Assimilation to Model the Spread of Pollutants in a Reservoir and Manage Sustainable Development. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2024;8(3):39–48. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-39-48>

3. Wantzen KM, Rothhaupt K-O, Mörtl M, Cantonati M, G.-Tóth L, Fischer P. Ecological Effects of Water-Level Fluctuations in Lakes. *Hydrobiologia*. 2008;613:1–4. <https://doi.org/10.1007/s10750-008-9466-1>

4. Минина Л.М., Минин А.Е., Моисеев А.В. Влияние динамики уровней воды в весенний период на площадь нерестилищ и эффективность естественного воспроизводства лимнофильных видов рыб Чебоксарского водохранилища. *Труды ВНИРО*. 2021;185:84–93. <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2021-185-84-93>

Minina LM, Minin AE, Moiseev AV. Influence of the Dynamics of Water Levels in Spring on the Area Spawning Grounds and Efficiency of Natural Reproduction Limnophilic Fish Species of the Cheboksary Reservoir. *Trudy VNIRO*. 2021;185:84–93. (In Russ.) <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2021-185-84-93>

5. Logez M, Roy R, Tissot L, Argillier C. Effects of Water-Level Fluctuations on the Environmental Characteristics and Fish-Environment Relationships in the Littoral Zone of a Reservoir. *Fundamental and Applied Limnology*. 2016;189(1):37–49. <https://doi.org/10.1127/fal/2016/0963>

6. Белова Ю.В., Рахимбаева Е.О., Литвинов В.Н., Чистяков А.Е., Никитина А.В., Атаян А.М. Изучение качественных закономерностей процесса эвтрофирования мелководного водоема на основе математической модели биологической кинетики. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование*. 2023;16(2):14–27. <https://doi.org/10.14529/mmp230202>

Belova YuV, Rahimbaeva EO, Litvinov VN, Chistyakov AE, Nikitina AV, Atayan AM. The Qualitative Regularities of the Eutrophication Process of a Shallow Water Research Based on a Biological Kinetics Mathematical Model. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software*. 2023;16(2):14–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.14529/mmp230202>

7. Moiseenko TI. Aquatic Ecotoxicology: Theoretical Principles and Practical Application. *Water Resources*. 2008;35(5):530–541. <https://doi.org/10.1134/S0097807808050047>

8. Шибаев С.В. *Промысловая ихтиология*. Санкт-Петербург: Проспект Науки; 2024. 399 с. URL: <https://www.iprbookshop.ru/79996.html> (дата обращения: 30.08.2025).

Shibaev SV. *Commercial Ichthyology*. Saint Petersburg: Prospekt Nauki; 2024. 399 p. (In Russ.) URL: <https://www.iprbookshop.ru/79996.html> (accessed: 30.08.2025).

9. Strayer DL. Alien Species in Fresh Waters: Ecological Effects, Interactions with Other Stressors, and Prospects for the Future. *Freshwater Biology*. 2010;55:152–174. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02380.x>

10. Алимов А.Ф., Богущкая Н.Г. *Биологические инвазии в водных и наземных экосистемах*. Монография. Москва: Общество с ограниченной ответственностью Товарищество научных изданий КМК; 2004. 436 с.

Alimov AF, Bogutskaya NG. *Biological Invasions in Aquatic and Terrestrial Ecosystems*. Monograph. Moscow: Limited Liability Company Scientific Publications Partnership KMK; 2004. 436 p. (In Russ.)

11. Звягинцев А.Ю., Гук Ю.Г. Оценка экологических рисков, возникающих в результате биоинвазий в морские прибрежные экосистемы Приморского края (на примере морского обрастания и балластных вод). *Известия ТИНРО*. 2006;145:3–38.

Zviagintsev AYu, Guk YuG. Estimation of Ecological Risk Arising from Bioinvasion in Marine Coastal Ecosystems of Primorye Region (with Sea Fouling and Ballast Waters as an Example). *Izvestiya TINRO*. 2006;145:3–38. (In Russ.)

12. Лазарева В.И., Сабитова Р.З. Зоопланктон Цимлянского водохранилища и канала Волга–Дон. *Зоологический журнал*. 2021;100(6):603–617. <https://doi.org/10.31857/S0044513421040115>

Lazareva VI, Sabitova RZ. Zooplankton of the Tsimlyansk Reservoir and Volga–Don Shipping Canal. *Zoologicheskii Zhurnal*. 2021;100(6):603–617. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0044513421040115>

13. Persson L, De Roos AM, Claessen D, Byström P, Lövgren J, Sjögren S, et al. Gigantic Cannibals Driving a Whole-Lake Trophic Cascade. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2003;100(7):4035–4039. <https://doi.org/10.1073/pnas.0636404100>

14. Sukhinov AI, Chistyakov AE, Belova YV, Nikitina AV, Sumbaev VV, Semenyakina AA. Supercomputer Modeling of Hydrochemical Condition of Shallow Waters in Summer Taking into Account the Influence of the Environment. *Communications in Computer and Information Science*. 2018;910:336–351. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99673-8_24

15. Williams RJ, Martinez ND. Simple Rules Yield Complex Food Webs. *Nature*. 2000;404:180–183. <https://doi.org/10.1038/35004572>

16. Urban D, Keitt T. Landscape Connectivity: A Graph-Theoretic Perspective. *Ecology*. 2001;82(5):1205–1218. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2001\)082\[1205:LCAGTP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2001)082[1205:LCAGTP]2.0.CO;2)

17. Dambacher JM, Hang-Kwang Luh, Hiram W Li, Rossignol PA. Qualitative Stability and Ambiguity in Model Ecosystems. *The American Naturalist*. 2003;161(6):876–888. <https://doi.org/10.1086/367590>

18. Переварюха А.Ю. Графовая модель взаимодействия антропогенных и биотических факторов в продуктивности Каспийского моря. *Вестник Самарского университета. Естественная серия*. 2015;21(10):181–198. <https://doi.org/10.18287/2541-7525-2015-21-10-181-198>

Perevaryukha AYU. Graph Model of Interaction of Anthropogenic and Biotic Factors for Productivity of the Caspian Sea. *Vestnik of Samara University. Natural Science Series*. 2015;21(10):181–198. (In Russ.) <https://doi.org/10.18287/2541-7525-2015-21-10-181-198>

19. Голоколенова Т.Б. Динамика фитоценоза Верхнего плеса Цимлянского водохранилища. В: *Труды XVII Международной научно-практической конференции «Проблемы устойчивого развития и эколого-экономической безопасности регионов», Волжский, 27–28 апреля 2023 г.* Волгоград: Сфера; 2023. С. 145–149.

Golokolenova TB. Dynamics of the Phytocenosis of the Upper Reach of the Tsimlyansk Reservoir. In: *Proceedings of the XVII International Scientific-Practical Conference “Problems of Sustainable Development and Ecological and Economic Security of Regions”, Volzhsky, April 27–28, 2023.* Volgograd: Sfera; 2023. P. 145–149. (In Russ.)

20. Кочеткова А.И., Брызгалина Е.С., Калюжная И.Ю., Сиротина С.Л., Самотеева В.В., Ракшенко Е.П. Динамика зарастания Цимлянского водохранилища. *Принципы экологии*. 2018;(1):60–72. <https://doi.org/10.15393/j1.art.2018.7202>

Kochetkova AI, Bryzgalina ES, Kalyuzhnaya IY, Sirotina SL, Samoteyeva VV, Rakshenko EP. Overgrowth Dynamics of the Tsimlyansk Reservoir. *Principles of the Ecology*. 2018;1:60–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.15393/j1.art.2018.7202>

21. Чистяков А.Е., Кузнецова И.Ю. Оценка экологических рисков мелководного водоема при проведении дноуглубительных работ. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2024;9(2):37–46. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-37-46>

Chistyakov AE, Kuznetsova IYu. Assessment of Environmental Risks of a Shallow Water Body during Dredging Works. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2024;2:37–46. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-37-46>

22. Дудкин С.И., Леонтьев С.Ю., Мирзоян А.В. Состояние запасов и уловов промысловых видов рыб Азовского и Черного морей за период 2000–2020 гг.: динамика и тенденции. *Труды ВНИРО*. 2024;195:35–44. <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2024-195-35-44>

Dudkin SI, Leontiev SYu, Mirzoyan AV. The State of Stocks and Catches of Commercial Fish Species of the Azov and Black Seas for the Period 2000–2020: Dynamics and Trends. *Trudy VNIRO*. 2024;195:35–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2024-195-35-44>

23. Heinle A, Slawig T. Internal Dynamics of NPZD Type Ecosystem Models. *Ecological Modelling*. 2013;254:33–42. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.01.012>

24. Литвинов В.Н., Чистяков А.Е., Никитина А.В., Атаян А.М., Кузнецова И.Ю. Математическое моделирование гидродинамических процессов Азовского моря на многопроцессорной вычислительной системе. *Компьютерные исследования и моделирование*. 2024;16(3):647–672. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2024-16-3-647-672>

Litvinov VN, Chistyakov AE, Nikitina AV, Atayan AM, Kuznetsova IY. Mathematical Modeling of Hydrodynamics Problems of the Azov Sea on a Multiprocessor Computer System. *Computer Research and Modeling*. 2024;16(3):647–672. (In Russ.) <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2024-16-3-647-672>

25. Ревущая О.Л., Фрисман Е.Я. Промысловое воздействие на динамику популяции с возрастной и половой структурой: оптимальный равновесный промысел и эффект гидры. *Компьютерные исследования и моделирование*. 2022;14(5):1107–1130. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2022-14-5-1107-1130>

Revutskaya OL, Frisman EY. Harvesting Impact on Population Dynamics with Age and Sex Structure: Optimal Harvesting and the Hydra Effect. *Computer Research and Modeling*. 2022;14(5):1107–1130. (In Russ.) <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2022-14-5-1107-1130>

26. Абакумов А.И., Израильский Ю.Г. Эффекты промыслового воздействия на рыбную популяцию. *Математическая биология и биоинформатика*. 2016;11(2):191–204. <https://doi.org/10.17537/2016.11.191>

Abakumov AI, Izraily YuG. The Harvesting Effect on a Fish Population. *Mathematical Biology and Bioinformatics*. 2016;11(2):191–204. (In Russ.) <https://doi.org/10.17537/2016.11.191>

Об авторах:

Инна Юрьевна Кузнецова, старший преподаватель кафедры «Математика и информатика» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), mail@kuznetsova-i-yu.ru

Алла Валерьевна Никитина, доктор технических наук, профессор кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), nikitina.vm@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

И.Ю. Кузнецова: написание черновика рукописи, разработка программного обеспечения, визуализация, написание рукописи — внесение замечаний и исправлений.

А.В. Никитина: разработка концепции, научное руководство, написание рукописи — внесение замечаний и исправлений.

Конфликт интересов, авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Inna Yu. Kuznetsova, Senior Lecturer of the Department of Mathematics and Computer Science, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), mail@kuznetsova-i-yu.ru

Alla V. Nikitina, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Computer Engineering and Automated Systems Software, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), nikitina.vm@gmail.com

Claimed Contributorship:

IYu Kuznetsova: writing – original draft preparation, software, visualization, writing – review & editing.

AV Nikitina: conceptualization, supervision, writing – review & editing.

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

All authors have read and approved the final manuscript.

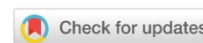
Поступила в редакцию / Received 22.09.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 17.10.2025

Принята к публикации / Accepted 26.10.2025

МАШИНОСТРОЕНИЕ

MACHINE BUILDING



УДК 656.2/.4

Статья-перспектива

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-4-319-330>

Снижение риска опрокидывания контейнеров под воздействием ветровой нагрузки путем совершенствования параметров упоров железнодорожных платформ



EDN: OYBJCC

А.А. Демьянов

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

alexys61@yandex.ru

Аннотация

Введение. Проблема падения контейнеров с железнодорожных платформ обостряется с развитием логистики, изменением климата и привлекает внимание исследователей. Рассматриваются ситуации на разных логистических объектах и для разных емкостей. Известно, как риск опрокидывания зависит от силы ветра, кривизны пути и высоты рельса. Есть методики определения потерь от рассматриваемых инцидентов. Результаты изысканий полезны для менеджмента логистики, однако внедрение таких решений требует времени, значительных затрат, поэтому редко реализуется на практике. Подход, описанный в данной статье, преодолевает эти ограничения, благодаря технической простоте. Цель работы — доказать эффективность изменения трех параметров платформ: бокового зазора у ее края, а также высоты и толщины стационарных упоров.

Материалы и методы. Анализировалась литература по проблеме, в том числе госстандарты, технические условия, строительные нормы и правила. В виде схем визуализировались необходимые для расчетов сопряжение фитинга и упора, параметры контейнера. В уравнениях учитывались также сила ветра, его боковая нагрузка на контейнер и региональные характеристики. Использовали данные о 40-футовом контейнере длиной $\approx 12,2$ м, высотой $\approx 2,6$ м, массой 3,9 тонн, с расстоянием между фитингами $\approx 2,3$ м. Региональные особенности ветров определили по карте «Районирование территории Российской Федерации по давлению ветра».

Результаты исследования. Доказано, что технически несложное изменение упоров платформы существенно снизит риски опрокидывания контейнера при значительной ветровой нагрузке. Нужно максимально уменьшить боковой зазор у края платформы, увеличить высоту стационарного упора до 106 мм, толщину — до 56 мм. Без модернизации 40-футовый контейнер опрокинется при ветровой нагрузке 120 Па. В предложенной автором конфигурации устойчивость контейнера на платформе существенно увеличится. В сухую погоду емкость сохранит устойчивость при боковом воздействии ветра силой ≈ 834 Па, при осадках — ≈ 500 Па. Таким образом, можно говорить об усилении в 7 раз и 4,2 раза соответственно.

Обсуждение. В изначальной конфигурации 40-футовый контейнер опрокинется при скорости ветра 11,9 м/с, или в I ветровой зоне — как в Москве или Минске. Предложенная автором модернизация позволит контейнеру устоять при скорости ветра 37 м/с (VII зона). В дождь и снег контейнер опрокинется при скорости ветра 29,5 м/с. Это IV зона (Казахстан и побережье Каспийского моря). В настоящее время здесь фиксируется активный автомобильный и железнодорожный трафик. В перспективе ожидается рост грузопотока в связи с реализацией проекта «Шелковый путь».

Заключение. Внедрение предложенной новации значительно сократит вероятность чрезвычайных ситуаций из-за падения контейнеров с железнодорожных платформ и, соответственно, повысит безопасность перевозок. Решение отличается технологической простотой и универсальностью. Конструкция контейнера остается прежней. Отдельные элементы платформы меняются минимально.

Ключевые слова: устойчивость контейнера на железнодорожной платформе, боковая ветровая нагрузка на контейнер, районирование по давлению ветра, стационарный упор для контейнера

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

Для цитирования. Демьянов А.А. Снижение риска опрокидывания контейнеров под воздействием ветровой нагрузки путем совершенствования параметров упоров железнодорожных платформ. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(4):319–330. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-4-319-330>

Perspective Article

Reducing the Risk of Container Overturning under Wind Loads by Improving the Parameters of Railway Platform Stops

Aleksey A. Demyanov  

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

 alexys61@yandex.ru

Abstract

Introduction. The problem of containers overturning off railway platforms has become more acute with the development of logistics and climate change, and is attracting the attention of researchers. This paper examines the situations at various logistics facilities and different capacities. It is known how the risk of overturning depends on the strength of the wind, the curvature of the track, and the height of the rail. There are methods to calculate losses from these incidents. The results of the survey are useful for logistics management, but implementing such solutions takes time and significant resources, so they are rarely implemented in practice. The approach described in this article addresses these limitations by its technical simplicity. Its aim is to demonstrate the effectiveness of adjusting three platform parameters: the lateral gap at the edge, as well as the height and thickness of the stationary stops.

Materials and Methods. The literature on the subject was analyzed, including state standards, technical specifications, and building codes and regulations. The connection between the fitting and the stop, as well as the container's parameters necessary for calculations, were visualized in diagrams. The equations took into account the strength of the wind, its lateral load on the container, and regional characteristics. We used data on a 40-foot container with dimensions of approximately 12.2 meters in length, 2.6 meters in height, and 3.9 tons in weight, with spacing between fittings of approximately 2.3 meters. Regional wind patterns were determined using the “Zoning of the Territory of the Russian Federation by Wind Pressure” map.

Results. It has been proven that a technically simple change in platform stops would significantly reduce the risks of container overturning under significant wind load. It was necessary to minimize the lateral play at the edge of the platform, increase the height of the stationary stop to 106 mm, and its thickness to 56 mm. Without these upgrades, a 40-foot container would overturn at a wind speed of 120 Pa. With the proposed configuration, the stability of the container on the platform was significantly improved. In dry conditions, the container remained stable under wind forces of ≈ 834 Pa, with precipitation — ≈ 500 Pa. This represented a gain of 7 times and 4.2 times, respectively, in stability.

Discussion. In the initial configuration, a 40-foot container overturns at a wind speed of 11.9 m/s, or in wind zone I, as in Moscow or Minsk. The modernization proposed by the author will allow the container to withstand wind speeds of 37 m/s (zone VII). In rain and snow, the container will overturn at a wind speed of 29.5 m/s. This is zone IV (Kazakhstan and the coast of the Caspian Sea). Currently, there is active automobile and railway traffic here. Cargo traffic is expected to increase in the future due to the implementation of the Silk Road project.

Conclusion. The implementation of the proposed innovation will significantly reduce the likelihood of emergencies due to containers falling from railway platforms and, consequently, increase transportation safety. The solution is characterized by technological simplicity and versatility. The container design remains the same. Individual elements of the platform change minimally.

Keywords: container stability on a railway platform, lateral wind load on a container, wind pressure zoning, stationary container support

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

For Citation. Demyanov AA. Reducing the Risk of Container Overturning under Wind Loads by Improving the Parameters of Railway Platform Stops. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(4):319–330. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-4-319-330>

Введение. Требуется теоретической и прикладной проработки обостряющаяся проблема современной логистики — падение контейнеров с железнодорожных платформ. И пустые, и груженные емкости не выдерживают сильной ветровой нагрузки. Как следствие растет вероятность инцидентов и катастроф на железной дороге. Приведем некоторые резонансные примеры. 22 апреля 2014 года в Ямало-Ненецком автономном округе ветер опрокинул 11 контейнеров с грузом общей массой 20 тонн¹.

29 декабря 2015 года на участке Вишневка — Анар (Карагандинское направление) контейнер упал поперек пути. Пришлось остановить движение 12 поездов².

13 августа 2016 года на участке Домикан — Архаринск Забайкальской железной дороги порывы ветра снесли с платформы семь пустых контейнеров. Остановилось движение на двух направлениях³.

Эксперты называют две причины увеличения частоты таких инцидентов. Первая — рост объемов железнодорожных контейнерных перевозок. Вторая — изменения климата, которые обусловили усиление ветровых нагрузок.

По территории России проходит стратегически важный транспортный коридор Восток — Запад. Основу трафика составляют железнодорожные перевозки, в том числе контейнерные. Их объемы растут с 2019 года даже в условиях международных санкций⁴. В 2022 году ОАО «Российские железные дороги» («РЖД») перевезли в Китай рекордные 123 млн тонн грузов⁵. Это почти на треть больше, чем в 2021-м. В 2023 году показатель вырос еще на 85 %⁶.

Высокая динамика роста объемов перевозок сохраняется. «РЖД» все активнее работает на трансмонгольском направлении и в транзитном коридоре через Казахстан.⁷

Нестабильность глобальной логистики, особенно морского трафика через Суэцкий канал, повышает востребованность сухопутных перевозок из Азии в Европу по территории России. Чтобы стать полноценной альтернативой, российской системе железнодорожного транспорта следует решить ряд проблем. Одна из них — риски порчи, утраты груза и задержек доставки, обусловленные падением контейнеров с платформ.

Метеорологи фиксируют изменение ветровой нагрузки в разных регионах планеты. На некоторых территориях России все чаще наблюдаются ранее нехарактерные ураганы и смерчи.⁸ Такая погода неблагоприятно сказывается на транспортной инфраструктуре, в том числе железнодорожной. Очевидно, что опрокидывание контейнеров с платформ снижает безопасность перевозок.

Согласно современным исследованиям, под воздействием порывистого ветра на дорогах России ежегодно происходит около ста случаев опрокидывания контейнеров. Для серьезного инцидента достаточно скорости ветра 17 м/с [1].

В 2024 году руководство «РЖД» распорядилось при планировании перевозок учитывать справочно-аналитическую информацию о возможной силе и порывистости ветра на маршруте⁹.

При оценке ущерба от падения контейнеров следует учитывать не только порчу или утрату контейнера и груза. Важно принять во внимание последствия падения металлической емкости на пути. Это почти наверняка приведет к потерям от остановки движения. Однако не исключены и более тяжелые последствия — например, в условиях плохой видимости (ночь, туман и т. д.). Особенно опасно, если контейнер упадет с платформы на мосту.

Обзор литературы по вопросу показал, что исследователи рассматривали риски опрокидывания контейнеров в несопоставимых климатических условиях, на структурно и функционально отличающихся объектах глобальной транспортной системы. Изучались, например, движение железнодорожных и автомобильных платформ с контейнерами, а также риски недвигающихся контейнеров в ожидании погрузочно-разгрузочных работ.

Так, в [2] рассматриваются методы оценки устойчивости от опрокидывания контейнеров при перевозке на специализированных железнодорожных платформах. В работе [3] описаны условия, при которых возможно опрокидывание пустых контейнеров различных типов. Показано, как вероятность инцидента зависит от силы ветра, кривизны пути и высоты наружного рельса. Созданы методики для определения экономических, финансовых и репутационных издержек, связанных с такими инцидентами.

¹ В ЯНАО из-за сильного ветра с поезда слетели 11 контейнеров с грузом. life.ru. URL: <https://life.ru/p/131740> (дата обращения: 08.11.2025).

² В Акмолинской области сильным ветром с грузового поезда сошло контейнер. URL: <https://www.zakon.kz/proisshestviia/4766046-v-karagandinskoi-oblasti-silnym-vetrom.html> (дата обращения: 08.11.2025).

³ О движении поездов на перегоне Архара — Домикан Свободненского региона Забайкальской железной дороги. РЖД. URL: <https://zabzd.rzd.ru/ru/2332/page/2452802?id=90092> (дата обращения: 08.11.2025).

⁴ Урьянка контейнерных перевозок России есть трехкратный потенциал для роста. URL: <https://clck.ru/3QX92T> (дата обращения: 08.11.2025).

⁵ «РЖД» в 2022 году увеличили грузоперевозки с Китаем на 28 %, до 123 млн т. URL: <https://www.interfax.ru/business/886341> (дата обращения: 08.11.2025).

⁶ «РЖД» в январе-феврале нарастили грузоперевозки с Китаем почти в 1,9 раза. URL: <https://www.interfax.ru/business/892180> (дата обращения: 08.11.2025).

⁷ Там же.

⁸ Губаева Л. Как изменится климат России в XXI веке и почему надо привыкать к погодным аномалиям. Реальное время. URL: <https://m.realnoevremya.ru/articles/184780-kak-globalnoe-izmenenie-klimata-otrazitsya-na-rossii-v-xxi-veke> (дата обращения: 08.11.2025).

⁹ Об утверждении Порядка организации безопасного пропуска грузовых поездов, в составе которых имеются порожние контейнеры, при прогнозировании опасного явления погоды по маршруту их следования. Распоряжение № 2115 от 19 октября 2016 года. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456030815> (дата обращения: 08.11.2025).

В [4] изучается влияние бокового ветра на различные типы железнодорожных транспортных средств для городских и пригородных перевозок. Следует сказать, что эта проблема актуальна не только для железнодорожного, но и для автомобильного трафика [5]. Есть публикации, в которых авторы определяют минимальные скорость и угол ветровой атаки относительно вектора движения состава в климатических условиях южной Австралии [6] и Колумбии [7], и это подчеркивает масштаб и глобальную актуальность проблемы.

Известны работы по прогнозированию экономического ущерба от сбоев в работе океанических контейнерных портов из-за ветра [8], в том числе из-за экстремальных ветровых явлений [9]. В [10] представлены методы моделирования ущерба контейнерным перевозкам от ветровых воздействий и предлагается разработка долгосрочных метеопрогнозов. Итоги этого исследования можно экстраполировать на работу других смежных субъектов портовой логистики, например, на компании, занятые в сфере грузовых железнодорожных перевозок.

В исследовании о повышении безопасности водного транспорта в условиях сильного ветра [11] предлагается комплексный инструмент повышения осведомленности о рисках для лиц, принимающих решения, которые должны предотвратить катастрофу в штормовую погоду. Такой подход можно интегрировать с принципами безопасной работы любой транспортной системы, в том числе железнодорожной.

Описанные выше научные изыскания дают решения, необходимые для управленческой практики в сфере логистики. Все они могут быть полезны при решении проблемы падения контейнеров с железнодорожных платформ. Однако рассмотренные подходы — комплексные или изначально заявляются как часть масштабной системы безопасности. Это значит, что для их реализации необходимы значительные финансовые и временные ресурсы. Требуется доработка с учетом не только общероссийской специфики, но и особенностей отдельных территорий, по которым идут грузовые поезда с контейнерами. Со временем такие адаптированные решения, безусловно, появятся. Однако некоторые меры можно принять уже сейчас. Они должны быть сравнительно малозатратными и легко реализуемыми. Цель представленной работы — доказать эффективность изменения трех параметров платформы: бокового зазора у ее края, а также рабочей высоты и толщины стационарного упора.

Материалы и методы. Анализ способов крепления контейнеров показывает, что параметры фитингов едины и зафиксированы в ГОСТ Р 51891–2008, а конструкции упоров разнообразны и регламентируются различными техническими условиями.

Ниже перечислены наиболее распространенные конструкции упоров:

- стационарный, привариваемый к раме платформы (рис. 1);
- откидной одинарный сварной (рис. 2);
- откидной одинарный литой (рис. 3);
- откидной двойной сварной (рис. 4);
- откидной одинарный с дополнительным креплением (рис. 5).

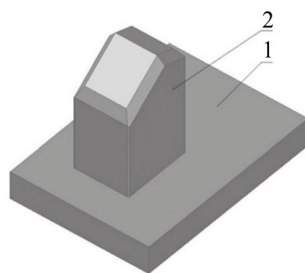


Рис. 1. Упор неоткидной, стационарный, привариваемый к раме платформы 31887-НСБ [12]:

1 — основание; 2 — упор

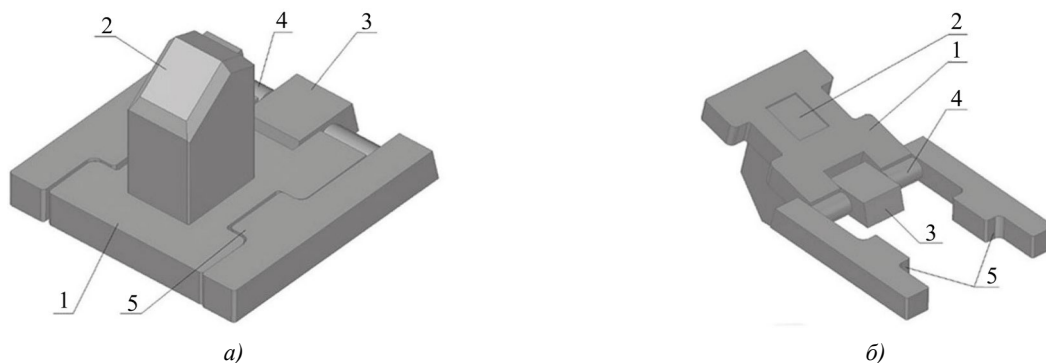


Рис. 2. Упор откидной одинарный сварной 31901-НСБ [12]:

а — исходное положение; б — откинутое положение;

1 — основание упора; 2 — упор; 3 — петля (шарнир); 4 — палец; 5 — плита упора

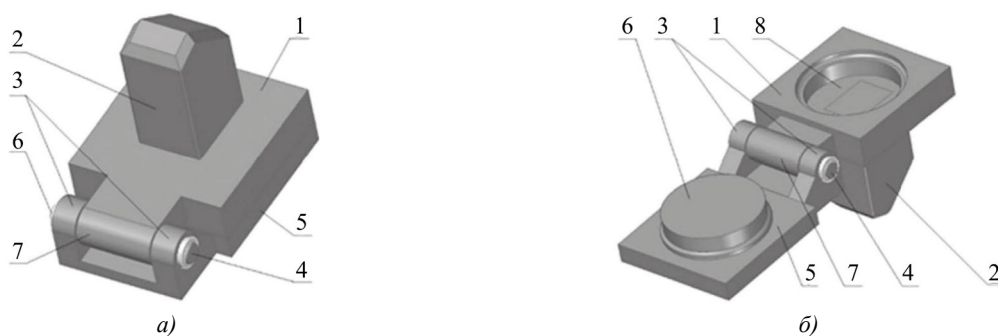


Рис. 3. Упор откидной одинарный литой 31896-НСБ [12]:

a — исходное положение; *б* — откинутое положение; 1 — основание упора; 2 — упор; 3 — петля основания; 4 — палец; 5 — плита упора; 6 — центрирующий выступ; 7 — петля упора; 8 — выемка под центрирующий выступ



Рис. 4. Упор откидной двойной сварной 31883-НСБ [12]:

a — исходное положение; *б* — откинутое положение; 1 — основание упора; 2 — упор; 3 — палец; 4 — плита упора; 5 — петля основания; 6 — отверстия под упоры

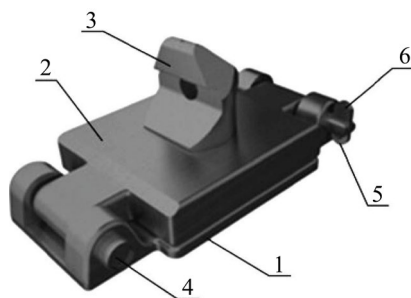


Рис. 5. Упор откидной одинарный с дополнительным креплением [12]:

1 — плита упора; 2 — основание упора; 3 — упор; 4 — палец; 5 — стержневой замок; 6 — блокиратор случайной разблокировки

Из-за бокового зазора $\Delta = 11,5\text{--}13,5$ мм фитинг легко соскальзывает с упора и не препятствует опрокидыванию контейнера (рис. 6). Контейнер теряет устойчивость от воздействия поперечных ветровых нагрузок, если используются упоры без дополнительных креплений. Это известно из логистической практики.

Анализ конструкции серийных фитинговых упоров показывает, что их высота — 85–100 мм, толщина — 50–52 мм, ширина — 78 мм. Высота отверстия в фитинге под упор — 108 мм, ширина — 63,5 мм.

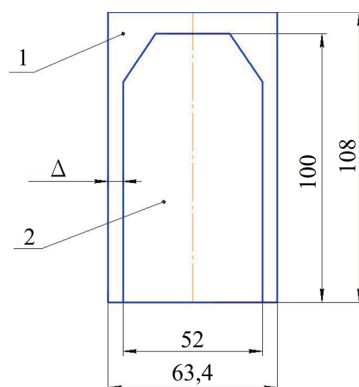


Рис. 6. Сопряжение фитинга и упора в поперечном сечении:

1 — габарит отверстия фитинга; 2 — габарит упора

Оценим устойчивость контейнера на упорах исходной конструкции. Условия:

- транспортировка пустой емкости по прямой;
- ветровая нагрузка поперечна к направлению движения.

Проведем расчет для самого распространенного упора — стационарного неоткидного 31887-НСБ (рис. 7).



Рис. 7. Стационарный упор для контейнера

При отсутствии дополнительных креплений устойчивость можно найти из равенства опрокидывающего контейнер момента M_O и удерживающего M_y (рис. 8).

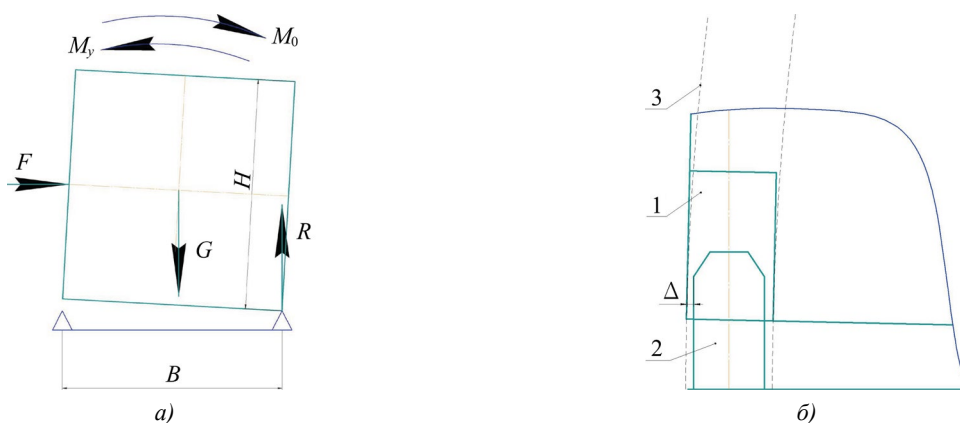


Рис. 8. Поперечное сечение контейнера:

а — расчетная схема; б — зазор между фитингом и упором при опрокидывании;
1 — отверстие фитинга; 2 — упор; 3 — траектория движения при опрокидывании

Если центр тяжести посередине между опорами, то удерживающий момент:

$$M_y = G \times B / 2,$$

где G — масса пустого контейнера, кг; B — ширина контейнера, м.

Если опрокидывающая сила посередине высоты контейнера, то опрокидывающий момент:

$$M_O = F \times H / 2,$$

где F — боковая сила воздействия ветра на стенку контейнера, кг; H — высота контейнера, м.

Силу ветра можно определить из соотношения:

$$F = P \times S,$$

где P — ветровая нагрузка, кг/м²; $S = L \cdot H$ — площадь боковой стенки контейнера; L — длина контейнера, м.

Давление ветра по Строительным нормам и правилам 2.01.07-85¹⁰ и 20.13330.2016¹¹, определяется так:

$$P = W_0 \times k \times c,$$

где W_0 — нормативное давление ветра для определенного региона; k — нормативный коэффициент корректировки давления ветра с учетом высоты и характера рельефа местности; c — коэффициент аэродинамики объекта.

Преобразуем исходные формулы:

$$W_0 \cdot k \cdot c \cdot L \cdot H \cdot \frac{H}{2} \geq G \cdot \frac{B}{2}.$$

¹⁰ СНиП 2.01.07–85*. *Нагрузки и воздействия*. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/13673/> (дата обращения: 08.11.2025).

¹¹ СП 20.13330.2016. *Свод правил. Нагрузки и воздействия*. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. URL: <https://mchs.gov.ru/uploads/document/2022-03-15/079727a84b6dfc87f4f6c2db1a5693ed.pdf> (дата обращения: 08.11.2025).

Упростим:

$$W_0 \cdot k \cdot c \cdot L \cdot H^2 \geq G \cdot B.$$

Преобразуем полученное выражение:

$$W_0 = \frac{G \cdot B}{k \cdot c \cdot L \cdot H^2}.$$

Выполним расчет на примере 40-футового контейнера длиной $L \approx 12,2$ м, высотой $H \approx 2,6$ м и массой $G = 3900$ кг. По ГОСТ Р 51891–2008 расстояние между фитингами $B \approx 2,3$ м (рис. 8). Расчеты проводятся для открытого пространства (СНиП 2.01.07–85 и СП 20.13330.2016).

Верхний габарит контейнера — 5,2 м, поэтому принимаем коэффициент корректировки давления ветра $k = 0,75$.

Соотношение длины и высоты объекта более 4, поэтому аэродинамический коэффициент $c = 1,2$ (по СП 20.13330.2016).

Расчетное пороговое значение скорости давление ветра, способной опрокинуть пустой 40-футовый контейнер:

$$W_0 = \frac{3\,900 \cdot 2,3}{0,75 \cdot 1,2 \cdot 12,2 \cdot 2,6^2} = 120 \text{ кг/м}^2 = 120 \text{ Па}.$$

Согласно СП 20.13330.2016, это соответствует скорости ветра примерно 11,9 м/с.

Полученные значения позволяют утверждать, что безопасность не гарантируется уже в I ветровой зоне (табл. 1), к которой относятся, например, Москва, Минск и т. д.

Таблица 1

Нормативные давления ветров в зависимости от ветрового района по СП 20.13330.2016

Ветровые районы России	Ia	I	II	III	IV	V	VI	VII
W_0 , кПа (кг с/м ²)	0,17 (17)	0,23 (23)	0,30 (30)	0,38 (38)	0,48 (48)	0,60 (60)	0,73 (73)	0,85 (85)

По усредненным данным¹² скорость ветра на севере России — 28–35 м/с, на Дальнем Востоке — 31–38 м/с, на Северном Кавказе — 28–31 м/с. При этом порывы ветра в этих же регионах могут превышать 40 м/с.

Уровень устойчивости и безопасности перевозки контейнера возрастает прямо пропорционально его загрузженности. Соответственно, риски для пустой емкости максимальные.

Значительная часть грузового трафика идет через зоны сильного ветрового давления III и IV (рис. 9). Следовательно, для основной части перевозок есть риск опрокидывания контейнеров. Отметим также, что многие контейнеры идут из Европы в Китай пустыми [2].

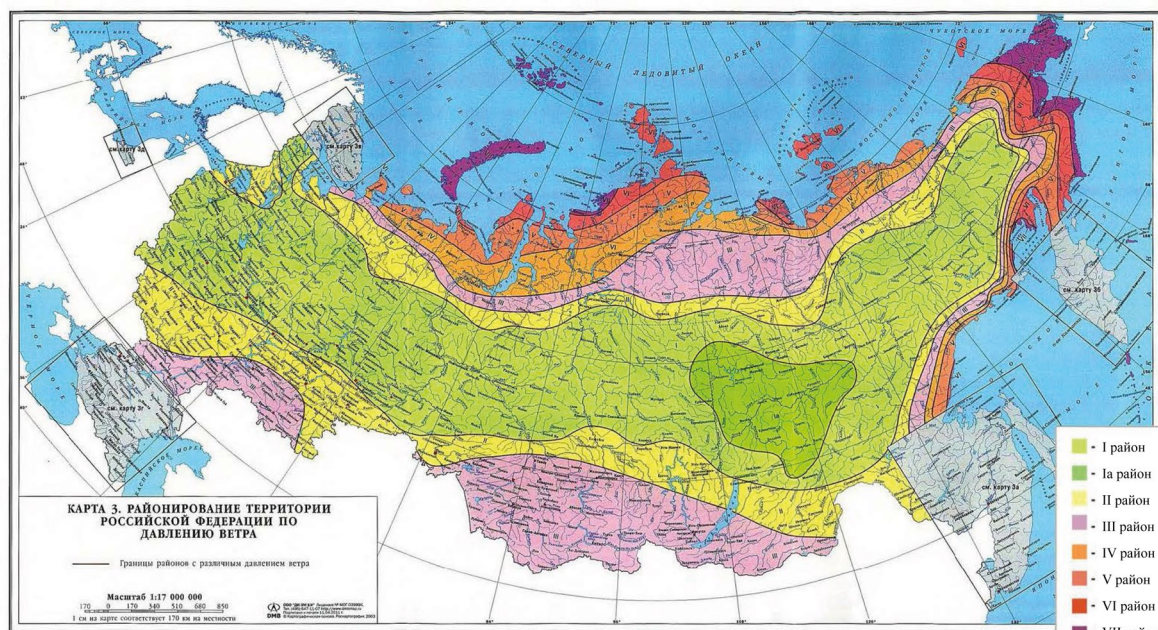


Рис. 9. Ветровые нагрузки в разных регионах России

¹² Шойгу С.К., Трохина Н.Б. (ред.). *Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации*. Москва: ДИК; 2005. С. 269.

Для решения проблемы опрокидывания контейнеров ветром есть предложение оборудовать платформы дополнительными замковыми механизмами [13] или дополнительными удерживающими элементами [14].

В первом случае речь идет о размещении под каждым контейнером дополнительных узлов. Это должен быть вал, поперечный к оси движения вагона. На каждом его конце — по рычагу. Один давит на контейнер, а другой под силой этого давления проворачивается и дополнительно удерживает контейнер от опрокидывания (рис. 10).

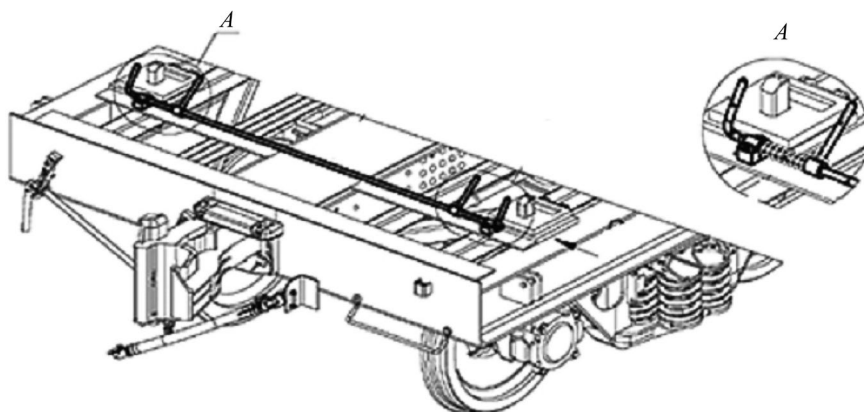


Рис. 10. Торсионный вал с рычагами [12]: А — удерживающие поворотные рычаги

Второе техническое решение — это запирающее устройство под каждым контейнером в виде дополнительных штырей. Их нужно выставить с минимальным зазором, чтобы обеспечить строго вертикальное перемещение контейнера при установке и снятии с платформы (рис. 11).



Рис. 11. Запирающее устройство [13]: а — схематическое изображение; б — место на платформе

Отметим, что переоборудование типовых вагонов новыми узлами потребует значительных материальных затрат. Кроме того, не исключены перекосы из-за порыва ветра или неверных действий крановщика. В этих случаях при установке на платформу в поперечной плоскости возможен несинхронный поворот рычагов вала и, соответственно, их деформация или поломка. Это слабые стороны первого варианта.

Основной недостаток второго решения — конструктивная нецелесообразность. Следует признать избыточным усложнение конструкции несколькими параллельно работающими элементами (упор и внешний штырь), выполняющими одну и ту же функцию. К тому же, как и в первом случае, внедрение предполагает существенные затраты по финансам, материалам и времени.

Результаты исследования. В данной работе предлагается повысить ветровую устойчивость контейнеров на железнодорожных платформах без ресурсоемких изменений конструкции вагона и контейнера. Заявленную проблему может решить изменение трех параметров (рис. 12):

- увеличение рабочей высоты стационарного упора, приваренного к раме вагона, с названных выше 85–100 мм до 106 мм;
- увеличение толщины упора с 50–52 мм до 56 мм;
- уменьшение бокового зазора у края платформы с 11,5–13,5 мм до технически возможного минимума;
- ширина остается серийной — 78 м.

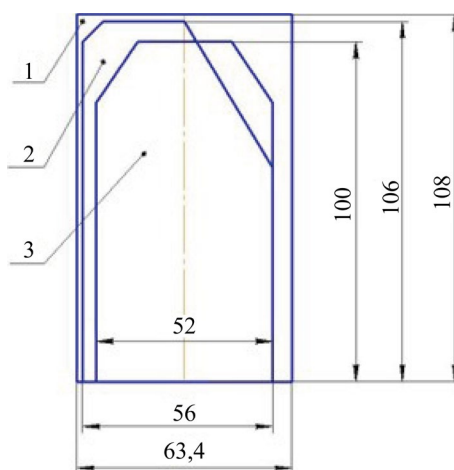


Рис. 12. Габариты измененного упора:

1 — габарит отверстия фитинга; 2 — габарит измененного упора; 3 — габарит исходного упора

Такой подход сократит люфт контейнера на упорах в поперечной плоскости со стороны края платформы.

Как только контейнер начнет опрокидываться, упор заклинит в фитинге из-за уменьшенного внешнего зазора (рис. 13).

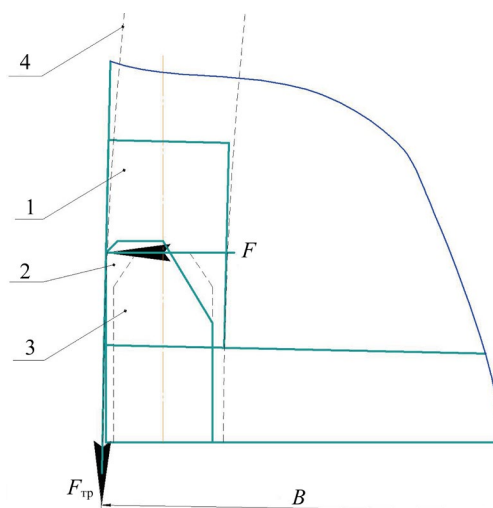


Рис. 13. Контакт поверхностей фитинга и измененного упора при опрокидывании контейнера:

1 — отверстие фитинга; 2 — измененный упор; 3 — исходный упор;

4 — траектория движения при опрокидывании

Отметим, что не следует превышать предложенный максимум по высоте 106 мм. В противном случае контейнер будет держаться не на основании платформы, а на сравнительно небольших упорах, что негативно скажется на устойчивости. Рекомендованная толщина 56 мм в плане пропорции хорошо сочетается с высотой 106 мм.

Удержание контейнера обеспечит сила трения $F_{\text{тр}}$, предельное значение которой будет зависеть исключительно от жесткости упора. Как только он поддастся нагрузке и прогнется, нормальная реакция опоры уменьшится, фитинг соскользнет с упора и контейнер опрокинется.

Эффективность решения определили по расчету упора в фитинге на изгиб и максимальной силы нормальной реакции F между взаимодействующими поверхностями при заклинивании упора в фитинге.

Упоры часто делают из стали 10ХСНД с допускаемыми напряжениями на изгиб $[\sigma_{\text{и}}] = 220$ МПа:

$$[\sigma_{\text{и}}] \geq \sigma_{\text{и}} = \frac{F \cdot l}{W}.$$

Здесь l — высота приложения силы к упору от контакта с фитингом. Она равна 100 мм, однако с учетом фасок и других элементов рабочая высота — 106 мм, т. е. максимальная рекомендуемая в рамках данной научной работы.

Значит,

$$F = \frac{[\sigma_{\text{и}}] \cdot W}{l},$$

где $W = \frac{b \cdot h^2}{6}$ — момент сопротивления упора.

Если ширина упора $h = 78$ мм, а толщина $b = 56$ мм, то:

$$F = \frac{220 \cdot 78 \cdot 56^2}{100 \cdot 6} = 89689,6 \text{ Н.}$$

Таким образом, до начала заметной деформации упор формально выдержит 89,7 кН.

Рассчитаем дополнительно возникающую удерживающую силу трения при сухой и дождливой погоде.

Согласно ТУ №ЦМ-943 от 23.10.2017¹³, в расчетах следует принимать равным 0,3 коэффициент трения по кося между стальными поверхностями, очищенными от грязи и снега.

В этом случае сила трения упора о фитинг:

$$F_{\text{тр}} = N \cdot \mu,$$

где $\mu = 0,3$ — коэффициент трения стали по стали; $N = F$ — нормальная сила прижатия поверхностей.

Подставим известные значения:

$$F_{\text{тр}} = N \cdot \mu, F_{\text{тр}} = 89689,6 \cdot 0,3 = 26906,88 \text{ Н.}$$

Определим эффективность предлагаемого решения с учетом ветровой нагрузки, способной преодолеть удерживающий момент и опрокинуть контейнер:

$$M_y = F_{\text{тр}} \cdot B, \quad (1)$$

где $F_{\text{тр}}$ — сила трения на поверхности фитинга и упора; B — плечо приложения, т. е. ширина контейнера по осям фитингов.

Запишем соотношение моментов:

$$M_o = W_o \cdot k \cdot c \cdot L \cdot H \cdot \frac{H}{2} \quad \text{и} \quad M_y = F_{\text{тр}} \cdot B. \quad (2)$$

Значит:

$$W_o \cdot k \cdot c \cdot L \cdot H^2 = F_{\text{тр}} \cdot B. \quad (3)$$

Значение ветровой нагрузки:

$$W_o = \frac{F_{\text{тр}} \cdot B}{k \cdot c \cdot L \cdot H^2}, \quad (4)$$

$$W_o = \frac{2690,7 \cdot 2,3}{0,75 \cdot 1,2 \cdot 12,2 \cdot 2,6^2} = 83,38 \text{ кг/м}^2 \approx 834 \text{ Па.}$$

В условиях ветра с дождем коэффициент трения упора о фитинг — 0,15–0,2. Примем для расчета среднее значение 0,18.

$$F_{\text{тр}} = 89689,6 \cdot 0,18 = 16144,13 \text{ Н.}$$

Оценим для этой ситуации эффективность предлагаемого решения по ветровой нагрузке, способной преодолеть удерживающий момент и опрокинуть контейнер. Используем выражения (1)–(4). Получим:

$$W_o = \frac{1614,4 \cdot 2,3}{0,75 \cdot 1,2 \cdot 12,2 \cdot 2,6^2} = 50,03 \text{ кг/м}^2 \approx 500 \text{ Па.}$$

Обсуждение. Итак, упор высотой 106 мм, шириной 78 мм и толщиной 56 мм формально выдержит воздействие около 90 кН (точная цифра — 89,7 кН), а затем заметно деформируется. Таким образом, 89,7 кН — максимальная нормальная сила, которая может возникнуть между поверхностями трения.

Расчеты показали, что в изначальной конфигурации 40-футовый контейнер опрокинется при ветровой нагрузке 120 Па. Это соответствует скорости ветра 11,9 м/с, или I ветровой зоне. Такой ветер характерен, например, для Москвы и Минска. Причем пустой контейнер может опрокинуться под действием ветровых нагрузок даже на неподвижной платформе.

Предложенное автором решение позволит контейнеру устоять на движущейся платформе при ветровой нагрузке около 834 Па. Это соответствует скорости ветра около 37 м/с, характерной для VII ветровой зоны. Очевидно, что для условий ветра с дождем показатель будет ниже, и это подтвердили расчеты. Контейнер опрокинется при нагрузке примерно 500 Па. Это соответствует скорости ветра около 29,5 м/с, что характерно для IV ветровой зоны, к которой относятся, например, Казахстан и побережье Каспийского моря. В настоящее время здесь фиксируется активный автомобильный и железнодорожный трафик. В перспективе ожидается рост грузопотока в связи реализацией глобального мультимодального транспортного проекта «Шелковый путь».

¹³ Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах. № ЦМ-943 от 27.05.2003 Министерство путей сообщения РФ. URL: <https://company.rzd.ru/9353/page/105104?id=1341> (дата обращения: 08.11.2025).

Предлагаемый подход к решению проблемы ветровой устойчивости контейнеров в данной работе рассчитан применительно к неподвижным стационарным упорам, исключающим наличие люфтов. Расчет выполнен на примере 40-футового контейнера, однако принцип можно использовать и для других форм-факторов.

Заключение. Предлагаемое решение в реальных условиях перевозок (в том числе в ветренную и дождливую погоду) позволит увеличить устойчивость контейнеров на платформе от опрокидывания из-за ветра. При расчетах принимали во внимание главным образом данные о I–IV ветровых зонах, т. к. именно по этим территориям активно перемещаются грузы. Однако в сухую погоду модернизация платформы будет полезна даже в зоне с самыми сильными ветрами — VII.

Внедрение предложенной новации значительно сократит вероятность чрезвычайных ситуаций, связанных с падением контейнеров с железнодорожных платформ, и, соответственно, повысит безопасность перевозок.

Решение отличается технологической простотой и универсальностью. Конструкция контейнера остается прежней. Отдельные элементы платформы меняются минимально.

Список литературы / References

1. Попов В.Г., Матешева А.В., Сухов Ф.И., Боландова Ю.К. Условия опрокидывания порожних контейнеров под воздействием ветровых нагрузок. *Мир транспорта*. 2019;17(6):50–61. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-50-61>
Popov VG, Matesheva AV, Sukhov PI, Bolandova YuK. Conditions Leading to Overturning of Empty Containers under the Influence of Wind Load. *World of Transport and Transportation*. 2019;17(6):50–61. (In Russ.) <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-50-61>
2. Боландова Ю.К. Методы оценки устойчивости от опрокидывания контейнеров при перевозке на специализированных железнодорожных платформах. Дис. канд. тех. наук. Москва; 2021. 153 с.
Bolandova YuK. Methods for Assessing Stability from Container Overturning during Transportation on Specialized Railway Platforms. Cand. Sci. (Eng.) diss. Moscow; 2021. 153 p. (In Russ.)
3. Попов В.Г., Сухов Ф.И., Боландова Ю.К. Культура обеспечения безопасности транспорта. *Мир транспорта*. 2019;17(2):206–217. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-2-206-217>
Popov VG, Sukhov PI, Bolandova YuK. Transport Safety Culture. *World of Transport and Transportation*. 2019;17(2):206–217. (In Russ.) <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-2-206-217>
4. Giappino S, Rocchi D, Schito P, Tomasini G. Cross Wind and Rollover Risk on Lightweight Railway Vehicles. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2016;153:106–112. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.03.013>
5. Baker C, Cheli F, Orellano A, Paradot N, Proppe C, Rocchi D. Cross-Wind Effects on Road and Rail Vehicles. *Vehicle System Dynamics*. 2009;47(8):983–1022. <https://doi.org/10.1080/00423110903078794>
6. Simes T. A Blow to Train Operations, Can Strong Winds Cause Derailment? In: *International Railway Safety Conference. Melbourne, 2017*. URL: <https://international-railway-safety-council.com/wp-content/uploads/2017/09/simes-a-blow-to-train-operations-can-strong-winds-cause-derailment.pdf> (accessed: 09.11.2025).
7. Piñeres Castillo AP, Mojica Herazo JC. A Review of Wind Impact on Container Port Operations: Current Technologies, Strategies and Future Perspectives. *Procedia Computer Science*. 2024;251:783–788. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.11.185>
8. Yi Zhang, Cai Wei, Zhonghui Shen, Xiwen Bai, Xinzheng Lu, Guedes Soares C. Economic Impact of Typhoon-Induced Wind Disasters on Port Performance: A Case Study of Chinese Ports. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2020;50:101719. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101719>
9. Yi Zhang, Jasmine Siu Lee Lam. Estimating the Economic Losses of Port Disruption Due to Extreme Wind Event. *Ocean & Coastal Management*. 2015;116:300–310 <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.08.009>
10. Xinhua Cao, Jasmine Siu Lee Lam. Simulation-Based Catastrophe-Induced Port Loss Estimation. *Reliability Engineering & System Safety*. 2018;175:1–12 <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.02.008>
11. Ricci A, Vasaturo R, Blocken B. An Integrated Tool to Improve the Safety of Seaports and Waterways under Strong Wind Conditions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2023;234:105327. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2023.105327>
12. Дятлова О.А. Определение общих признаков и классификация фитинговых упоров вагонов-платформ. *Техник транспорта*. 2021;2(3):339–346. <https://doi.org/10.46684/2687-1033.2021.3.339-346>
Dyatlova OA. Determination of Common Features and Classification of Fitting Stops for Flat Cars. *Transport Technician: Education and Practice*. 2021;2(3):339–346. (In Russ.) <https://doi.org/10.46684/2687-1033.2021.3.339-346>
13. Бороненко Ю.П., Даукша А.С. Выбор конструктивных решений устройств крепления контейнеров и съемных кузовов на железнодорожных платформах. *Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике*. 2017;3(70):29–32.
Boronenko YuP, Dauksha AS. Selecting Design Solutions for Container and Swap Body Flatcar Fixing Devices. *Transport of the Russian Federation*. 2017;3(70):29–32. (In Russ.)

14. Бороненко Ю.П., Поляков Б.О., Полякова Е.Я. Воздействие сил бокового ветра на контейнеры с двухэтажным расположением. *Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике*. 2023;(1–2):41–45. URL: <https://rostransport.elpub.ru/jour/article/view/39/39?ysclid=miigx9qlyr761273545> (дата обращения: 09.11.2025).

Boronenko YuP, Polyakov BO, Polyakova EYa. Impact of Lateral Wind Forces on Double Stack Container Transportation. *Transport of the Russian Federation*. 2023;(1–2):41–45. (In Russ.) URL: <https://rostransport.elpub.ru/jour/article/view/39/39?ysclid=miigx9qlyr761273545> (accessed: 09.11.2025).

Об авторе:

Алексей Александрович Демьянов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистики» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), alexys61@yandex.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Aleksey A. Demyanov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, 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](#), alexys61@yandex.ru

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

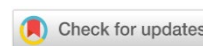
The author has read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 17.09.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 14.10.2025

Принята к публикации / Accepted 22.10.2025

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



УДК 669.1:66.04

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-4-331-340>

Оригинальное эмпирическое исследование

Исследование процессов электронагрева токами высокой частоты в магнитном поле

В.Н. Пустовойт , Ю.В. Долгачев ✉, А.С. Пивченков

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

✉ ydolgachev@donstu.ru

EDN: PLICAE

Аннотация

Введение. При нагреве железоуглеродистых сплавов токами высокой частоты (ТВЧ) на высоких скоростях могут наблюдаться более значимые эффекты упрочнения, чем при применении машинных генераторов. Поэтому проводить закалку в таких условиях было бы целесообразнее, однако повышение частоты генератора влечет за собой уменьшение глубины проникновения вихревых токов и ведет к большей неравномерности прогрева по сечению. Наложение постоянного внешнего магнитного поля при закалке ТВЧ может приводить к увеличению глубины проникновения вихревых токов и более равномерному прогреву. Но в научной литературе еще недостаточно сведений о влиянии внешнего магнитного поля на процессы нагрева ТВЧ, а также на фазовые превращения в сталях. В настоящий момент количественных оценок влияния внешнего магнитного поля на изменение кинетики электронагрева и глубины проникновения вихревых токов не имеется. В связи с вышесказанным цель авторов настоящей статьи — изучить изменения в кинетике нагрева ТВЧ железоуглеродистых сплавов при наложении внешнего постоянного магнитного поля и на этой основе рассмотреть возможности применения данной технологии.

Материалы и методы. Теоретическая оценка влияния внешнего магнитного поля на изменения кинетики электронагрева и глубины проникновения вихревых токов дана на основе общей теории кинетики индукционного нагрева. Экспериментальное изучение влияния магнитного поля на кинетику нагрева ТВЧ проводилось на образцах из стали 45, перлитного серого (СЧ30) и ферритного ковкого чугуна (КЧ30-6). Исследование распределения температуры по сечению ферромагнитного материала при индукционном нагреве во внешнем магнитном поле осуществлялось на специальных образцах из технического железа, стали 45 и серого перлитного чугуна СЧ30. Изучение процессов электроотпуска проходило на образцах из стали У8А с использованием лампового генератора (температура нагрева — 450 °С, скорость нагрева — 750 °С/с). Исследовались изменения балла аустенитного зерна после скоростного нагрева с внешним подмагничиванием на образцах стали с пониженной прокаливаемостью 55ПП. Для исследования процессов термической обработки в магнитном поле при проведении экспериментов с нагревом образцов токами высокой частоты создан электромагнит специальной конструкции для наложения внешнего постоянного магнитного поля.

Результаты исследования. Построены теоретические кривые для условий нагрева без поля и с наложением внешнего постоянного магнитного поля. Экспериментальные данные о влиянии внешнего постоянного магнитного поля на индукционный нагрев в поверхностном слое различных материалов были сведены в кинетические диаграммы. Доказательством того, что наблюдаемые изменения связаны именно с увеличением глубины проникновения вихревых токов, являются опытные данные, полученные на цилиндрических образцах из стали 45 с разной толщиной стенки. Приведены кинетические кривые оценки температурного поля (по шести точкам на разной глубине) в процессе нагрева ТВЧ с внешним подмагничиванием и без него. Получены экспериментальные данные, показывающие распределение микротвердости по сечению образца из стали У8 после закалки, закалки и электроотпуска, закалки и электроотпуска с внешним подмагничиванием и закалки и объемного отпуска, а также результаты исследования балла аустенитного зерна стали 55ПП после скоростного нагрева с внешним подмагничиванием и обычного (медленного) глубинного нагрева.

Обсуждение. Наложение внешнего постоянного магнитного поля высокой напряженности на этапе первого квазистационарного процесса приводит к снижению скорости индукционного нагрева ферромагнитного материала и увеличению глубины его равномерного прогрева. Выше точки Кюри влияние магнитного поля не сказывается из-за малой магнитной восприимчивости материала, поэтому скорость нагрева остается такой же, какая была бы в этом температурном интервале без поля. Кроме того, ввиду незначительной разницы значений магнитной проницаемости ниже и выше точки Кюри при нагреве в поле термическая кривая не имеет столь заметного перегиба, характерного для кинетических кривых при переходе поверхностного слоя в парамагнитное состояние. Эксперименты с электроотпуском доказали, что с наложением внешнего поля удастся отпустить материал на необходимую глубину и появляется возможность его проведения на одной установке ТВЧ. Размер зерен аустенита после скоростного нагрева с подмагничиванием уменьшается, по сравнению с обычным глубинным нагревом стали с пониженной прокаливаемостью, что устраняет проблему индукционного нагрева сталей с пониженной прокаливаемостью.

Заключение. Результаты исследования показали, что наложение внешнего магнитного поля позволяет реализовать эффекты упрочнения при нагреве с более высокими частотами и устранить недостатки такого нагрева.

Ключевые слова: сталь, чугун, магнитное поле, ТВЧ, электроотпуск, скоростной нагрев, закалка

Благодарности. Авторы благодарят редакцию журнала за ценные замечания по содержанию статьи, сотрудников кафедры «Материаловедение и технологии металлов» ДГТУ: заведующего кафедрой М.С. Егорова, профессора Ю.М. Домбровского и доцента С.А. Гришина, за помощь в получении и обсуждении результатов.

Для цитирования. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В., Пивченков А.С. Исследование процессов электронагрева ТВЧ в магнитном поле. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(4):331–340. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-4-331-340>

Original Empirical Research

Study of the Processes of Electric Heating Using High-Frequency Currents in a Magnetic Field

Viktor N. Pustovoyt , Yuri V. Dolgachev ✉, Aleksey S. Pivchenkov 

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

✉ ydolgachev@donstu.ru

Abstract

Introduction. When heating with high-frequency currents (HFCs) at high speeds, more significant strengthening effects can be observed compared to using machine generators. Therefore, hardening at high frequencies is more efficient. However, the increase in the generator frequency results in a decrease in the depth of penetration of eddy currents and an increased unevenness of heating across the cross-section. The application of a constant external magnetic field during HFC hardening can increase the depth of eddy current penetration and create more uniform heating. Unfortunately, there is not enough information available on the effect of the external magnetic field on HFC heating processes and phase transformations in steel. Currently, there are no quantitative estimates for the impact of an external magnetic field on changes in the kinetics of electric heating and the penetration depth of eddy currents. In connection with the above, the aim of this paper is to investigate changes in the kinetics of high-frequency heating of iron-carbon alloys when an external constant magnetic field is applied and, based on this, to consider the potential for technological applications.

Materials and Methods. Theoretical assessment of the influence of an external magnetic field on the change in the kinetics of electric heating and the penetration depth of eddy currents is based on the general theory of induction heating kinetics. An experimental study of the influence of a magnetic field on the kinetics of high-frequency current heating was performed on samples of 45 steel, pearlitic gray (SCh30), and ferritic malleable cast iron (KCh30-6). The temperature distribution over the cross-section of ferromagnetic materials during induction heating with an external magnetic field has been studied using special samples of iron, 45 steel, and SCh30 gray pearlitic cast iron. Electric tempering processes have been investigated on samples of U8A steel using a vacuum tube generator (heating temperature — 450°C, heating rate — 750°C/s). Changes in austenite grain size after high-speed heating with external magnetization have been examined on samples of reduced-hardenability 55PP steel. To study the processes of thermal treatment in a magnetic field during experiments involving heating samples using high-frequency currents, a specially designed electromagnet was created to apply an external constant magnetic field.

Results. Theoretical curves were constructed for heating conditions with and without an external constant magnetic field. Experimental data on the effect of an external constant magnetic field on induction heating in the surface layer of various materials were summarized in kinetic diagrams. Evidence that the observed changes were due to increased depth of penetration of eddy currents came from experiments on cylindrical samples of 45 steel with different wall thicknesses. Kinetic curves were provided for estimating the temperature field (at 6 points at different depths) during high-frequency current heating with and without external magnetization. The paper presents experimental data on the micro-hardness distribution across the cross-section of a U8 steel sample after quenching, quenching and electric tempering, quenching and electric tempering with external magnetization, and quenching and bulk tempering. It also includes the results of the study of the austenite grain size of 55PP steel after high-speed heating with external magnetization and conventional (slow) deep heating.

Discussion. The application of a high-intensity external constant magnetic field during the first quasi-stationary process resulted in a decrease in the rate of induction heating of the ferromagnetic material and an increase in the depth of its uniform heating. However, above the Curie point, the effect of the magnetic field was negligible due to the low magnetic susceptibility of the material, and the heating rate remained unchanged as if there was no field present. In addition, due to the insignificant difference in the values of magnetic permeability below and above the Curie point during heating in the field, the thermal curve did not exhibit the characteristic inflection typical of kinetic curves observed during the transition of the surface layer to a paramagnetic state. Experiments with electric tempering have demonstrated that by applying an external field, it was possible to temper a material to the desired depth and it could be done on a single high-frequency current setup. The size of the austenite grains after high-speed heating with magnetization was reduced compared to conventional deep heating of steel with low hardenability, eliminating the issue of induction heating for low-hardenability steel.

Conclusion. The results of the study demonstrated that the use of an external magnetic field enabled the achievement of strengthening effects during heating at higher frequencies, thereby eliminating the drawbacks of such heating methods.

Keywords: steel, cast iron, magnetic field, high-frequency current, electric tempering, high-speed heating, hardening

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial team of the journal for their valuable comments on the content of the article. They also express their gratitude to the staff of the Department of Materials Science and Technology of Metals at Don State Technical University, especially to Head of the Department, M.S. Egorov, Professor Yu.M. Dombrovsky, and Associate Professor S.A. Grishin, for their assistance in obtaining and interpreting the results.

For Citation. Pustovoi VN, Dolgachev YuV, Pivchenkov AS. Study of the Processes of Electric Heating Using High-Frequency Currents in a Magnetic Field. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(4):331–340. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-4-331-340>

Введение. Основные принципы технологии термической обработки стали в магнитном поле (ТОМП) изложены в монографии [1], эта технология позволяет получать такие структурные состояния и свойства, которые невозможно достичь при обычных режимах. Одной из особенностей ТОМП является ее целесообразность при поштучной обработке изделий [2], например, с применением в виде источника нагрева токов высокой частоты (ТВЧ) [3].

Поскольку при нагреве ТВЧ с высокими скоростями могут наблюдаться более ощутимые эффекты упрочнения, чем при применении машинных генераторов, было бы целесообразно проводить закалку при более высоких частотах, но повышение частоты генератора влечет за собой снижение глубины проникновения вихревых токов и большую неравномерность прогрева по сечению. Теоретические и практические аспекты нагрева металлических изделий ТВЧ довольно хорошо представлены в [4, 5]. Однако сведений об изменениях, происходящих с индукционным высокоскоростным нагревом при наложении внешнего постоянного магнитного поля, особенно в контексте протекающих фазовых превращений в сталях, на сегодняшний день недостаточно.

Опытным путем получены качественные данные [4] о том, что наложение постоянного внешнего магнитного поля при закалке ТВЧ может приводить к увеличению глубины проникновения вихревых токов, что, в свою очередь, повышает равномерность прогрева на этапе первого квазистационарного процесса электронагрева [6]. Наиболее целесообразным с технологической точки зрения является применение этого явления при скоростном электроотпуске [7, 8], так как существует проблема недостаточной глубины прогрева ТВЧ ферромагнитного закаленного слоя, что делает необходимым использование для нагрева под отпуск другого генератора, работающего на более низкой частоте. В настоящий момент количественных оценок влияния внешнего магнитного поля на изменение кинетики электронагрева и глубины проникновения вихревых токов нет.

В связи с вышесказанным авторами данного исследования поставлена цель изучить изменения в кинетике нагрева ТВЧ железоуглеродистых сплавов при наложении внешнего постоянного магнитного поля и на основе полученных результатов рассмотреть возможности их технологического применения.

Материалы и методы. Теоретическая оценка влияния внешнего магнитного поля на изменение кинетики электронагрева и глубины проникновения вихревых токов дана на основе общей теории кинетики индукционного нагрева [9, 10]. Уравнение теплопроводности в случае нагрева стали до температуры магнитных превращений в поверхностном слое используется с введением безразмерных величин времени (критерий Фурье $F_0 = \frac{\alpha \tau}{R^2}$), температуры (критерий Кирпичева $K_i = \frac{PR}{\lambda[T(x, \tau) - T_0]}$), без учёта переходного процесса перераспределения мощности (P) и имеет вид:

$$K_i^{-1} = F_0 + \frac{1}{2} \left(\frac{x}{R} \right)^2 - \frac{1}{6} + \frac{1}{4k^2} - \frac{ch2k}{2ksh2k} \frac{x}{R}, \quad (1)$$

где R — радиус цилиндрического образца.

$$k = \frac{R}{\delta} = R \sqrt{\frac{\mu_0 \mu f}{2\rho}},$$

где δ — глубина проникновения вихревых токов; μ — относительная магнитная проницаемость материала; μ_0 — магнитная проницаемость воздуха; f — частота тока; ρ — удельное электрическое сопротивление материала; λ — коэффициент теплопроводности; α — коэффициент температуропроводности; $T(x, \tau)$ — температура в функции времени (τ) и расстояния от поверхности (x); T_0 — начальная температура.

Экспериментальное изучение влияния магнитного поля на кинетику нагрева ТВЧ производилось на образцах из стали 45, перлитного серого (СЧ30) и ферритного ковкого чугуна (КЧ30-6). Показания термопары от поверхностного слоя фиксировались с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) L-CARD E14-440 (разрядность — 14 бит, частота преобразования — до 400 кГц). Использовались сплошные цилиндрические образцы $\varnothing 0,8$ мм различных материалов, а также полые образцы из стали 45 с толщиной стенки в 1 и 2 мм.

Исследование распределения температуры по сечению ферромагнитного материала при индукционном нагреве во внешнем магнитном поле осуществлялось на специальных образцах (рис. 1) из технического железа, стали 45 и серого перлитного чугуна СЧ30. Как видно на рис. 1, на таком образце контроль температур осуществлялся в шести точках, расположенных на удалении от края на 1, 3, 5, 7, 9, 11 мм. В каждом из отверстий $\varnothing 0,6$ мм устанавливалась термопара типа ТХА $\varnothing 0,2$ мм, подключенная к одному из 16 дифференциальных каналов ввода АЦП L-CARD E14-440, передававших данные в ПЭВМ с одновременной записью всех каналов в программе LGraph2.

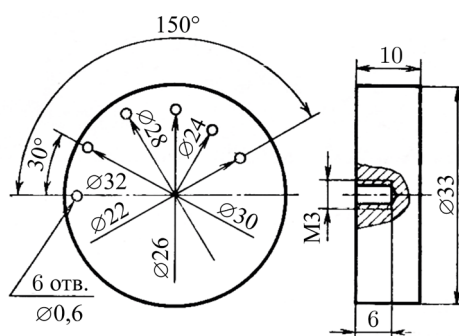


Рис. 1. Конструкция образцов для оценки температурного поля

Изучение процессов электроотпуска проходило на образцах из стали У8А с использованием лампового генератора. Электроотпуск проводился при 450°C , скорость нагрева — $750^\circ\text{C}/\text{с}$. Обычный отпуск в печи длился в течение часа. Измерение микротвердости осуществлялось на приборе ПМТ-3 при нагрузке в 100 г.

Изменения балла аустенитного зерна после скоростного нагрева с внешним подмагничиванием исследовали на образцах стали 55ПП $\varnothing 18$ мм. Нагрев осуществлялся до температуры 450°C с использованием машинного (скорость нагрева в области фазовых превращений — $8^\circ\text{C}/\text{с}$) и лампового ($90^\circ\text{C}/\text{с}$) генераторов. Границы аустенитного зерна выявлялись химическим травлением в подогретом до 60°C однопроцентном растворе пикриновой кислоты с добавлением моющего средства. Строились гистограммы по результатам измерения наибольших из видимых в плоскости шлифа зерен d_j на 20 полях зрения при увеличении $\times 1000$. Средние истинные диаметры зерна вычислялись по формуле:

$$\bar{D} = \frac{\pi}{2} \frac{\sum n_j}{\sum_{j=1}^k \frac{n_j}{d_j}}, \quad (2)$$

где n_j — число измеренных сечений в j -й группе размеров; k — число групп.

Задача исследования процессов ТОМП применительно к скоростному ТВЧ нагреву имеет ряд технических трудностей, связанных с наложением внешнего постоянного магнитного поля вокруг индуктора, в связи с чем был сконструирован специальный электромагнит, имеющий ряд особенностей. Оси кернов максимально приближены к панели высокочастотного генератора, что обуславливает применение сердечника и катушек прямоугольного сечения. Магнитная цепь электромагнита имеет двойное обратное ярмо. Используются водоохлаждаемые конические полюсные наконечники. Сечение кернов относительно ярма увеличено на 130 %, что позволяет снизить его магнитное сопротивление и минимизировать рассеивающий поток. Коническая форма наконечников позволяет добиться увеличения напряженности поля в рабочем воздушном зазоре в 50 мм до 600 кА/м.

Результаты исследования. На основании уравнения (1) были построены теоретические кривые для условий нагрева без поля и с наложением внешнего постоянного магнитного поля (рис. 2). Расчёт проводился для цилиндрического образца диаметром 8 мм из стали с ферритной структурой: $\rho = 36 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; $\mu = 1\,000$ — при температуре 20 °С, $\mu = 1$ — выше точки Кюри; $\mu = 7$ при температуре 20 °С в магнитном поле напряженностью 160 кА/м (с учётом внешнего размагничивающего фактора образца); $f = 440$ кГц; с допущением, что точка Кюри соответствует безразмерной температуре $K_i = 1,13$. По внешнему виду кривых можно судить как минимум о большей равномерности процесса нагрева в случае внешнего подмагничивания.

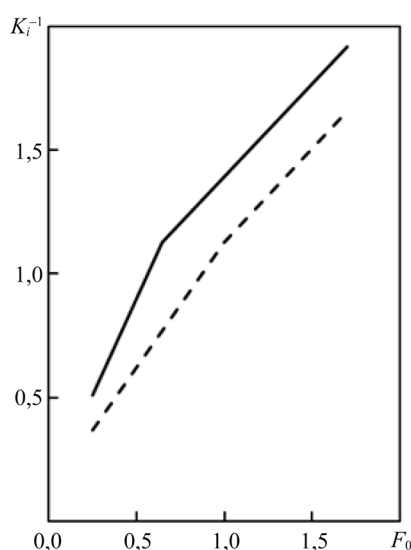


Рис. 2. Теоретические кривые скоростного нагрева без наличия внешнего магнитного поля (сплошная линия) и в его присутствии (штриховая линия)

Экспериментальные данные о влиянии внешнего постоянного магнитного поля на индукционный нагрев в поверхностном слое различных материалов были сведены в кинетические диаграммы и показаны на рис. 3.

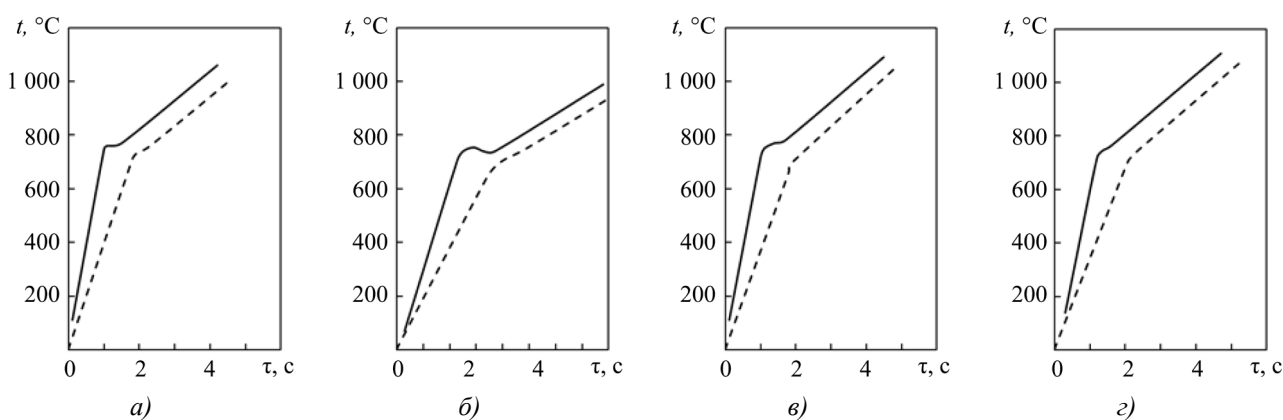


Рис. 3. Термические кривые индукционного нагрева без магнитного поля (сплошная линия) и с наложением поля (штриховая линия) на образцах из: а, б — сталь 45; в — КЧ30-6; г — СЧ30

Доказательством того, что наблюдаемые изменения связаны именно с увеличением глубины проникновения вихревых токов, являются опытные данные, полученные на цилиндрических образцах из стали 45, имеющих разную толщину стенки (1 и 2 мм и сплошной цилиндр $\varnothing 8$ мм), их кривые нагрева показаны на рис. 4.

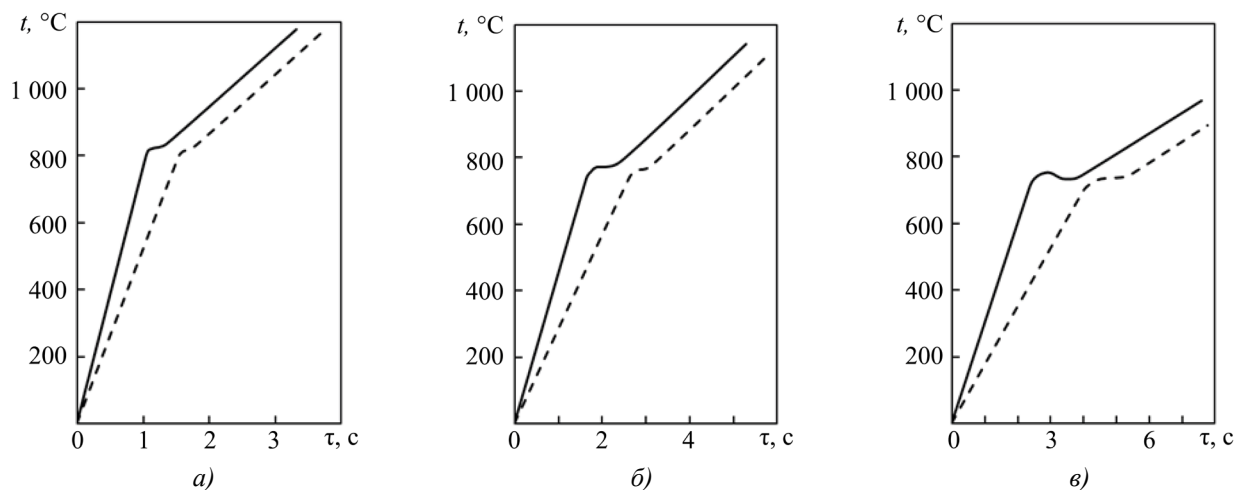


Рис. 4. Термокровые образцов без внешнего поля (сплошная линия) и в магнитном поле (штриховая линия)
с толщиной стенки: а — 1 мм; б — 2 мм; в — сплошной цилиндр \varnothing 8 мм

Результаты оценки температурного поля (по шести точкам на разной глубине) в процессе нагрева ТВЧ с внешним подмагничиванием и без него приведены на рис. 5 и 6. На рис. 5 показаны кинетические кривые для перлитного серого чугуна СЧ30, а на рис. 6 — для стали 45.

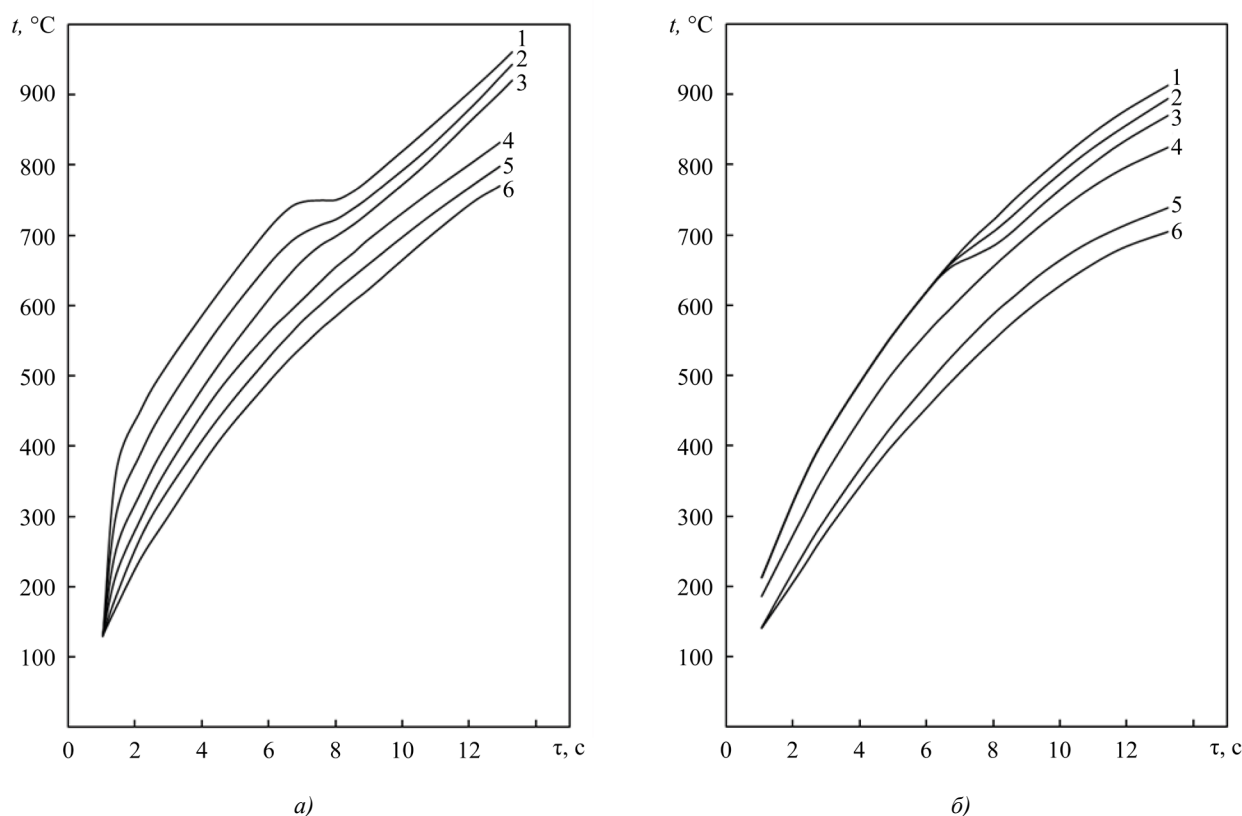


Рис. 5. Кривые нагрева СЧ30 (а — без поля; б — в магнитном поле) на удалении от поверхности на:
1 — 1 мм; 2 — 3 мм; 3 — 5 мм; 4 — 7 мм; 5 — 9 мм; 6 — 11 мм

При нагреве в магнитном поле глубина проникновения вихревых токов не зависит от структуры материала и оказывается в ~ 10 (для перлитной) и 17 (для ферритной) раз больше, чем при нагреве без поля. Это указывает на возможность реализовать на практике режим закалки с электроотпуском при нагреве от одного генератора, так как без подмагничивания невозможен прогрев всей закалённой зоны. На рис. 7 приведены экспериментальные данные, показывающие распределение микротвердости по сечению образца из стали У8 после закалки, закалки и электроотпуска, закалки и электроотпуска с внешним подмагничиванием, закалки и объемного отпуска.

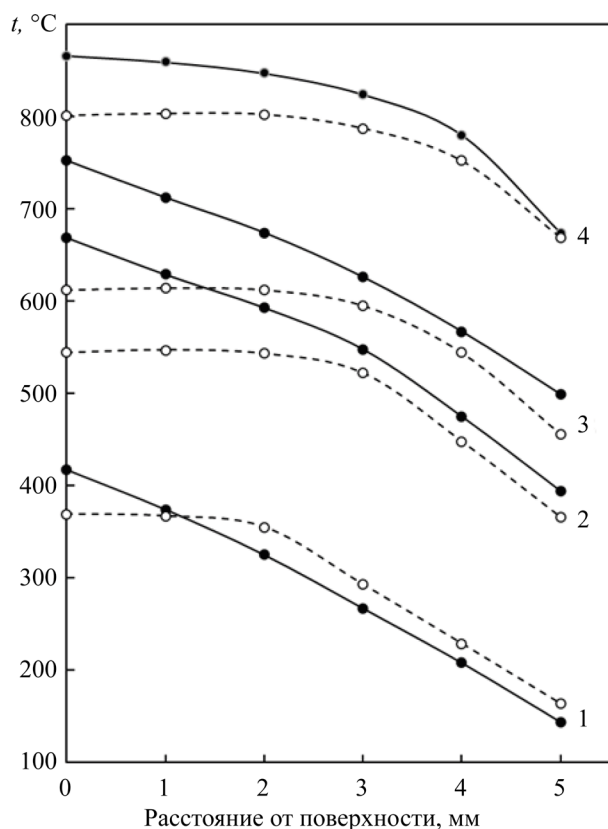


Рис. 6. Распределение температуры на разном удалении от поверхности при обычном нагреве (сплошная линия) и с внешним подмагничиванием (штриховая линия) в моменты времени: 1 — 3 с; 2 — 6 с; 3 — 7 с; 4 — 11,5 с

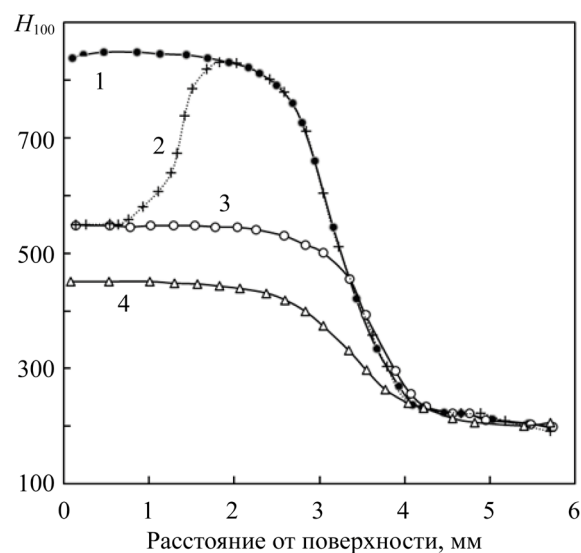
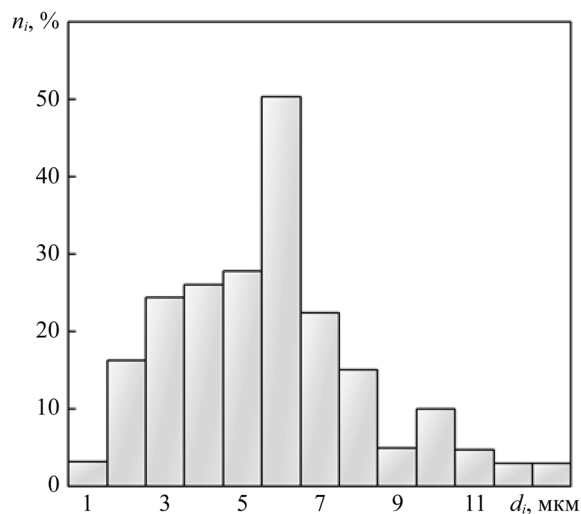
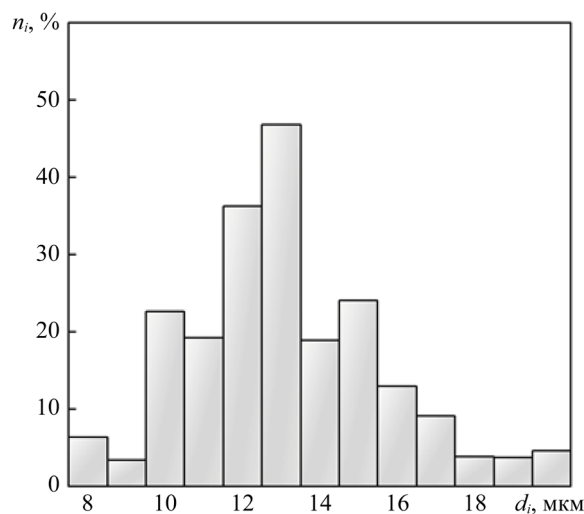


Рис. 7. Распределение микротвердости по сечению после: 1 — закалки ТВЧ; 2 — закалки ТВЧ и электроотпуска без подмагничивания; 3 — закалки ТВЧ и электроотпуска с подмагничиванием; 4 — закалки ТВЧ и объёмного отпуска в печи

Углеродистые стали, имеющие пониженную прокаливаемость, могут быть подвергнуты поверхностной закалке ТВЧ [11, 12], но для нее характерна малая скорость нагрева в области фазовых превращений, что определяет крупное зерно аустенита (и соответственно уменьшенные показатели механических свойств в поверхностном слое). Получается, что характерные особенности тонкой структуры аустенита, которые обусловлены индукционным нагревом, нивелируются ростом зерна — теряются высокие показатели конструктивной прочности. На рис. 8 приведены результаты исследования балла аустенитного зерна стали 55ПП после скоростного нагрева с внешним подмагничиванием и обычного (медленного) глубинного нагрева.



а)



б)

Рис. 8. Распределение зерен γ -фазы по размерам при нагреве ТВЧ: а — с наложением внешнего магнитного поля; б — без поля

Обсуждение. Изменения в кинетике нагрева токами высокой частоты наблюдаются при наложении внешнего магнитного поля, напряженность которого достаточна для магнитного насыщения. Такое воздействие приводит к изменению магнитных характеристик обрабатываемой стали, а именно к снижению ее магнитной проницаемости [13]. Данное поведение является естественным для намагничивания на стадии парапроцесса, оно, в свою очередь, вызывает снижение коэффициента k , который обратно пропорционален глубине проникновения вихревых токов, и удельной тепловой мощности. Можно привести аналогию с увеличением глубины проникновения тока в металл при переходе его из ферромагнитного в парамагнитное состояние. Но имеется физическое различие в природе парамагнитного состояния металла и состояния ферромагнетика, намагниченного в области парапроцесса. Они похожи лишь малыми значениями относительной магнитной проницаемости. Таким образом, наличие внешнего магнитного поля на этапе первого квазистационарного процесса приводит к снижению скорости индукционного нагрева ферромагнитного материала и увеличению глубины его равномерного прогрева.

Магнитная восприимчивость резко падает выше точки Кюри, поэтому внешнее магнитное поле при этих температурах не оказывает влияния на скорость нагрева. При этом благодаря малой разнице в значениях магнитной проницаемости ниже и выше точки Кюри в присутствии внешнего поля на кривой нагрева отсутствует перегиб, характерный для перехода поверхностного слоя в парамагнитное состояние. В полях с большей напряженностью кривая нагрева будет превращаться в прямую линию (с тангенсом угла наклона к оси времени, соответствующему скорости нагрева выше точки Кюри). Сравнение зависимостей на рис. 2 и 3 показывает схожесть общих закономерностей и правомочности ранее сделанных выводов.

Вне зависимости от использованного материала во всех случаях, приведенных на рис. 3, наблюдаются следующие закономерности: на начальном этапе нагрева в случае применения внешнего магнитного поля снижается скорость нагрева вплоть до точки Кюри. При наличии внешнего магнитного поля перепад скорости нагрева вблизи критической точки на диаграмме менее резок. По окончании фазового превращения скорости нагрева с полем и без поля практически сравниваются.

Как можно увидеть на рис. 4, кривые нагрева при обычном ТВЧ нагреве и с наложением внешнего поля сближаются с уменьшением толщины стенки образца вплоть до почти полного их совпадения в случае толщины в 1 мм. Данное явление объясняется тем, что толщина стенки приближается к глубине проникновения вихревых токов без внешнего подмагничивания.

На рис. 5 хорошо видно, что влияние магнитного поля значительно снижает разброс температур вблизи поверхности на первых этапах нагрева, в то время как без применения магнитного поля разброс составляет около 250 °С по всей исследуемой глубине и около 50 °С от поверхности до точки на расстоянии 1 мм. В то же время после достижения точки Кюри характеры распределения температур становятся схожими, при этом наблюдается более резкое снижение температуры на поверхности у образца, обрабатываемого без наложения внешнего поля.

Как можно увидеть на рис. 6, в образце из стали 45 наблюдается аналогичная картина с получением большей равномерности нагрева по сечению при наложении внешнего магнитного поля вплоть до точки Кюри. Когда поверхностный слой образца, нагреваемого в поле, достигает температуры Кюри, глубина проникновения тока в материал изменяется незначительно (кривые 3 и 4), так как при этом не происходит резкого уменьшения магнитной проницаемости. А в образце, который нагревался без поля, после перехода в парамагнитное состояние происходит перераспределение индуктируемой мощности и отвод теплоты от поверхности к сердцевине, что вызывает уменьшение температурного перепада по сечению. В этом случае (кривая 4) характеры распределения температуры оказываются одинаковыми для обоих режимов нагрева, но с сохранением большей равномерности прогрева в случае подмагничивания.

Как показали эксперименты с электроотпуском (рис. 7), без наложения внешнего поля не удастся отпустить материал на необходимую глубину: отпуск происходит на глубине до 1 мм при глубине закаленного слоя в три раза больше. В то же время глубина электроотпуска с подмагничиванием выше, что позволяет произвести его на той же установке. При этом твердость, полученная при электроотпуске с подмагничиванием, имеет большие значения, чем после обычного печного отпуска.

Гистограммы распределения размеров зерен аустенита после скоростного с подмагничиванием и обычного глубинного нагрева стали с пониженной прокаливаемостью показывают, что при первом режиме средний диаметр зерна оказывается меньше на 12,96 мкм (рис. 8). Таким образом, проблемы с ростом зерна аустенита, возникающие при индукционном нагреве сталей с пониженной прокаливаемостью, могут быть устранены при использовании внешнего подмагничивания.

Заключение. Результаты исследования свидетельствуют: наложение внешнего магнитного поля при температурах ниже точки Кюри увеличивает глубину проникновения вихревых токов, что, в свою очередь, способствует более равномерному нагреву материала. Это позволяет реализовывать эффекты упрочнения при нагреве с более высокими частотами и устранять недостатки такого нагрева, проявляющиеся без подмагничивания.

Наблюдаемые изменения при наличии подмагничивания при нагреве ТВЧ объясняются снижением магнитной проницаемости обрабатываемого материала, которой прямо пропорциональна глубина проникновения вихревых токов. При достижении точки Кюри влияние данного эффекта нивелируется. Было показано, что при наложении внешнего магнитного поля технологически становится возможным проведение скоростного электроотпуска на одном генераторе с получением больших значений твердости, чем при обычном отпуске. Также является целесообразным использование скоростного подмагничивания для поверхностной закалки ТВЧ сталей пониженной прокаливаемости, так как устраняется проблема крупного аустенитного зерна, возникающая при обычном глубинном нагреве.

Список литературы / References

1. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В. *Магнитная гетерогенность аустенита и превращения в сталях*. Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет; 2021. 198 с.
2. Pustovoi VN, Dolgachev YuV. *Magnetic Heterogeneity of Austenite and Transformations in Steels*. Rostov-on-Don: Don State Technical University; 2021. 198 p. (In Russ.)
3. Pustovoi VN, Dolgachev YV. Distortion-Free Heat Treatment of Thin Rods in Magnetic Field. *Materials Performance and Characterization*. 2018;7(6):20170159. <https://doi.org/10.1520/MPC20170159>
4. Pustovoi VN, Dolgachev YV, Dombrovskii YM. The Technology of Distortion-Free Quenching in a Magnetic Field of Thin-Walled Details of the Ring Form. *Solid State Phenomena*. 2021;316:233–239. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.316.233>
4. Rudnev V, Loveless D, Cook RL. *Handbook of Induction Heating*. CRC press; 2017. 772 p.
5. Haimbaugh RE. *Practical Induction Heat Treating, Second Edition*. ASM International; 2015. 380 p.
6. Формалев В.Ф. *Теплоперенос в анизотропных твердых телах. Численные методы, тепловые волны, обратные задачи*. Москва: Физматлит; 2015. 274 с.
7. Formalev VF. *Heat Transfer in Anisotropic Solids. Numerical Methods, Heat Waves, Inverse Problems*. Moscow: Fizmatlit; 2015. 274 p. (In Russ.)
7. Сергеев Н.Н., Сергеев А.Н., Кутепов С.Н., Гвоздев А.Е., Чуканов А.Н., Агеева Е.В. Влияние термической обработки на механические свойства арматурного проката. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2021;11(2):8–25. URL: <https://techusgu.elpub.ru/jour/article/view/101> (дата обращения: 10.10.2025).
8. Sergeev NN, Sergeev AN, Kutepov SN, Gvozdev AY, Chukanov AN, Ageeva EV. Influence of Heat Treatment on the Mechanical Properties of Rebar Products. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2021;11(2):8–25. (In Russ.) URL: <https://techusgu.elpub.ru/jour/article/view/101> (accessed: 10.10.2025).
8. Кутепов С.Н., Гвоздев А.Е. Влияние режимов отпуска на механические и коррозионные свойства термомеханически упрочненного арматурного проката. В: *Труды VIII Международной научной конференции «Влияние современности на науку и практику»*. Мадрид: Испания; 2021. 193 p.
9. Kutepov SN, Gvozdev AE. Influence of Tempering Modes on the Mechanical and Corrosion Properties of Thermomechanically Hardened Rebar Rolled Products. In: *Proceedings of the VIII International Scientific Conference “The Influence of Modernity on Science and Practice”*. Madrid: Spain; 2021. 193 p. (In Russ.)
9. Гордиенко А.И., Гурченко П.С., Михлюк А.И., Вегера И.И. *Обработка изделий машиностроения с применением индукционного нагрева*. Минск: Белорусская наука; 2009. 287 с.
10. Gordienko AI, Gurchenko PS, Mikhlyuk AI, Vegera II. *Processing of Mechanical Engineering Products Using Induction Heating*. Minsk: Belorusskaya Nauka; 2009. 287 p. (In Russ.)
10. Lupi S. *Induction Heating. Fundamentals of Electroheat: Electrical Technologies for Process Heating*. Springer Cham; 2017. P. 353–524.
11. Костюкович Г.А., Попрукайло А.В., Овчинников Е.В., Веремейчик А.В., Хвисевич В.М., Линник Д.А. Технология термообработки крестовин карданных передач токами высокой частоты. В: *Международный сборник научных трудов «Механика. Исследования и инновации»*. Вып. 17. Гомель: БелГУТ; 2024. С. 77–84.
12. Kostukovich GA, Poprykailo AV, Auchynnikau YV, Verameichyk AI, Khvisevich VM, Linnik DA. Technology of Heat Treatment of Cardan Transmission Crosses by High-Frequency Currents. In: *International Collection of Scientific Papers “Mechanics. Research and Innovation”*. Vol. 17. Gomel: BelSUT; 2024. P. 77–84. (In Russ.)
12. Цыбулин И.А. Анализ способов повышения долговечности рабочих органов почвообрабатывающих орудий и обоснование актуальности дальнейшего изучения процесса упрочнения импульсным электроконтактным нагревом. В: *Труды международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию кафедры сельскохозяйственных машин агроинженерного факультета Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I. «Инновационные направления развития технологий и технических средств механизации сельского хозяйства»*. Воронеж. 25 декабря 2015 года. Т. 1, ч. II. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I; 2015. С. 333–339.

Tsybulin IA. Analysis of Ways to Increase the Durability of Working Bodies of Tillage Implements and Substantiation of the Relevance of Further Study of the Hardening Process by Pulsed Electrocontact Heating. In: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 100th Anniversary of the Department of Agricultural Machinery of the Faculty of Agricultural Engineering of Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I. "Innovative Directions of Development of Technologies and Technical Means of Agricultural Mechanization"*. Voronezh. December 25, 2015. Vol. 1, Part II. Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great; 2015. pp. 333–339. (In Russ.)

13. Tumanski S. *Handbook of Magnetic Measurements*. CRC Press; 2016. 404 p. URL: <https://books.google.ru/books?id=s0npF4E5jasC&hl=ru&num=15> (accessed: 09.11.2025).

Об авторах:

Виктор Николаевич Пустовойт, доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), pustovoyt45@gmail.com

Юрий Вячеславович Долгачев, доктор технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), ydolgachev@donstu.ru

Алексей Сергеевич Пивченков, магистрант кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), gde.lyoxa@bk.ru

Заявленный вклад авторов:

В.Н. Пустовойт: формирование основной концепции, цели и задач исследования, научное руководство.

Ю.В. Долгачев: получение экспериментальных данных, анализ результатов исследований, доработка текста, формулирование выводов.

А.С. Пивченков: расчеты, подготовка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Viktor N. Pustovoyt, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Materials Science and Technology of Metals, Don State Technical University, (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), pustovoyt45@gmail.com

Yuri V. Dolgachev, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Materials Science and Technology of Metals, Don State Technical University, (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), ydolgachev@donstu.ru

Aleksey S. Pivchenkov, Master's Student of the Department of Materials Science and Technology of Metals, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), gde.lyoxa@bk.ru

Claimed Contributorship:

VN Pustovoyt: formation of the basic concept, goals and objectives of the research, supervision.

YuV Dolgachev: experimental data, research results, finalizing the text, formulating conclusions.

AS Pivchenkov: calculations, text preparation, correction of conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

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

Поступила в редакцию / Received 31.08.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 19.09.2025

Принята к публикации / Accepted 29.09.2025