

ТОМ 9, №1, 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:

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

<i>Регистрация:</i>	Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 66531 от 21 июля 2016 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
<i>Индексация и архивация:</i>	РИНЦ, CyberLeninka, CrossRef, DOAJ, Index Copernicus, Internet Archive
<i>Сайт:</i>	https://bps-journal.ru
<i>Адрес редакции:</i>	344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
<i>E-mail:</i>	vestnik@donstu.ru
<i>Телефон:</i>	+7 (863) 2–738–372
<i>Дата выхода №1, 2025 в свет:</i>	28.02.2025





Safety of Technogenic and Natural Systems

Bezopasnost' Tekhnogennyh i Prirodnyh 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:

- Ground Transport and Technological Means and Complexes
- Machines, Aggregates and Technological Processes
- Metallurgical Science and Heat Treatment of Metals and Alloys
- Powder Metallurgy and Composite Materials
- Materials Science
- Fire Safety
- Environmental Safety
- Occupational Safety

Registration:

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

*Indexing
and Archiving:*

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

Website:

<https://bps-journal.ru>

Address

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

E-mail:

vestnik@donstu.ru

Telephone:

+7 (863) 2–738–372

*Date of Publication
No.1,2025:*

28.02.2025



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)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Пустовойт Виктор Николаевич, доктор технических наук, профессор, Донской 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)

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

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

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

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

Editorial Board

Editor-in-Chief

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

Deputy Chief Editors

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

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

Executive Editor

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

Executive Secretaries

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Vadim I. 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. Eremeeva, Dr.Sci. (Eng.), Professor, National University of Science and Technology (MISiS) (Moscow, Russian Federation)

Содержание

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Разработка методики расчета комбифильтр	7
<i>Б.С. Ксенофонтов, А.А. Ширних</i>	
Уточнение модели низового лесного пожара с учетом конвективной турбулентности	14
<i>Е.С. Андреева, Г.А. Сергеева, И.В. Богданова</i>	
Результаты исследования тепломассопереноса в условиях слабой аэродинамической связи при пульсирующем режиме вентиляции	22
<i>А.Э. Филин, В.А. Филина, С.В. Тертычная, И.Ю. Курносов, И.С. Колбина, Д.Э. Пронина</i>	
Применение подводного видеонаблюдения для контроля рыбозащитного устройства на водозаборном сооружении тепловой электростанции	32
<i>А.Р. Саатов, М.Л. Калайда</i>	
Особенности развития зелёной энергетики в Российской Федерации	42
<i>Л.А. Минасян, А.В. Благин, А.В. Канеева</i>	

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Система цифрового мониторинга безопасности для авторемонтного предприятия	55
<i>В.В. Егельский, Н.Н. Николаев, Е.В. Егельская, Э.А. Панфилова</i>	

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Объёмные изменения и структурные напряжения в стали после закалки в магнитном поле	65
<i>В.Н. Пустовойт, Ю.В. Долгачев</i>	
Использование соломы, угля и пенопласта для улучшения термических и механических характеристик полиуретана	72
<i>И.Р. Антибас</i>	

Contents

TECHNOSPHERE SAFETY

Development of a Calculation Method for a Combined Filter	7
<i>Boris S. Ksenofontov, Albert A. Shirniekh</i>	
Refinement of the Ground Forest Fire Model Taking into Account Convective Turbulence	14
<i>Elena S. Andreeva, Galina A. Sergeeva, Irina V. Bogdanova</i>	
Research Results of Heat and Mass Transfer in Conditions of Weak Aerodynamic Coupling with Pulsating Ventilation Mode	22
<i>Aleksandr E. Filin, Violetta A. Filina, Svetlana V. Tertychnaya, Ilya Yu. Kurnosov, Irina S. Kolbina, Darya A. Pronin</i>	
Use of Underwater Video Surveillance to Monitor a Fish Protection Device at a Thermal Power Plant Water Intake Facility	32
<i>Ainur R. Saetov, Marina L. Kalaida</i>	
Specifics of Green Energy Development in the Russian Federation	42
<i>Larisa A. Minasyan, Anatoly V. Bragin, Anna V. Koneva</i>	

MACHINE BUILDING

Digital Safety Monitoring System for Auto Repair Company	55
<i>Vladislav V. Egelsky, Nikolai N. Nikolaev, Elena V. Egelskaya, Elvira A. Panfilova</i>	

CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY

Volumetric Changes and Structural Stresses after Quenching in a Magnetic Field	65
<i>Viktor N. Pustovoyt, Yuri V. Dolgachev</i>	
The Use of Straw, Coal and Foam to Improve Thermal and Mechanical Properties of Polyurethane	72
<i>Imad R. Antibas</i>	

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 628.16.0

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-7-13>

Разработка методики расчета комбифильтра

Б.С. Ксенофонов , А.А. Ширниех ✉

 Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
г. Москва, Российская Федерация
✉ al-3x@mail.ru

EDN: URXCEZ

Аннотация

Введение. При ухудшении очистки стоков следует повысить интенсивность работы очистных сооружений. Некоторые подходы к решению данной задачи описаны в литературе. Известно, как в целях интенсификации процесса коагуляции используется регулируемое механическое перемешивание коагулянта со стоками, перемешивание с помощью воздуха, ввод коагулянта посредством струйных или камерных смесителей. Авторы данной статьи предлагают интегрировать в одном корпусе фильтр осветлительный вертикальный (ФОВ) и камеру перемешивания. Такой подход описан впервые. Исключены недостатки, характерные для эксплуатации обособленных устройств: не нужны дополнительные площади, можно расположить рядом зоны образования агрегатов и их удаления на фильтрах, а также избежать разбивания хлопьев в соединяющих трубопроводах. Эффективность установки ранее подтвердилась экспериментально. Цель данного исследования — разработать научно обоснованную методику расчета комбифильтра, что важно для массового внедрения.

Материалы и методы. Эффективность перемешивания псевдоожиженного слоя определяли по критерию Кэмпбелла, который характеризует энергию, затрачиваемую на перемешивание. Учитывались публикации, посвященные исследуемой проблеме. Особое внимание уделяется тому, как описана коагуляция. До разработки методики расчета авторы провели эксперименты и создали математическую модель установки. Рассматривается функционирование комбифильтра с камерой перемешивания, которая состоит из чаши интенсивного перемешивания с плавающей загрузкой и чаши успокоивания. Основные исходные данные для методики расчета: максимальный расход стоков, вязкость воды, диаметр фильтра, высота от загрузки до корпуса, интенсивность обратной промывки и объем расширения загрузки при обратной промывке.

Результаты исследования. Показано, как критерий Кэмпбелла зависит от массы частиц, их площади, времени контакта и вязкости псевдоожиженного слоя. На этой зависимости основан расчет камеры перемешивания комбифильтра. Принимается во внимание регенерация фильтров, связанная с эффективностью обратной промывки. Приводится методика расчета камеры перемешивания. Учитываются факторы снижения эффективности обратной промывки. В качестве компенсации предлагается усилить интенсивность промывки или уменьшить высоту фильтрующего слоя. Показано, как рассчитать габариты элементов камеры перемешивания — диаметр и высоту чаш. В расчете также заложена самопроверка, которая позволит избежать ошибок.

Обсуждение и заключение. Впервые описаны усовершенствованная конструкция комбифильтра и методика его расчета. Предложенный подход позволяет определить габариты камеры перемешивания и обеспечить необходимую эффективность обратной промывки. Новое решение представляет практический интерес для предприятий, которые эксплуатируют очистные сооружения с ФОВ.

Ключевые слова: фильтр осветлительный вертикальный, комбинированный фильтр, расчет комбифильтра, критерий Кэмпбелла для псевдоожиженного слоя, интенсификация фильтрования

Благодарности. Авторы благодарят редакционную команду журнала и рецензента за компетентную экспертизу и ценные рекомендации по улучшению статьи.

Для цитирования. Ксенофонов Б.С., Ширниех А.А. Разработка методики расчета комбифильтра. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2025;9(1):7–13. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-7-13>

Development of a Calculation Method for a Combined Filter

Boris S. Ksenofontov , Albert A. Shirniekh  

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

 al-3x@mail.ru

Abstract

Introduction. If wastewater treatment becomes less effective, the intensity of treatment facilities should be increased. Several approaches to solving this issue have been described in the literature. For example, to intensify the coagulation process, researchers have used controlled mechanical mixing of coagulants with effluents, mixing with air, and injecting the coagulant using jet or chamber mixers. The authors of this paper propose integrating a vertical clarifying filter (VCF) and a mixing chamber into one housing. This is a novel approach that eliminates the disadvantages of operating separate devices, such as the need for additional space, the possibility of forming aggregates close to the area where they are removed on filters, and avoiding breakage of flakes in connecting pipelines. Experimental evidence has previously demonstrated the effectiveness of this installation. The aim of this study is to develop a scientific methodology for calculating the combined filter, which is essential for widespread adoption.

Materials and Methods. The mixing efficiency of the fluidized bed was determined using the Camp criterion, which characterized the energy spent on mixing. Relevant publications on the subject were also taken into account. Special attention was paid to the description of coagulation. Before developing the calculation method, the authors conducted experiments and created a mathematical model of the installation. The operation of a combined filter with a mixing chamber consisting of a rapid mixing tank with a floating load and a settling tank was considered. The main initial data for the calculation method included: maximum wastewater flow rate, water viscosity, filter diameter, distance from load to housing, backwash intensity, and the volume of expansion of load during backwashing.

Results. The paper shows that the Camp criterion depends on various factors, including mass, area, contact time, and viscosity of particles in a fluidized bed. The calculation of the mixing chamber of the filter was based on this dependence. The regeneration of filters related to the efficiency of backwashing was taken into account. The method for calculating the mixing chamber was presented, and factors that could reduce the effectiveness of backwashing were discussed. As compensation, it was proposed to increase the intensity of backwashing or reduce the height of the filter layer. It was shown how to calculate the dimensions of the mixing chamber elements — the diameter and height of the tanks. A self-check was included in the calculation to avoid errors.

Discussion and Conclusion. For the first time, an improved combined filter design and a method for calculating it are described. The proposed approach makes it possible to determine the dimensions of the mixing chamber and ensure the necessary backwash efficiency. The new solution is of practical interest for enterprises that operate wastewater treatment plants with VCF.

Keywords: vertical clarifying filter, combined filter, calculation of a combined filter, Camp criterion for fluidized bed, filtration intensification

Acknowledgments. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewer for their competent expertise and valuable recommendations that improved the quality of the article.

For citation. Ksenofontov BS, Shirniekh AA. Development of a Calculation Method for a Combined Filter. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(1):7–13. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-7-13>

Введение. По итогам 2022 года на загрязненные сточные воды в России приходилось в среднем 33,4 % от общего объема водоотведения¹. Одна из причин данной проблемы — недостаточно эффективная очистка. На промышленных объектах применяют не только одно- или двухступенчатые системы, но и комплексные решения, обеспечивающие несколько этапов очистки. Они состоят из таких компонентов, как гравельные решетки, обратноосмотические мембраны и выпарные установки. Несмотря на разнообразие и сложность этих систем, они не всегда применимы и продуктивны. Препятствием для их эффективного использования могут быть:

- дороговизна оборудования;
- устаревшие сооружения;
- ухудшение качества сточных вод.

¹ О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году. Государственный доклад. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. URL: <https://2022.ecology-gosdoklad.ru> (дата обращения: 26.08.2024).

Ниже перечислены основные методы интенсификации работы очистных сооружений. Речь идет о вариантах перемешивания коагулянта с водой:

- регулируемом механическом [1];
- с добавлением воздуха и концентрированного коагулянта [2];
- за счет кавитационных резонансных эффектов [3];
- с помощью струйных [4] или камерных смесителей [5].

Однако у этих технических решений есть свои недостатки. Во-первых, нужны дополнительные площади для размещения такого оборудования, как флокулятор или камера хлопьеобразования. Во-вторых, зоны образования агрегатов и их удаления на фильтрах находятся на определенном расстоянии друг от друга. В-третьих, при разделении процесса хлопьеобразования и фильтрации хлопья разбиваются в соединяющих трубопроводах.

Для решения проблемы нужны такие комплексы очистки воды, которые интегрируют несколько процессов в одном корпусе. Это позволит усовершенствовать существующие системы очистки и при этом сэкономить производственные площади. Подчеркнем, что речь идет о модернизации уже имеющегося оборудования. Для реализации этой задачи целесообразно использовать комбинированные фильтры.

Цель работы — создать научно обоснованную методику расчета, которая позволит повторить положительный результат использования комбифильтра для других фильтров.

Методы и материалы. Авторы предлагают полезную модель комбифильтра [6]. Это песчаный фильтр, в корпус которого встроена камера перемешивания коагулянта. Ранее целесообразность такого подхода доказали авторы представленной статьи [7]. Комбинированные установки и системы подходят для одновременного решения нескольких проблем. Так, например, биоуголь можно использовать для удаления микропластика [8]. Гибридная система мембранной дистилляции способна давать очищенную воду и электроэнергию [9]. Обратный осмос может работать от концентрированного солнечного газового двигателя [10].

По мнению авторов, предлагаемая полезная модель комбифильтра (рис. 1) — это эффективное решение для интенсификации фильтрования на действующих производствах. Схема представленного комбифильтра несколько отличается от исходного [6]. Разница обусловлена особенностями конструкции, выявленными в результате компьютерного моделирования [7]. Благодаря этим обнаруженным свойствам удалось повысить эффективность работы камеры.

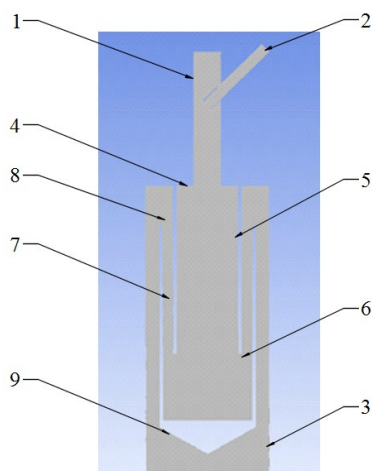


Рис. 1. Схема комбифильтра:

- 1 — патрубок исходной воды; 2 — патрубок подачи реагента; 3 — корпус фильтра;
4 — камера перемешивания; 5 — чаша интенсивного перемешивания с плавающей загрузкой; 6 — нижний перелив;
7 — чаша успокаивания; 8 — верхний перелив; 9 — конусная вставка

Через патрубки 1 и 2 в чашу интенсивного перемешивания поступают вода и коагулянт соответственно. Коагулянт перемешивается в первой камере под напором исходной воды благодаря перемешивающей загрузке. После обработки коагулянтом вода направляется через нижний перелив в чашу успокаивания, а затем — через верхний перелив в корпус фильтра.

Коагулянт способствует нейтрализации заряда коллоидных частиц [11] и образованию труднорастворимых соединений [12]. Процесс коагуляции включает два этапа [13], для каждого из которых в камере перемешивания предусмотрены определенные зоны.

В камере перемешивания проходит первый этап — перекинетический. Благодаря специальной загрузке внутри камеры реагенты равномерно и быстро распределяются, достигается высокий градиент скорости потока. Контактная коагуляция еще больше увеличит эффективность реагентной обработки.

Между камерами перемешивания и хлопьеобразования расположен нижний перелив. Он выполняет ключевую функцию защиты от выноса перемешивающей загрузки дальше в чашу и в сам фильтр, а также способствует снижению турбулентности потока.

При интенсивности перемешивания не более $G = 50\text{--}60 \text{ С}^{-1}$ [14] в камерах создаются оптимальные условия для образования хлопьев.

Второй этап процесса коагуляции — ортокинетический. Он проходит в камере успокаивания, сопровождается укрупнением коллоидных частиц от 1 мкм [15] и реализует функционал камеры хлопьеобразования.

Исходная вода вместе со сформировавшимися хлопьями поступает в корпус фильтра через верхний перелив. Конусная вставка в нижней части корпуса нужна для исключения завихрений, которые разрушают хлопья.

При разработке методики расчета авторы обобщили литературные данные, провели лабораторные испытания и выполнили математическое моделирование. Результаты лабораторных исследований, подтверждающие эффективность предлагаемого решения, приведены в [7]. Для критериальной оценки процессов выбрали критерий Кэмпбелла, который оценивает энергию, затрачиваемую на перемешивание. Анализ литературы позволил выяснить, как эффективность промывки зависит от ее интенсивности и степени расширения загрузки. К тому же из публикаций известно значение градиента для псевдооживленного слоя.

Результаты исследования

1. *Интенсивность смешивания псевдооживленного слоя.* В качестве критерия эффективности работы используется интенсивность смешивания псевдооживленного слоя. Ориентируясь на этот показатель, можно задействовать камеру перемешивания с фильтрами различных типоразмеров и обеспечить полученный ранее результат [7]. Согласно [16], интенсивность смешивания реагента с водой характеризуется критерием Кэмпбелла:

$$\Theta = G \cdot t, \quad (1)$$

где t — время пребывания в камере перемешивания, с; G — градиент скорости, $1/\text{с}$.

Время пребывания в камере перемешивания:

$$t = \frac{V}{Q}, \quad (2)$$

где V — объем чаши перемешивания, м^3 ; Q — расход исходной воды, $\text{м}^3/\text{с}$.

Градиент скорости:

$$G = \sqrt{\frac{\Delta p}{\mu t}}, \quad (3)$$

где Δp — перепад давления в камере перемешивания, Па; μ — динамическая вязкость воды, $\text{Па}\cdot\text{с}$; t — время перемешивания, с.

Согласно [17], перепад давления для псевдооживленного слоя определяется по формуле:

$$\Delta p = \frac{m_{\text{ч}} g}{S}, \quad (4)$$

где $m_{\text{ч}}$ — масса всех частиц, кг; g — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; S — площадь поперечного сечения чаши перемешивания, м^2 .

Объединив (1)–(4), получим уравнение критерия Кэмпбелла:

$$\Theta = \sqrt{\frac{m_{\text{ч}} g}{S \mu t}} \cdot \frac{V}{Q}. \quad (5)$$

С помощью формулы (5) для лабораторного стенда [7] рассчитали критерий Кэмпбелла. Его приняли равным 100 ед.

2. *Методика расчета камеры перемешивания.* Далее приводится методика расчета камеры перемешивания и необходимые исходные данные для расчета.

Исходные данные:

- критерий Кэмпбелла, Θ ;
- максимальный расход очищаемой воды, Q , $\text{м}^3/\text{ч}$;
- динамическая вязкость воды, μ , $\text{Па}\cdot\text{с}$;
- насыпная плотность частиц $\rho_{m_{\text{ч}}}$, кг;
- ускорение свободного падения, g , $\text{м}/\text{с}^2$;
- диаметр фильтра, $d_{\text{ф}}$, м;
- высота от загрузки до корпуса, H , м;
- интенсивность обратной промывки, ИОП_1 , $\text{л}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$;
- объем расширения загрузки при обратной промывке, $V_{\text{расш1}}$, м^3 .

Преобразовав формулу (5), можно получить систему уравнений (6), с помощью которой определяются габариты перемешивающей камеры.

$$\begin{cases} d_{\text{ч.п.}} \cdot H_{\text{ч}} = 2 \cdot \Xi \cdot Q \sqrt{\frac{\mu \cdot t}{\pi \cdot m_{\text{ч}} \cdot g}} \\ t = \frac{\pi \cdot d_{\text{ч.п.}}^2 \cdot H_{\text{ч}}}{4Q} \\ m_{\text{ч}} = \rho_{m_{\text{ч}}} \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{ч.п.}}^2 \cdot H_{\text{ч}}}{Q} \end{cases} \quad (6)$$

Здесь $d_{\text{ч.п.}}$ — диаметр чаши перемешивания, м; $H_{\text{ч}}$ — высота чаш перемешивания и чаши успокаивания, м.

Скорость течения в чаше успокаивания должна быть равна скорости течения в корпусе фильтра. Для определения диаметра чаши успокаивания (всей камеры в целом) воспользуемся формулой:

$$d_{\text{ч.у.}} = \sqrt{\frac{d_{\text{ф}}^2 + d_{\text{ч.п.}}^2}{2}}, \quad (7)$$

где $d_{\text{ч.у.}}$ — диаметр чаши успокаивания, м.

Проверим, помещается ли камера в корпус фильтра. Для этого учтем:

- высоту конусной вставки $H_{\text{конус}}$ (1/4 от диаметра камеры);
- запас расстояния от конуса до загрузки с минимальной высотой 1/16 от диаметра камеры.

$$H - H_{\text{ч}} - \frac{d_{\text{ч.у.}}}{4} - \frac{d_{\text{ч.у.}}}{16} \geq 0. \quad (8)$$

Проверим правильность выбора размеров камеры:

$$d_{\text{ч.у.}} < d_{\text{ф}}. \quad (9)$$

Если условия (8) или (9) не выполняются, то необходимо вернуться к (6) и скорректировать габариты перемешивающей чаши.

Рассчитаем объем, который занимает камера перемешивания:

$$V_{\text{камера}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{ч.у.}}^2}{4} \cdot \left(H_{\text{ч}} + \frac{d_{\text{ч.у.}}}{12} \right). \quad (10)$$

Определим условие обеспечения необходимого расширения загрузки:

$$\frac{\pi \cdot d_{\text{ф}}^2}{4} \cdot H_{\text{ч}} - V_{\text{камера}} \geq V_{\text{расш1}}. \quad (11)$$

Если условие не выполняется, то эффективность обратной промывки будет хуже. Для решения этой проблемы нужно определить, за счет чего будет поддерживаться эффективность промывок.

1. За счет увеличения интенсивности промывки находим новую интенсивность обратной промывки ИОП₂ [18]:

$$\text{ИОП}_1 \cdot V_{\text{расш1}} = \text{ИОП}_2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_{\text{ф}}^2}{4} \cdot H - V_{\text{камера}} \right). \quad (12)$$

2. За счет уменьшения высоты загрузки находим значение высоты от корпуса до загрузки $H_{\text{новая}}$, которая обеспечит нужный объем для расширения загрузки:

$$H_{\text{новая}} = \frac{V_{\text{расш1}} + V_{\text{камера}}}{\frac{\pi \cdot d_{\text{ф}}^2}{4}}. \quad (13)$$

Рассчитаем, на сколько нужно уменьшить высоту загрузки:

$$\Delta H_{\text{загр}} = H - H_{\text{новая}}. \quad (14)$$

3. Для вычислений, связанных с изменением интенсивности и объема загрузки, используем формулы (12) и (13) с учетом необходимых условий. Например, исходя из возможностей конкретных очистных сооружений, по (13) задаем допустимую величину снижения высоты загрузки, подставляем ее в (12) и рассчитывая нужную интенсивность промывки.

Определим объемы чаш перемешивания $V_{\text{ч.п.}}$ и успокаивания $V_{\text{ч.у.}}$:

$$V_{\text{ч.п.}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{ч.п.}}^2}{4} \cdot H_{\text{ч}}, \quad (15)$$

$$V_{\text{ч.у.}} = \frac{\pi \cdot (d_{\text{ч.у.}}^2 - d_{\text{ч.п.}}^2)}{4} \cdot H_{\text{ч}}. \quad (16)$$

Вычислим необходимый объем перемешивающей загрузки $V_{\text{загр}}$:

$$V_{\text{загр}} = \frac{1}{3} V_{\text{ч.п.}}. \quad (17)$$

Рассчитаем время нахождения воды в чашах перемешивания и успокаивания:

$$t_{\text{ч.п.}} = \frac{3600 \cdot V_{\text{ч.п.}}}{Q}, \quad (18)$$

$$t_{\text{ч.у.}} = \frac{3600 \cdot V_{\text{ч.у.}}}{Q}. \quad (19)$$

Обсуждение и заключение. Итоги научных изысканий, описанных в статье, позволяют говорить о целесообразности использования предложенной методики расчета комбифильтра. Этот подход, во-первых, базируется на хорошо известных и достоверных данных из литературных источников. Во-вторых, в пользу практической применимости аппарата моделирования говорит его сравнительная простота — 19 довольно лаконичных формул. Выполнив эту работу, авторы подтвердили ранее полученные результаты. Важно было еще раз показать, что смоделированная камера перемешивания улучшает процесс фильтрования и повышает активность коагуляции. Поэтому в качестве критерия эффективности работы используется интенсивность смешивания псевдооживленного слоя. Методика расчета камеры перемешивания позволяет определить ее габариты и обеспечить необходимую эффективность обратной промывки. Решение подходит для вертикальных осветлительных фильтров всех типов и размеров. Следовательно, методику можно применить на любом производстве, где используется такое оборудование.

Список литературы / References

1. Григорьева А.Н. Повышение эффективности процессов коагуляции за счет применения регулируемого механического перемешивания. *Наилучшие доступные технологии*. 2022;(2):36–44.
- Grigoreva AN, Mekhnetsov IA. Improving the Efficiency of Coagulation Processes by Using Controlled Mechanical Mixing. *Naилuchshie Dostupnye Tekhnologii*. 2022;(2):36–44. (In Russ.)
2. Сафронов М.А. Разработка конструкции смесительного узла для высокоградиентного перемешивания растворов коагулянта с водой. *Инженерный вестник Дона*. 2021;(1):6772.
- Safronov MA, Maljutina TV, Horeva IA. Development of a Mixing Unit Design for High-Gradient Mixing of Coagulant Solutions with Water. *Engineering Journal of Don*. 2021;1:6772. (In Russ.)
3. Курбатов А.Ю. Устройство для смешения коагулянта с водой. Патент РФ № 2021118005. 2021. 6 с.
- Kurbatov AYU, Kuzin EN, Averina YUM, Vetrova MA, Sitnikov IA. Device for Mixing Coagulant with Water. Patent RF No. RU 207722 U1. 2021. 6 p. (In Russ.)
4. Александров В.А., Какалов И.Л., Курсанов Н.П., Чуносков Д.В. Статический струйный смеситель. Патент РФ № RU 163042 U1. 2008. 18 с.
- Aleksandrov VA, Kakalov IL, Kursanov NP, Chunosov DV. Static Jet Mixer. Patent RF No. RU 163042 U1. 2008.18 p. (In Russ.)
5. Соболев К.В. Интенсификация процессов очистки сточных вод пищевой промышленности при использовании камерного смесителя *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2022;36(13):116–117.
- Sobolev KV, Nishukova MA, Rubleva SA. Intensification of Processes of Reagent Wastewater Treatment of the Food Industry Using a New Type Mixer. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2022;36(13):116–117. (In Russ.)
6. Ксенофонов Б.С. Комбифильтр для очистки воды. Патент РФ № RU 209470 U1. 2022. 4 с. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU209470U1_20220316.pdf (дата обращения: 26.08.2024).
- Ksenofontov BS. Combined Filter for Water Purification. Patent RF No. RU 209470 U1. 2022. 4 p. (In Russ.) URL: https://patents.s3.yandex.net/RU209470U1_20220316.pdf (accessed: 26.08.2024).
7. Ксенофонов Б.С., Ширниех А.А. Разработка камеры перемешивания для комбифильтра. *Экология промышленного производства*. 2023;4(124):5–11. https://doi.org/10.52190/2073-2589_2023_4_5
- Ksenofontov BS, Shirniekh AA. Development of the Mixing Chamber for the Combi-Filter. *Industrial Ecology*. 2023;4(124):5–11. (In Russ.) https://doi.org/10.52190/2073-2589_2023_4_5
8. Siipola V, Pflugmacher S, Romar H, Wendling L, Koukkari P. Low-Cost Biochar Adsorbents for Water Purification Including Microplastics Removal. *Applied Sciences*. 2020;10(3):788. <https://doi.org/10.3390/app10030788>
9. Elminshawy NAS, Gadalla MA, Bassyouni M, El-Nahhas K, Elminshawy A, Elhenawy Y. A Novel Concentrated Photovoltaic-Driven Membrane Distillation Hybrid System for the Simultaneous Production of Electricity and Potable Water. *Renewable Energy*. 2020;162:802–817. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.041>
10. Soliman AM, Adil Al-Falahi, Mohamed A Sharaf Eldean, Monaem Elmnifi, Magdi Hassan, Basim Younis, et al. A New System Design of Using Solar Dish-Hydro Combined with reverse osmosis for Sewage Water Treatment: Case Study Al-Marj, Libya. *Desalination and Water Treatment*. 2020;193:189–211. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25782>
11. Dayarathne HNP, Angove MJ, Aryal R, Abuel-Naga H, Mainali B. Removal of Natural Organic Matter from Source Water: Review on Coagulants, Dual Coagulation, Alternative Coagulants, and Mechanisms. *Journal of Water Process Engineering*. 2021;40:101820. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101820>
12. Wei Lun Ang, Abdul Wahab Mohammad. State of the Art and Sustainability of Natural Coagulants in Water and Wastewater Treatment. *Journal of Cleaner Production*. 2020;262:121267. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121267>

13. Jerzy Baldyga, Grzegorz Tyl, Mounir Bouaifi. Perikinetik and Orthokinetik Aggregation of Small Solid Particles in the Presence of Strong Repulsive Forces. *Chemical Engineering Research and Design*. 2018;136:491–501. <https://doi.org/10.1016/j.chemd.2018.06.021>
14. Saritha V, Srinivas N, Srikanth Vuppala NV. Analysis and Optimization of Coagulation and Flocculation Process. *Applied Water Science*. 2017;7:451–460. <http://doi.org/10.1007/s13201-014-0262-y>
15. Синайский Э.Г., Лапица Е.Я., Зайцев Ю.В. *Сепарация многофазных многокомпонентных систем*. Москва: Недра; 2002. 621 с.
- Sinaiskii EG, Lapiga EYa, Zaitsev YuV. *Separation of Multiphase Multicomponent Systems*. Moscow: Nedra; 2002. 621 p. (In Russ.)
16. Конончук О.О. *Разработка технологии получения оксихлоридного коагулянта при переработке медно-аммиачных и алюминиевых отходов*. Дис. канд. техн. наук. Санкт-Петербург; 2020. 115 с.
- Kononchuk OO. *Development of Technology for Obtaining Oxychloride Coagulant during Processing of Copper-Ammonia and Aluminum Waste*. Author's thesis. St. Petersburg; 2020. 115 p. (In Russ.)
17. Кочетов О.С., Сошенко М.В., Булаев В.А. Расчет системы искусственного микроклимата с теплоутилизатором кипящего слоя. В: *Трудах Междунар. науч.-практ. конф. «Глобализация науки: проблемы и перспективы»*. Уфа: Омега сайнс; 2014. С. 30–33.
- Kochetov OS, Soshenko MV, Bulaev VA. Calculation of an Artificial Microclimate System with a Fluidized Bed Heat Exchanger. In: *Proc. of the International Scientific and Practical Conference "Globalization of Science: Problems and Perspectives"*. Ufa: Omega Science; 2014. P. 30–33. (In Russ.)
18. Быков В.В. Исследование обратных промывок многослойных фильтрующих сред с участием «сокирнита», Pyrolox и dmi-65. *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. 2017;8(116):12–26.
- Bykov VV. Reverse Flushing Multilayer Filter Media with the Participation of "Sokirnit", Pyrolox and DMI-65. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*. 2017;8(116):12–26. (In Russ.)

Об авторах:

Борис Семенович Ксенофонтов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры экологии и промышленной безопасности Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (105005, Российская Федерация, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Басманный, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), kbsflot@mail.ru

Альберт Албиерович Ширниех, аспирант кафедры экологии и промышленной безопасности Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (105005, Российская Федерация, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Басманный, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), al-3x@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Б.С. Ксенофонтов: разработка концепции.

А.А. Ширниех: проведение исследования.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Boris S. Ksenofontov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Ecology and Industrial Safety, Bauman Moscow State Technical University (bldg. 1, 5, 2nd Baumanskaya St., Basmany Municipal District, Moscow, 105005, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), kbsflot@mail.ru

Albert A. Shirniekh, Postgraduate Student of the Department of Ecology and Industrial Safety, Bauman Moscow State Technical University, (bldg. 1, 5, 2nd Baumanskaya St., Basmany Municipal District, Moscow, 105005, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), al-3x@mail.ru

Claimed Contributorship:

BS Ksenofontov: development of the concept.

AA Shirniekh: conducting research.

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

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

Поступила в редакцию / Received 03.11.2024

Поступила после рецензирования / Revised 26.11.2024

Принята к публикации / Accepted 07.12.2024

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 614.841.123.24

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-14-21>

Уточнение модели низового лесного пожара с учетом конвективной турбулентности

Е.С. Андреева , Г.А. Сергеева , И.В. Богданова

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

✉ meteo0717@yandex.ru

EDN: XCYIOF

Аннотация

Введение. В научной литературе довольно активно обсуждается тема математического моделирования развития лесных пожаров для прогнозов скорости их распространения и площади, которую они охватят. С точки зрения процессов турбулентности оцениваются потенциальная высота и отклонение столбов огня, дыма, горячего воздуха, разброс частиц горения и рациональные направления гашения огня. Однако известные модели не дают четкого представления о том, как срабатывает турбулентность при переходе пожара с приповерхностного слоя на нестационарный приземный и выше. Иными словами, сложно просчитать переход низового пожара в его более опасную интенсивную форму. Восполнение этого недостатка — актуальная научная и прикладная задача. Цель данной работы — уточнить уравнения математических моделей распространения низовых лесных пожаров для лучшего контроля за этими инцидентами, что в итоге будет способствовать уменьшению рисков и сокращению ущерба от них.

Материалы и методы. Для достижения цели исследования были изучены труды, охватывающие разные подходы, как теоретические, так и прикладные, посвященные проблеме прогнозирования развития пожаров. В качестве основных приняты работы Д.Л. Лайхтмана, А.С. Гаврилова, П.М. Матвеева. Кроме анализа этих литературных источников, авторы применяли статистические методы обработки информации и использовали возможности математического моделирования.

Результаты исследования. Интерпретирована общепринятая эллиптическая форма контура низового лесного пожара в модели Р. Ротермела. Показаны ее недостатки для прогнозирования пятнистых и интенсивных верховых пожаров. Оценено введение в уравнение таких параметров, как относительная влажность воздуха, уклон местности, шероховатость или вязкость поверхности, особенности горящего вещества. Обозначены виды конвекций, характерных для пятнистого и интенсивного верхового пожара: внутренняя (термическая) и внешняя (механическая). Обоснован отказ от учета приповерхностной турбулентности. Для рассмотрения турбулентности приземных слоев воздуха авторы руководствовались представлениями о нестационарности и соответствующих физических закономерностях. В итоге базовая формула модели Р. Ротермела была дополнена вторым слоем, чтобы можно было прогнозировать развитие пожара от низового к интенсивному верховому. Безразмерный параметр 0,397 заменен коэффициентом турбулентности k_z , этот показатель внесен в откорректированное равенство Р. Ротермела и дополнен средним числом Ричардсона, которое показывает зависимость между температурой и скоростью диффузии в соседних слоях. Из этих составляющих была сформирована обновленная формула. В виде таблиц представлены результаты моделирования характерных случаев развития конвективной турбулентности и пожаров (с учетом и без учета турбулентности). Сводные данные позволяют говорить об адекватности модели, созданной в рамках представленной работы.

Обсуждение и заключение. При уточнении полуэмпирической модели Р. Ротермела для нестационарного приземного слоя обосновано введение коэффициента турбулентности. Кроме того, показана необходимость дополнения однослойной модели формулами второго уровня, характеризующими развитие пожара в нестационарном приземном слое. Откорректированная модель должна более эффективно прогнозировать параметры пятнистых и интенсивных верховых пожаров. Перспективны дальнейшие уточнения уравнений полуэмпирических моделей лесных пожаров. Целесообразно продолжить исследования в этом направлении.

Ключевые слова: математическое моделирование пожара, турбулентность в условиях пожара, переход пожара из низового в верховой

Благодарности. Авторы выражают особую благодарность профессору, доктору физико-математических наук А.С. Гаврилову, коллегам из Российского государственного гидрометеорологического университета и рецензенту за профессиональный анализ статьи и рекомендации для ее корректировки.

Для цитирования. Андреева Е.С., Сергеева Г.А., Богданова И.В. Уточнение модели низового лесного пожара с учетом конвективной турбулентности. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(1):14–21. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-14-21>

Original Theoretical Research

Refinement of the Ground Forest Fire Model Taking into Account Convective Turbulence

Elena S. Andreeva , Galina A. Sergeeva , Irina V. Bogdanova 

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

✉ meteo0717@yandex.ru

Abstract

Introduction. The scientific literature is actively discussing the topic of mathematical modeling of forest fires development to predict the speed of spread and area covered. From the perspective of turbulent processes, the height and deflection of fire, smoke, and hot air columns, as well as the spread of combustion particles and rational directions for extinguishing the fire, are evaluated. However, existing models do not provide a clear understanding of how turbulence occurs during the transition of a fire from a near-surface to an unsteady surface layer and higher. In other words, calculating the transition from ground fire to its more intense form remains a challenge. Addressing this gap is an urgent scientific and practical task. The aim of this study is to refine the equations of mathematical models for predicting the spread of forest fires, in order to better control these incidents, which will ultimately help reduce risks and damage from them.

Materials and Methods. To achieve this goal, we studied works covering different approaches, both theoretical and practical, devoted to the problem of predicting the development of fires. The works of D.L. Laikhtman, A.S. Gavrilov, and P.M. Matveev were accepted as the main ones. In addition to analyzing these literary sources, the authors applied statistical methods of information processing and used the possibilities of mathematical modeling.

Results. The generally accepted elliptical shape of the contour of a ground forest fire in the R. Rothermel model has been interpreted. Its disadvantages for predicting spot and intense crown fires have been demonstrated. The introduction of parameters such as relative humidity, terrain slope, surface roughness or viscosity, and features of the burning substance into the equation has been evaluated. The types of convection typical of spot and intense crown fires have been indicated: internal (thermal) and external (mechanical). The decision not to consider near-surface turbulence has been justified. To account for surface air layer turbulence, the authors have relied on the concepts of instability and corresponding physical laws. As a result, the basic formula of the R. Rothermel model was supplemented with a second layer so that it was possible to predict the development of a fire from a ground one to an intense crown fire. The dimensionless parameter of 0.397 was replaced by turbulence coefficient k_z . This indicator was introduced into the corrected R. Rothermel equation and supplemented with the average Richardson number, which showed the relationship between temperature and the diffusion rate in neighboring layers. From these components, an updated formula has been developed. The results of simulations for typical cases of convective turbulence and fires, with and without turbulence, were presented in tables. Based on the summary data, we could conclude that the model developed within the scope of this work was adequate.

Discussion and Conclusion. When refining the semi-empirical R. Rothermel model for an unsteady surface layer, the introduction of a turbulence coefficient is justified. In addition, it is shown that it is necessary to supplement the single-layer model with second-level formulas characterizing the development of a fire in an unsteady surface layer. The adjusted model should more effectively predict the parameters of spot and intense crown fires. Further refinements of equations for semi-empirical forest fire models are promising, and it is advisable to continue research in this area.

Keywords: mathematical modeling of fire, turbulence in fire conditions, transition from ground to crown fire

Acknowledgements. The authors would like to express their special gratitude to A.S Gavrilov, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.), their colleagues from the Russian State Hydrometeorological University, and the reviewer for their professional analysis of the article and recommendations that improved the quality of the article.

For citation. Andreeva ES, Sergeeva GA, Bogdanova IV. Refinement of the Ground Forest Fire Model Taking into Account Convective Turbulence. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(1):14–21. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-14-21>

Введение. По данным ООН, к концу XXI века количество интенсивных лесных пожаров возрастет на 50 %. В 2003 году пожары в Сибири (Российская Федерация) уничтожили около 22 млн га лесных экосистем. В 2004 году на Аляске (США) пострадало 2,6 млн га леса. В 2010 году в Боливии уничтожено 1,5 млн га лесных экосистем. В Канаде в 2011 году погибло 0,7 млн га, а в 2014 году — 3,4 млн га. В 2020 году в Австралии лесные пожары уничтожили более 16,8 млн га леса. Экономический ущерб исчисляется миллиардами долларов.

Частота лесных пожаров и ущерб от них ставят вопросы об адекватном моделировании соответствующих рисков их возникновения, о прогнозировании развития чрезвычайной ситуации и разработке мер по снижению потерь. Построение модельных уравнений предполагает, что горение происходит на определенной площади в течение конкретного времени. Необходимо также рассчитать возможную длительность пожара, которая зависит от комплекса факторов, зачастую трудно определяемых [1].

Полуэмпирические модели позволяют подбирать и уточнять параметры для эффективного прогноза пожаров в лесных экосистемах. Такие формулы базируются на законах сохранения массы, энергии и движения. Они предполагают запись модельных уравнений в упрощенном виде, а соответствующие коэффициенты или эмпирические параметры можно получить в результате наблюдений или экспериментов [2]. Рассмотренные модели распространились в середине XX века и использовались в основном для прогноза динамики низовых пожаров. Обычно в них учитываются параметры горючести лесного материала, в том числе исходное состояние древостоя и рельеф местности.

Определяющими факторами возникновения и развития лесного пожара будут метеорологические условия, особенно ветер. Горючесть материала лесной подстилки или уклоны местности, учитываемые, например, в модели Ричарда Ротермела [1–3], имеют второстепенное значение. Цель данного исследования — уточнить математическую модель распространения лесных пожаров. Она позволит точнее прогнозировать развитие чрезвычайной ситуации и, соответственно, более оперативно и адекватно реагировать на нее. Своевременная реакция и принимаемые меры должны сократить потери, связанные с пожарами.

Материалы и методы. Исследование базируется на анализе трудов о нестационарности приземного слоя Д.Л. Лайхтмана, о строении пограничного слоя А.С. Гаврилова и др. [4, 5], о пятнистости лесных пожаров и вероятности их преобразований в интенсивные верховые П.М. Матвеева и др.

Авторы задействовали также литературные, аналитико-статистические, аналитико-графические методы, математическое моделирование.

Для данного исследования проанализированы проблемы математического моделирования при прогнозировании лесных пожаров. Отмечены практически непреодолимые сложности расчетов по наиболее опасным верховым пожарам [6–8], которые обусловлены неизвестными физическими характеристиками перераспределения тепла и количества движения воздуха — факторами, определяющими параметры пожара.

Итак, следует отметить, что в математических моделях не представлена трансформация пятнистых возгораний в интенсивный верховой пожар [9]. В 70-е годы XX века П.М. Матвеев установил, что пожар становится пятнистым, если интенсивности конвективных потоков хватает для поднятия и переноса горящих частиц. При этом времени их горения должно быть достаточно, чтобы поджечь удаленные от очага объекты: лесную подстилку, надпочвенный покров, древостой и пр.

В 1964 году Н.П. Курбатский предложил первую модель тепломассообмена. В ней площадь выгора оценивалась по скорости приземного воздуха, как и большинство моделей распространения огня. В 2018 году группа авторов предложила современную версию модели тепломассообмена для прогноза пятнистости возгораний, отметив сложности при составлении уравнений и не решив проблему до конца [9].

Как показано в [1–3], пятнистость свойственна любому верховому пожару при усилении ветра. Однако с точки зрения физики приземного слоя сильный приземный поток (ветер) будет способствовать возгоранию и распространению огня на первой стадии пожара. На второй стадии развиваются оба вида конвекции:

- внутренняя (порождаемая пожаром, собственная, тепловая, с неустойчивым приземным слоем воздуха);
- внешняя (создается внутримассовыми условиями, скорость приземного потока утрачивает значение и препятствует трансформации низового пожара в пятнистый, верховой).

Гаврилов А.С., Мханна А.И., Харченко Е.В. в статье «Верификация модели атмосферного пограничного слоя применительно к задачам прогноза загрязнения атмосферы от очагов лесных пожаров» подчеркивают необходимость учета доли турбулентного притока тепла в условиях нестационарного приземного слоя с развитой тепловой турбулентностью [4]. Установлено, что даже при весьма незначительном тепловом потоке, $q = 0,003 \text{ Вт/м}^2$ в приземных условиях, интенсивность турбулентного притока тепла существенно увеличивалась — за 35 минут с 0 до $+10,2^\circ\text{C}$.

Таким образом, очевидна роль конвекции, особенно тепловой внутренней [4, 5]. Этот фактор нужно учитывать при построении математических моделей трансформации пятнистых лесных пожаров в верховые.

Результаты исследования. Модель Р. Ротермела [1, 6] базируется на эмпирическом материале и позволяет результативно рассчитывать параметры низового лесного пожара (рис. 1).

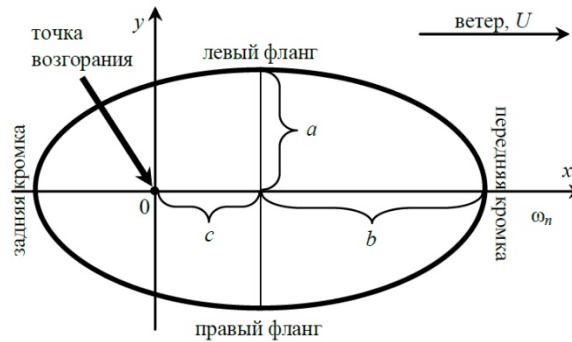


Рис. 1. Общепринятая эллиптическая форма контура низового лесного пожара

Для прогнозирования поведения лесного пожара вычисляются параметры эллипса: a , b и c (формулы 1–3). При этом центральной расчетной характеристикой модели будет скорость продвижения лесного пожара, ω_n (м/сек), определяемая по (4) [1].

$$a = \frac{b}{LB}, b = \frac{\omega_n}{2} + \frac{1+HB}{HB}, c = b - \frac{\omega_n}{HB}, \quad (1)$$

$$LB = 0,936 \exp(0,2566U) + 0,461 \exp(-0,1548U) - 0,397, \quad (2)$$

$$B = \frac{LB + \sqrt{LB^2 - 1}}{LB - \sqrt{LB^2 - 1}}, \quad (3)$$

$$\omega_n = \omega_0 (1 + k(U) + k(S)), \quad (4)$$

где a — отрезок эллипса (высота); b — отрезок эллипса (длина во фронтальной зоне огня); c — отрезок эллипса (длина выгора); LB — ширина отрезка эллипса b ; HB — высота отрезка эллипса b ; U — скорость потока (ветра), м/сек; ω_n — скорость продвижения лесного пожара, м/мин; ω_0 — плотность пласта горючих веществ, кг/м³; $k(U)$ — величина частичек вегетативной прогораемой материи, м²; $k(S)$ — скорость полного прогорания растительности, м/мин.

Авторы полагают, что данная модель неприменима для прогнозирования пятнистых и интенсивных верховых пожаров. Кроме того, она практически не учитывает метеорологические параметры за исключением скорости приземного потока (ветра) [7, 8]. В этой связи следует уточнить основное прогностическое уравнение (2), включив в него дополнительные параметры. Так, в 1967 году М.А. Софронов предложил при оценке скорости распространения низового пожара учитывать не только скорость ветра, но и относительную влажность воздуха с учетом ее суточных флуктуаций, а также уклон местности, шероховатость или вязкость поверхности [9–11].

Если верховой пожар эволюционировал из низового, скорость распространения огня нужно вычислять на двух уровнях: приповерхностном (0–1 м) и приземном (1–2 м) [12]. В приповерхностном слое важнее учесть характеристики горящего вещества, включая его плотность и количество (см. формулу 4). В приземном слое (второй уровень модели) более важными будут такие параметры, как температура и влажность воздуха, вертикальные и горизонтальные скорости потока:

$$\omega_{n1} = \omega_n \cdot \left| \frac{t_0}{t_1} \right| \cdot \left| \frac{v_0}{v_g} \right| \cdot \left| \frac{f_0}{f_1} \right|, \quad (5)$$

где ω_{n1} — скорость продвижения огня в приземном слое, м/мин; ω_n — скорость продвижения пожара в приповерхностном слое, м/мин, из формулы (4); t_0 — температура воздуха в приповерхностном слое, °C; t_1 — температура воздуха в приземном слое на высоте 1–2 м, °C; v_0 — скорость потока воздуха в приповерхностном слое, м/сек; v_g — горизонтальная составляющая скорости потока воздуха, м/сек; f_0 — относительная влажность воздуха в приповерхностном слое воздуха, %; f_1 — относительная влажность воздуха в приземном слое на высоте 1–2 м.

При пятнистом и интенсивном верховом пожаре развивается внутренняя (термическая) и внешняя (механическая) конвекция. Турбулентность «разбрасывает» частицы вверх и в стороны от очага, что может существенно изменить параметры a , b и c .

Авторы отмечают, что в приповерхностном слое (0–1 м) бессмысленно учитывать турбулентность, так как она гасится поверхностным слоем лесной подстилки или почвы. Для учета турбулентности приземных слоев воздуха следует руководствоваться представлениями о нестационарности и физических закономерностях приземного слоя воздуха:

$$\frac{du}{dt} = \frac{d}{dz} k \frac{du}{dz}, \quad (6)$$

$$\frac{d\Theta}{dt} = -\frac{d}{dz} k \frac{d\Theta}{dz}, \quad (7)$$

$$\frac{db}{dt} = k \left(\frac{du}{dt} \right)^2 - k \frac{g}{T} \frac{d\Theta}{dz} - \frac{cb^2}{k} + \alpha_b \frac{d}{dz} k \frac{db}{dz}, \quad (8)$$

$$k = l\sqrt{b}, \quad (9)$$

$$l = -2\kappa C \frac{1}{4} + \frac{\left(\frac{du}{dz} \right)^2 - \frac{g}{T} \frac{d\Theta}{dz}}{\frac{d}{dz} \left[\left(\frac{du}{dz} \right)^2 - \frac{g}{T} \frac{d\Theta}{dz} \right]}, \quad (10)$$

где u — скорость потока воздуха, м/сек; t — температура воздуха, °С; z — высота, м; Θ — приток тепла, Дж/с м²·кг; b — энергия турбулентности, Дж/кг; g — ускорение свободного падения, м/сек²; l — масштаб турбулентности, м; k — коэффициент турбулентности, м/сек; c — постоянная Д.Л. Лайхмана (~0,046); α_b — постоянная Д.Л. Лайхмана, рассчитанная по анализу размерностей (0,73); κ — постоянная Кармана, вычисленная для решения данной задачи (~0,397).

Исходя из представлений Д.Л. Лайхмана о физических закономерностях нестационарного приземного слоя воздуха, можно сделать вывод о роли турбулентных движений в распределении тепла, энергии, частиц воздуха. В случае диффузии вещества и энергии при нагревании и трансформации поверхностного слоя почвы в условиях пожара [13–15] моделирование основывается на теории градиентного переноса. Коэффициент турбулентной диффузии — k . Значение диффузионного переноса в вертикальной плоскости — k_z . Горизонтальные составляющие коэффициента турбулентности будут пренебрежимо малы из-за шероховатости поверхности и действия силы трения. Для упрощения модельного уравнения следует воспользоваться уравнением М.И. Будыко, рассчитывающим коэффициент вертикальной диффузии k_z на единичном уровне:

$$k_z = k_1 p \frac{z}{z_1} \sqrt{1 - \overline{Ri}}, \quad (11)$$

где k_z — коэффициент вертикальной диффузии, м/сек; $k_1 p$ — значение k_z на единичной высоте z_1 и в равновесных условиях, на высоте 1 м составляет 0,1–0,2 м/сек; $\overline{Ri}$ — среднее по пограничному слою число Ричардсона, безразмерный показатель:

$$\overline{Ri} = \frac{g \frac{dT}{dz}}{T_a \left(\frac{dT}{dz} \right)^2}, \quad (12)$$

где T — температура воздуха, °С; T_a — температура в абсолютной шкале, К; g — ускорение свободного падения (9,8 м/сек²).

Авторы предлагают внести дополнения в исходную формулу (2) модели Р. Ротермела для уточнения развития пожара от низового к интенсивному верховому (второй слой модели), рассчитывая скорость продвижения огня ω_{n1} в приземном слое по формуле (5). При этом уравнение (2) дополняется выражением для расчета коэффициента турбулентности k_z и заменяется им безразмерный показатель 0,397, поскольку по смыслу последний выполняет роль параметра, снижающего ширину отрезка эллипса a . По мнению авторов данной работы, учет интенсивной конвекции и последующей турбулентности способен скорректировать ширину отрезка a с большей точностью по отношению к реальным условиям. Тогда формулу (2) можно представить:

$$LB = 0,936 \exp(0,2566U) + 0,461 \exp(-0,1548U) - k_z. \quad (13)$$

С учетом выражений (11) и (12) получим итоговое:

$$LB = 0,936 \exp(0,2566U) + 0,461 \exp(-0,1548U) - k_1 p \frac{z}{z_1} \sqrt{1 - \frac{g \frac{dT}{dz}}{T_a \left(\frac{dT}{dz} \right)^2}}. \quad (14)$$

В таблице 1 представлены результаты апробации уравнения (14) и моделирования характерных случаев развития конвективной турбулентности.

Таблица 1

Некоторые результаты моделирования параметров пожаров с учетом и без учета турбулентности [16] для нестационарного приземного слоя

№	Характеристика	U , м/сек	k_z , м/сек	LB	HB	a	b	c
1	Слабый	4,000	–	2,470	22,521	0,521	1,290	1,268
2	Слабый	4,000	0,500	2,370	19,640	0,552	1,301	1,276
3	Умеренный	8,000	–	7,001	139,001	0,220	1,507	1,500
4	Умеренный	8,000	2,000	5,400	107,002	0,281	1,509	1,500
5	Сильный	12,000	–	11,610	579,501	0,170	2,001	1,997
6	Сильный	12,000	5,000	7,010	199,290	0,290	2,005	1,995

Обсуждение и заключение. Итак, рассмотрена модель горения в условиях нестационарного приземного слоя. Значения отрезка a эллиптического контура пожара с учетом уточненного выражения (14) сравнивались с классической формулой Р. Ротермела [16]. Анализ результатов моделирования с коэффициентом турбулентности (таблица 1) позволил выявить наибольшие отклонения указанных значений. При этом не обнаружены существенные различия параметров эллипса b и c , что может подтвердить целесообразность предложенного уточнения.

Адекватность полученных значений отрезка a эллипса определена по критерию Стьюдента (двухвыборочный t -критерий). Для этого сравнивались вычисленные значения отрезка эллипса a в полуэмпирической модели Р. Ротермела и в предложенном авторами уравнении (14). Результаты проверки приводятся в таблице 2. Вычисленное значение t -критерия Стьюдента намного меньше критического (табличного): $0,609 < 2,776$. Это доказывает статистическую сходимость результатов расчетов в уточненной модели, представленной выражением (14).

Таблица 2

Результаты сравнения уточненного варианта модели, содержащего параметр турбулентности, с классическим уравнением модели Р. Ротермела

№	Среднее значение	Дисперсия	Степени свободы	Объединенная дисперсия	Значение t -критерия	
					вычисленное	критическое*
1	0,374	0,016	4	0,02	0,609	2,776
2	0,304	0,024	4			

*При достоверности 95 %.

Примечание № 1 соответствует расчетам с применением уравнения (14), учитывающего турбулентность. № 2 соответствует расчетам классического выражения модели Р. Ротермела без учета турбулентности.

Таким образом, введение выражения (14) обосновано для нестационарного приземного слоя (второй слой модели) и позволяет существенно корректировать размеры отрезка a эллипса с учетом внутренних и внешних вертикальных конвективных потоков, которые формируют турбулентность приземного слоя и трансформируют низовой лесной пожар в интенсивный верховой.

Скорректированная модель дает возможность более эффективно рассчитывать параметры пятнистых и интенсивных верховых пожаров в пределах лесных экосистем. Перспективны дальнейшие уточнения уравнений полуэмпирических моделей лесных пожаров. Следует продолжать исследования в этом направлении.

Список литературы / References

1. Аношкин Р.К. Анализ математических моделей, используемых для прогнозирования низовых лесных пожаров. *Технологии гражданской безопасности*. 2020;17(2(64)):58–60. <https://doi.org/10.54234/CST.19968493.2020.17.2.64.10.58>
2. Аношкин Р.К. Analysis of Mathematical Models Used for Forest Ground Fires Forecasting. *Tekhnologii Grazhdanskoi Bezopasnosti*. 2020;17(2(64)):58–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.54234/CST.19968493.2020.17.2.64.10.58>
3. Кулешов А.А., Мышечская Е.Е. Математическое моделирование лесных пожаров с применением многопроцессорных ЭВМ. *Математическое моделирование*. 2008;20(11):28–34.
4. Kuleshov AA, Myshetskaya EE. Mathematical Modeling of Forest Fires Using Supercomputers. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2008;20(11):28–34. (In Russ.)

3. Гришин А.М., Пугачева П.В. Анализ действия лесных и степных пожаров на города и поселки и новая детерминированно-вероятностная модель прогноза пожарной опасности в населенных пунктах. *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2009;(3(7)):99–108. URL: <https://www.mathnet.ru/rus/vtgu/y2009/i3/p99> (дата обращения: 01.09.2024).

Grishin AM, Pugacheva PV. Analysis of Impact of Forest and Steppe Fires on Cities Andvillages and the New Determinate and Probability Model for Prediction of Firedangerous in Villages and Cities. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2009;(3(7)):99–108. (In Russ.) URL: <https://www.mathnet.ru/rus/vtgu/y2009/i3/p99> (accessed: 01.09.2024).

4. Гаврилов А.С., Мханна А.И.Н., Харченко Е.В. Верификация модели атмосферного пограничного слоя применительно к задачам прогноза загрязнения атмосферы от очагов лесных пожаров. *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2013;(32):119–129. URL: <https://www.rshu.ru/university/notes/archive/issue32/uz32-119-129.pdf> (дата обращения: 01.09.2024).

Gavrilov AS, Mhanna A, Kharchenko EV. Verification of the Model of Atmospheric Boundary Layer Applied to the Problem Prediction of Air Pollution from Forest Fires. *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*. 2013;(32):119–129. (In Russ.) URL: <https://www.rshu.ru/university/notes/archive/issue32/uz32-119-129.pdf> (accessed: 01.09.2024).

5. Andreeva ES. The Possibilities of Using the Minimax Method to Diagnose the State of the Atmosphere. *Journal of Atmospheric Science Research*. 2022;6(2):42–49. <https://doi.org/10.30564/jasr.v6i2.5519>

6. Abannikov VN, Seroukhova OS, Mkhanna AIN, Podgaiskii EV. Assessing the Impact of Agrometeorological Conditions on the Yield of Grain and Leguminous Crops in European Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;1010:012033. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/1010/1/012033>

7. Denisov OV, Pleshko MS, Ponomareva IA, Merenyashev VE. Scale Factor Management in the Studies of Affine Models of Shockproof Garment Elements. *E3S Web of Conferences*. 2018;33:03068. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183303068>

8. Пузач С.В. Ле Ань Туан, Нгуен Тхань Хай. Пожарная опасность пятнистого возгорания при верховом лесном пожаре для объектов энергетики. *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение и ликвидация*. 2018;(2):64–70. <https://doi.org/10.25257/FE.2018.2.64-70>

Puzach S, Le TA, Nguyen TH. Fire Hazard from Spotting Ignition at Crown Fires for Power Engineering Facilities. *Fires and Emergencies: Prevention, Elimination*. 2018;(2):64–70. (In Russ.) <https://doi.org/10.25257/FE.2018.2.64-70>

9. Кулешов А.А., Мышецкая Е.Е., Якуш С.Е. Моделирование распространения лесных пожаров на основе модифицированной двумерной модели. *Математическое моделирование*. 2016;28(12):20–32.

Kuleshov AA, Myshetskaya EE, Yakush SE. Numerical Simulation of Forest Fire Spread Based on Modified 2D Model. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2016;28(12):20–32. (In Russ.)

10. Denisov OV, Bulygin YI, Ponomarev AE, Ponomareva IA, Lebedeva VV. Innovative Solutions Shockproof Protection in Occupations Associated with an Increased Risk of Injury. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017;50:012044. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/50/1/012044>

11. Denisov O, Andreeva E. An Innovative Approach to the Elimination of Combustion Foci at MSW Landfills (on the Example of the Rostov Region). *E3S Web of Conferences*. 2021;273:04006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127304006>

12. Карлин Л.Н., Ванкевич Р.Е., Тумановская С.М., Андреева Е.С., Ефимова Ю.В., Хаймина О.В. и др. *Гидрометеорологические риски*. Санкт-Петербург: Российский государственный гидрометеорологический университет; 2008. 282 с.

Karlin LN, Vankevich RE, Tumanovskaya SM, Andreeva ES, Efimova YuV, Khaimina OV, et al. *Hydrometeorological Risks*. Saint Petersburg: Russian State Hydrometeorological University; 2008. 282 p. (In Russ.)

13. Мартынов А.В., Греков В.В., Попова О.В. Комплект средств измерений для экспресс-анализа интумесцентной огнезащиты на строительном объекте. *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2021;(3):61–68. <https://doi.org/10.25257/FE.2021.3.61-68>

Martynov A, Grekov V, Popova O. Measuring Tool Kit for Express Analysis of Intumescent Fire Protection at a Construction Facility. *Fires and Emergencies: Prevention, Elimination*. 2021;(3):61–68. (In Russ.) <https://doi.org/10.25257/FE.2021.3.61-68>

14. Bogdanova I, Dymnikova O, Loskutnikova I. Analysis of the Noise Load from the Manufacturing Enterprise on the Territory of Residential Buildings Based on Complex Mathematical Model. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;1001:012119. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012119>

15. Adamyan VL, Sergeeva GA, Seferyan LA, Gorlova NYu. Development of Technological Measures to Ensure the Safety of Production Facilities in Petrochemical Industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1083:012050. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1083/1/012050>

16. Баровик Д.В., Таранчук В.Б. Алгоритмические основы построения компьютерной модели прогноза распространения лесных пожаров. *Вестник Полоцкого государственного университета. Фундаментальные науки*. 2011;12:51–56.

Barovik DV, Taranchuk VB. Algorithmic Foundations of Constructing a Computer Model for Predicting the Spread of Forest Fires. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C. Fundamental'nye nauki*. 2011;12:51–56. (In Russ.)

Об авторах:

Елена Сергеевна Андреева, доктор географических наук, доцент, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности и защиты окружающей среды Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), meteo0717@yandex.ru

Галина Александровна Сергеева, кандидат географических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и защиты окружающей среды Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), sergeeva_ga@mail.ru

Ирина Виссарионовна Богданова, кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и защиты окружающей среды Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), bogirka@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Е.С. Андреева: разработка концепции, научное руководство.

Г.А. Сергеева: написание черновика рукописи.

И.В. Богданова: написание черновика рукописи, визуализация.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Elena S. Andreeva, Dr. Sci. (Geogr.), Associate Professor, Professor of the Department of Life Safety and Environmental Protection, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), meteo0717@yandex.ru

Galina A. Sergeeva, Cand. Sci. (Geogr.), Associate Professor of the Department of Life Safety and Environmental Protection, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), sergeeva_ga@mail.ru

Irina V. Bogdanova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Life Safety and Environmental Protection, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), bogirka@gmail.com

Claimed Contributorship:

ES Andreeva: concept development, academic advising.

GA Sergeeva: writing a draft of the manuscript.

IV Bogdanova: writing a draft of a manuscript, visualization.

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

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

Поступила в редакцию / Received 10.11.2024

Поступила после рецензирования / Revised 23.11.2024

Принята к публикации / Accepted 12.12.2024

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК: 536.23

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-22-31>

Результаты исследования тепломассопереноса в условиях слабой аэродинамической связи при пульсирующем режиме вентиляции

А.Э. Филин , В.А. Филина , С.В. Тертычная , И.Ю. Курносов ,
И.С. Колбина , Д.Э. Пронина 

Национальный исследовательский технологический университет МИСИС, г. Москва,
Российская Федерация

✉ aleks_filin@bk.ru

EDN: CMMJGA

Аннотация

Введение. Проблема тепловыделения в металлургии актуальна из-за возможных опасностей для персонала и окружающей среды. Действительный контроль за тепловыми процессами и управление ими требуют дополнительных мероприятий и могут предотвратить пожары, взрывы и травматизм в целом. Эффективное управление тепловыми процессами — один из ключевых факторов безопасности и надежности металлургического оборудования. Высокие температуры свойственны металлургии, но контроль за ними необходим для успешного выполнения процессов плавки и обработки стали. Применяемые способы контроля тепломассопереносом (азрация, общеобменная и местная вентиляция) не всегда позволяют снизить тепловую нагрузку до требуемого значения. Выбор режима пульсирующей вентиляции для повышения эффективности управления тепломассопереносом обусловлен двумя основными причинами: низкие скорости движения воздуха, которые свойственны крупным цехам металлургического производства, и большое количество труднодоступных ниш с тепловыделяющим оборудованием в них. Целью данного исследования в связи с этим является изучение процессов тепломассопереноса в зонах со слабой аэродинамической связью при пульсирующем режиме вентиляции.

Материалы и методы. Для получения статистических данных был использован метод физического моделирования. Процесс тепломассопереноса оценивался на основании изменения температуры с течением времени в различных точках модели ниши при разных режимах вентиляции (стационарном и пульсирующем). Для обработки полученных результатов измерений применялся метод системного анализа.

Результаты исследования. Было установлено положительное влияние пульсирующего движения воздуха на тепломассоперенос в плохо проветриваемой импровизированной нише внутри лабораторной установки. Определена степень эффективности влияния пульсирующей вентиляции на тепломассоперенос. Установлено, что при использовании метода пульсирующей вентиляции температура в центральной части ниши повышалась медленнее в 3,8 раза, чем при общеобменной принудительной вентиляции.

Обсуждение и заключение. Данные, полученные в смоделированных условиях вышеуказанного вида производства, позволяют разработать методику борьбы с отрицательным воздействием теплового излучения, что дает возможность повысить безопасность при отводе излишнего тепла в условиях слабой аэродинамики участков цехов горно-металлургических производств.

Ключевые слова: результаты эксперимента, тепломассоперенос, пульсирующая вентиляция, тепло, температура, слабая аэродинамическая связь, движение воздуха

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность редакционной коллегии журнала и опытному рецензенту за их глубокий анализ и важные рекомендации, которые позволили значительно улучшить статью по проблемам промышленной безопасности. Особую благодарность — команде и руководителю кафедры «Техносферная безопасность» НИТУ МИСИС за их неоценимую помощь в создании лаборатории и существенный вклад в успешное выполнение научных исследований.

Для цитирования. Филин А.Э., Филина В.А., Тертычная С.В., Курносов И.Ю., Колбина И.С., Пронина Д.Э. Результаты исследования тепломассопереноса в условиях слабой аэродинамической связи при пульсирующем режиме вентиляции. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(1):22–31. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-22-31>

Original Empirical Research

Research Results of Heat and Mass Transfer in Conditions of Weak Aerodynamic Coupling with Pulsating Ventilation Mode

Aleksandr E. Filin , Violetta A. Filina , Svetlana V. Tertychnaya , Ilya Yu. Kurnosov ,
Irina S. Kolbina , Darya E. Pronina 

National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

 aleks_filin@bk.ru

Abstract

Introduction. The issue of heat dissipation in metallurgy is significant due to potential hazards to personnel and the environment. Effective control and management of thermal processes require additional measures and can prevent fires, explosions, and personnel injuries as well as it is a key factor in ensuring the safety and reliability of metallurgical equipment. Metallurgical processes often involve high temperatures, but control over them is necessary for successful steel melting and processing. Current methods of heat transfer control (aeration, general exchange and local ventilation) do not always effectively reduce heat loads to acceptable levels. The choice of a pulsating ventilation mode for increasing the efficiency of heat transfer control is due to two main reasons: low air flow rates in large metallurgical production facilities, and the presence of numerous hard-to-reach areas with heat-generating equipment. The aim of this research is to investigate heat and mass transfer processes in areas with weak aerodynamic coupling with pulsating ventilation mode.

Materials and Methods. To achieve this goal, a method of physical modeling was employed to collect statistical data. Heat and mass transfer were evaluated by measuring temperature changes over time at various points in the model niche under different ventilation conditions (stationary and pulsating). System analysis was then applied to process the collected data.

Research Results. It was found that pulsating air movement had a positive effect on heat and mass transfer in poorly ventilated spaces inside the laboratory setup. The degree of efficiency of this effect was determined, and it was found that the use of pulsating ventilation slowed down the increase in temperature in the center of the space by 3.8 times compared to the use of general forced ventilation.

Discussion and Conclusion. The data obtained under the simulated conditions of the aforementioned type of production provide a foundation for developing a more specific methodology to counteract the negative effects of heat radiation. This methodology could significantly enhance safety by improving the removal of excess heat in low-aerodynamic areas of mining and metallurgical workshops.

Keywords: experimental results, heat and mass transfer, pulsating ventilation, heat, temperature, weak aerodynamic coupling, air movement

Acknowledgments. The authors would like to express their sincere gratitude to the Editorial board and the reviewers for their thorough analysis and for the specified comments that significantly improved the quality of the article in the field of industrial safety. The authors would like to extend their thanks to the team and the head of the Technosphere Safety Department at NUST MISIS for their invaluable assistance in setting up the laboratory and their significant contribution to the successful completion of the research.

For citation. Filin AE, Filina VA, Tertychnaya SV, Kurnosov IYu, Kolbina IS, Pronina DE. Research Results of Heat and Mass Transfer in Conditions of Weak Aerodynamic Coupling with Pulsating Ventilation Mode. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(1):22–31. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-22-31>

Введение. Тепловыделение — неотъемлемая часть металлургического производства. Избыточное тепловыделение вызывает перегрев оборудования, сопровождающийся последующими авариями, приводящими к выходу из строя производственного оборудования, травмам работников и большим финансовым потерям. Борьба с избыточным теплом в металлургии осуществляется следующими методами:

1. Прямое охлаждение: охлаждение металла в контакте с теплоотводными стержнями.
2. Охлаждение водой: использование воды для охлаждения металла.

3. Газовое охлаждение: использование газов для охлаждения металла, что гарантирует высокую интенсивность снижения температуры [1].

4. Криогенное охлаждение: применение сверхохлажденных жидких газов для термической обработки металлических материалов [2].

5. Индукционное охлаждение: создание внутреннего охлаждения с применением переменного магнитного поля.

Для металлургических цехов характерно значительное выделение тепла на различных этапах производства металла, таких как нагрев, плавление, формовка и литье [3]. Помимо этого, высокие температуры сопровождаются выбросами пыли и газов, что приводит к повышенной концентрации вредных веществ в воздухе. Это усложняет условия труда работников и требует использования специальной защиты, а также соблюдения требований охраны труда и промышленной безопасности [4]. При работе в металлургических цехах существует также риск возникновения пожаров, взрывов, получения серьезных термических травм [5].

Недостаточное охлаждение технологических установок, таких как зоны с большим количеством силовых кабелей или трансформаторные подстанции местного значения, часто становится причиной избыточного тепловыделения и накопления тепла, что может привести к отказам оборудования [6]. Поэтому очень важно внимательно наблюдать за температурным режимом на каждом этапе технологического процесса, тем самым обеспечивая стабильное и корректное температурное состояние производственных установок и электрооборудования [7]. Необходимо регулярно производить техническое обслуживание и ремонт оборудования, а также вести мониторинг уровня теплового излучения в цехах, чтобы своевременно реагировать на возможные проблемы и разрабатывать меры для их устранения и недопущения [8]. Несмотря на все имеющиеся методы охлаждения аварийные и нестандартные ситуации и травматизм¹ в металлургическом производстве остаются насущной проблемой, хотя в последние десять лет наблюдается динамика их снижения [9].

Анализ существующих статистических данных по аварийности и травматизму за последние десять лет в горно-металлургической отрасли, а также оценка применяемых методов охлаждения показывают необходимость разработки более продуктивных мер для снижения теплового излучения и обеспечения бесперебойной работы оборудования [10]. В связи с этим авторами был разработан и смоделирован процесс тепломассопереноса с использованием метода пульсирующего движения воздуха, который достаточно хорошо повышает теплообмен при слабой аэродинамической связи [11]. Целью данного исследования является изучение влияния пульсирующего режима движения воздуха на температурные показатели воздушной среды в условиях малых скоростей движения и затрудненной аэрологической проницаемости при наличии общей вентиляции в помещении. В статье изложены результаты физического моделирования тепломассопереноса в условиях слабой аэродинамики.

Материалы и методы. Эксперименты по теплопереносу проводились на базе физической модели (рис. 1) со следующими характеристиками [12]:

- объем вентилируемого пространства — 1 м³;
- относительная влажность воздуха — от 26 до 28 %;
- температура воздуха — 21–23 °C [13].

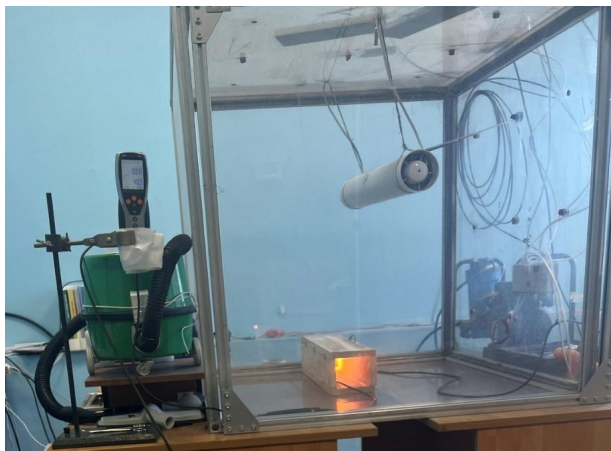


Рис. 1. Внешний вид лабораторной установки для физического моделирования теплопереноса при пульсирующем режиме вентиляции

¹ Травматизм. Красные цифры статистики. Горно-металлургический профсоюз России. URL: <https://www.gmpr.ru/> (дата обращения: 20.11.2024).

На рис. 1 изображена конструкция, имитирующая вентилируемое помещение, в виде куба с длиной сторон в 1 метр. В центральной части данного объема размещено устройство, «Пульсатор» (рис. 2 а, 5). Ниже приведены его характеристики:

- длина устройства «Пульсатор» — 0,57 м;
- диаметр — 0,1 м;
- скорость вращения вентилятора в установке «Пульсатор» — около 180 об/мин;
- расход воздуха в устройстве «Пульсатор» — 0,007 м³/с;
- скорость потока общеобменной вентиляции — 2,2 м/с [14].

При планировании эксперимента были установлены минимальные и достаточные требования к его проведению [15]. Точность измерений:

- время — в минутах;
- температура — 0,1 °С;
- расстояние — 1 см;
- импульс давления — 1 Гц.

Схема лабораторной установки показана на рис. 2. Генератор воздушного потока (рис. 2 а, 1) общеобменной вентиляции, имитирующий процесс искусственной вентиляции в помещении, размещен с левой стороны внизу лабораторной модели (в середине). Расстояние по высоте от основания лабораторной установки — 7 см. Выходное отверстие ниши (рис. 2 а, 2), имитирующей зону затрудненной аэрологической проницаемости, размещено на основании лабораторной установки в центре, а сама конструкция ниши упирается в заднюю стенку куба. Размеры ниши имеют следующие параметры:

- высота — 0,1 м;
- длина — 0,5 м;
- ширина проема — 0,12 м;
- толщина стенок — 0,012 м;
- материал стенок — сосна.

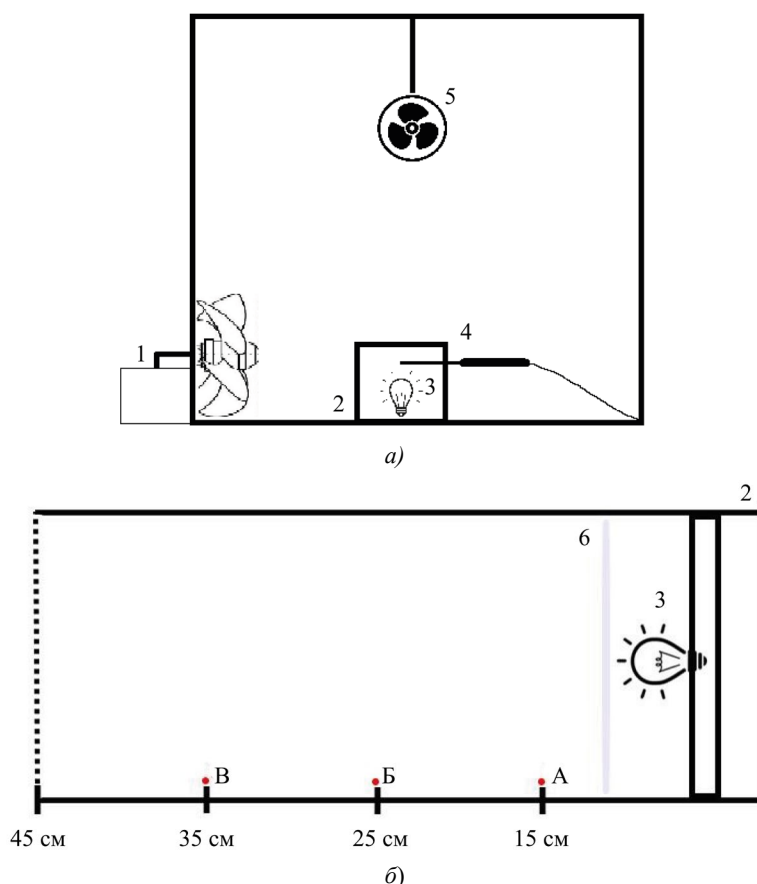


Рис. 2. Схема лабораторной установки для исследования процессов тепломассопереноса: а — общий вид лабораторного стенда; б — места расположения датчика, измеряющего температуру, с указанием расстояния от источника тепла;

1 — вентилятор; 2 — ниша, имитирующая зону затрудненной аэрологической проницаемости; 3 — источник тепловыделения; 4 — датчик температуры и влажности; 5 — устройство «Пульсатор»; 6 — экранирующая пластина

В дальней от входа части ниши на расстоянии 0,45 м размещен источник тепла (рис. 2 б, 3). Источником тепла являлась лампа накаливания мощностью 25 Вт. При экспериментах изучались два вида теплопереноса: радиационное и конвективное. Схема размещения оборудования при проведении эксперимента показана на рис. 2.

Эксперимент по изучению процессов тепломассопереноса производился с фиксированием значений температуры датчиком, располагающимся на полу ниши, на расстоянии 0,15, 0,25 и 0,35 м (рис. 2 б). Буквы, выделенные красным, характеризуют положение датчика температуры при проведении эксперимента. Эксперимент проводился как при стационарном (без применения пульсатора) воздухообмене, так и с применением режима пульсирующей вентиляции. На каждом отрезке было зафиксировано 70 значений температуры в течение 60 минут. В соответствии с программой эксперимента, как было сказано ранее, ниша размещалась на основании лабораторной установки, датчик, измеряющий температуру, размещался в точках измерения А, Б и В (рис. 2 б). Измерения производились в нижней части ниши (у пола).

Второй этап изысканий по оценке влияния пульсирующего режима движения воздуха заключался в применении экрана, который рассеивал прямую тепловую радиацию. Данный экран был расположен между источниками тепла и точками измерения температуры. Экран был установлен стационарно в одном месте при всех измерениях. Размеры экрана — 0,1 х 0,1 м. Материал экрана — белая пластмасса толщиной 0,001 м. Периодически в процессе нагрева включался «Пульсатор», например, на 18-й минуте эксперимента. Было отмечено, что работа «Пульсатора» приводила к уменьшению роста температуры в нише в каждой точке измерений. Измерения выполнялись на основании той же методики.

В целом было установлено, что на момент включения «Пульсатора» рост температуры в нише был в 1,5 раза меньше, чем при выключенном устройстве. В дальнейшем для масштабирования процесса турбулентного теплопереноса в натуральных условиях будут использоваться критерии подобия.

Результаты исследования. На основе проведенных экспериментов были построены графики зависимости изменения температуры от времени. На рис. 3 представлены результаты этих измерений. Значения абсолютной и относительной погрешностей составили 4,45 °С и 8 % соответственно. График с синей линией демонстрирует изменения температуры при использовании экрана, а график с зеленой линией отображает изменения температуры (в интервале с 18-й по 30-ю минуту данного этапа эксперимента) при включенном режиме пульсирующего движения воздуха с установленным пластиковым экраном.

После проведения экспериментов были рассчитаны относительные приращения температуры в каждой точке проведения измерений стационарного (на графике отмечен синим цветом) и пульсирующего режимов для их сравнения. После расчета приращений при разных режимах были получены зависимости. На рис. 4 приведен график зависимости коэффициента приращения температуры от времени с применением экрана.

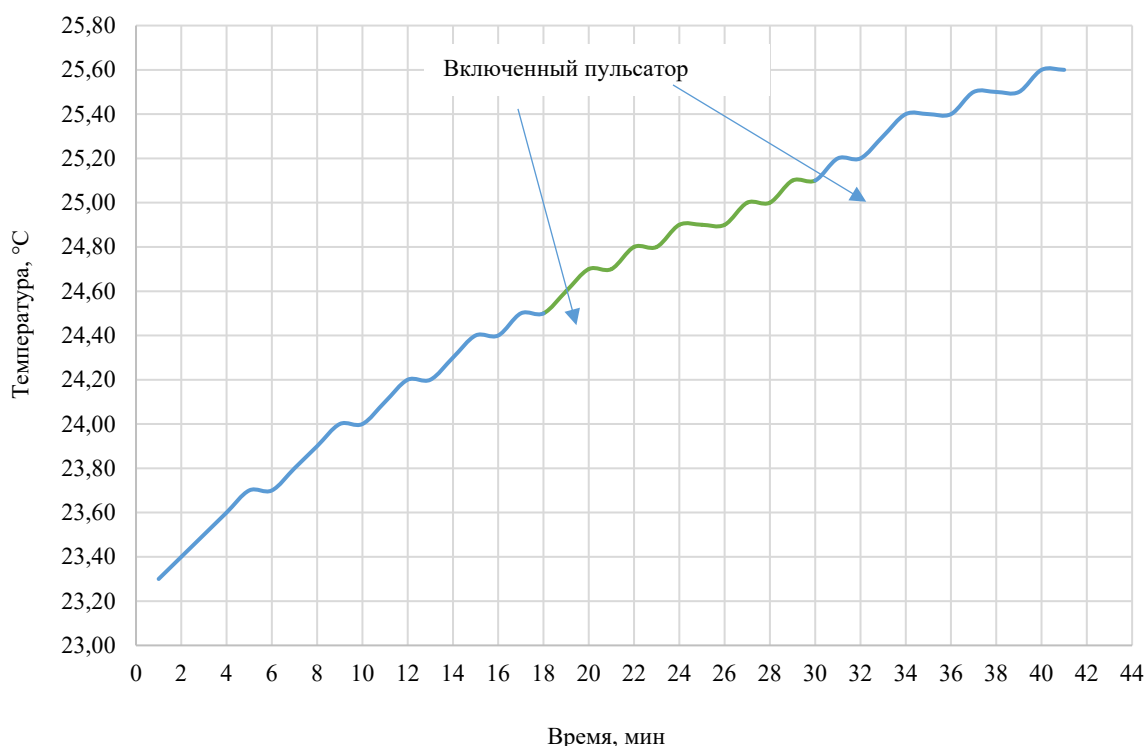


Рис. 3. График зависимости температуры от времени теплового излучения на расстоянии 35 см от источника излучения с установленным экраном

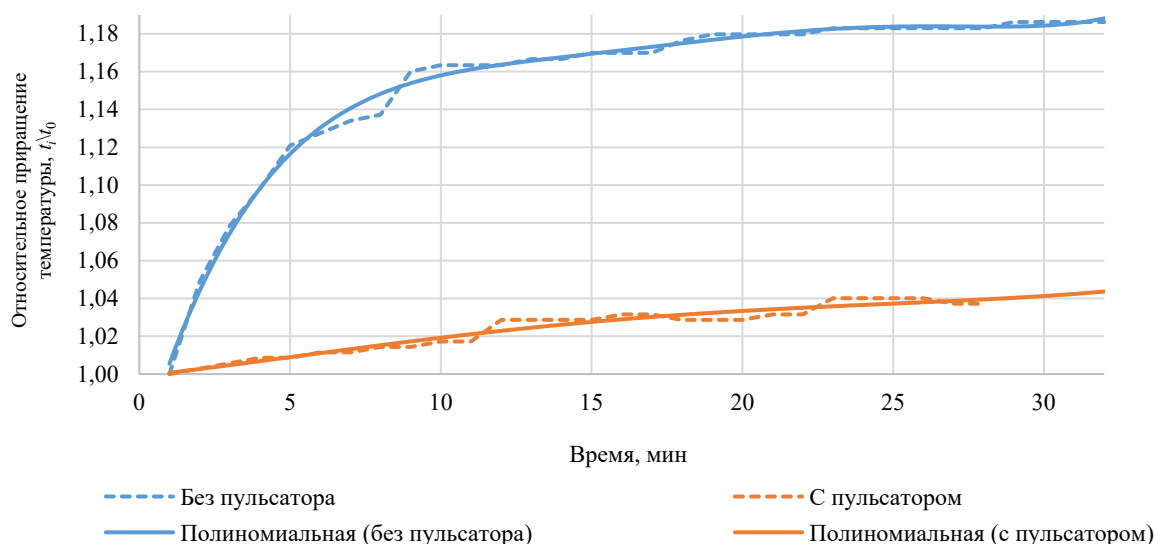


Рис. 4. Графики зависимости относительного приращения температуры от времени на расстоянии 35 см от источника излучения с применением экрана

Далее данные приращения были распределены по режимам и временным диапазонам. На рис. 5 представлены графики зависимости усредненных значений относительного приращения температуры (t/V_0) от времени при стационарном и пульсирующем режимах для всего объема ниши.

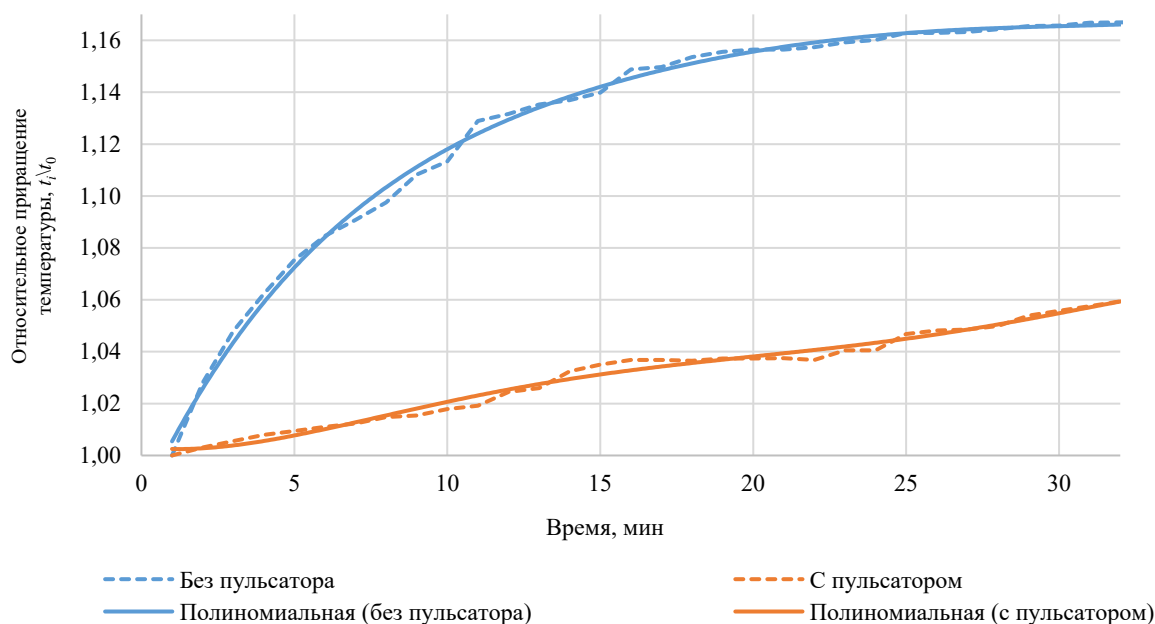


Рис. 5. Графики зависимости усредненных значений относительного приращения температуры от времени при стационарном и пульсирующем режимах

Согласно данным этого графика, температура в первые 15 мин. проведения эксперимента повышалась менее интенсивно с применением метода пульсирующей вентиляции и имела стабильный незначительный рост. В условиях стационарного режима исследуемого процесса отмечалась максимальная интенсивность роста температуры.

Сравнение изменений температуры в интервалах с 1 по 15 мин. и с 16 по 32 мин. показывает, что в течение первого интервала эффективность пульсирующего режима рост температуры ниже (рис. 6). Далее характеристики имели одинаковые значения (рис. 7).

На рис. 8 представлены значения угловых коэффициентов, показывающих степень эффективности пульсирующего режима в сравнении со стационарным, на разных временных интервалах. В интервале с 1 по 15 мин. угловой коэффициент выше у стационарного режима в 3,8 раза, по сравнению с пульсирующим, что свидетельствует о большей интенсивности тепломассопереноса. В следующем интервале (16–32 мин.) данный эффект теряется.

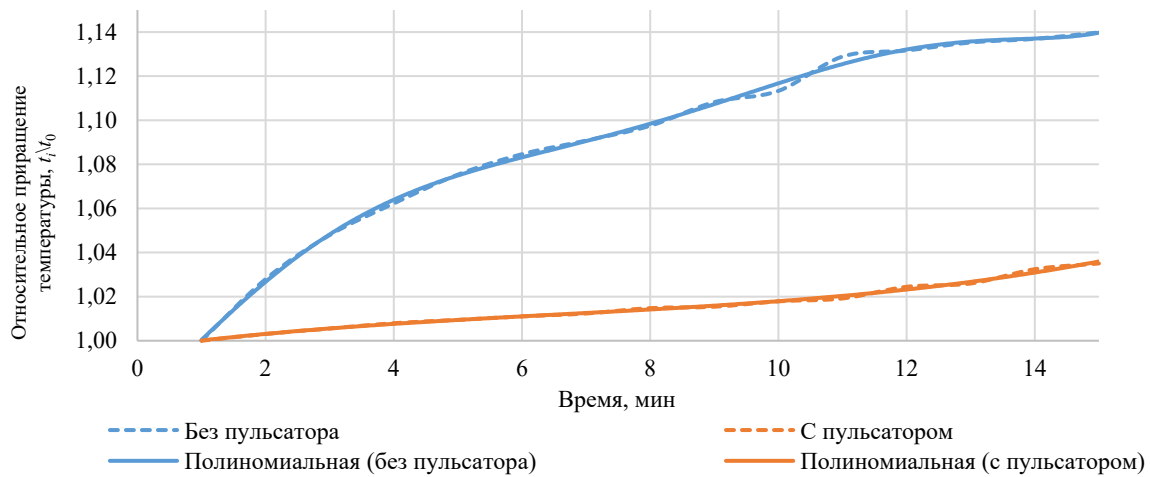


Рис. 6. Графики зависимости усредненных значений относительного приращения температуры от времени при стационарном и пульсирующем режимах (временной диапазон — 1–15 мин.)

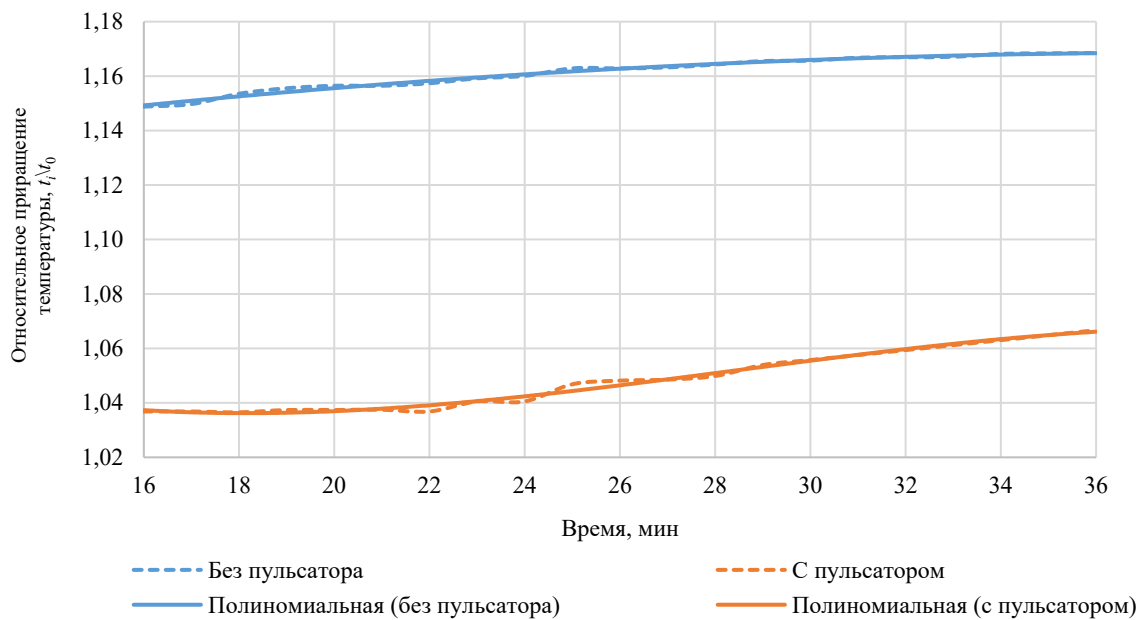


Рис. 7. Графики зависимости усредненных значений относительного приращения температуры от времени при стационарном и пульсирующем режимах (временной диапазон — 16–32 мин.)

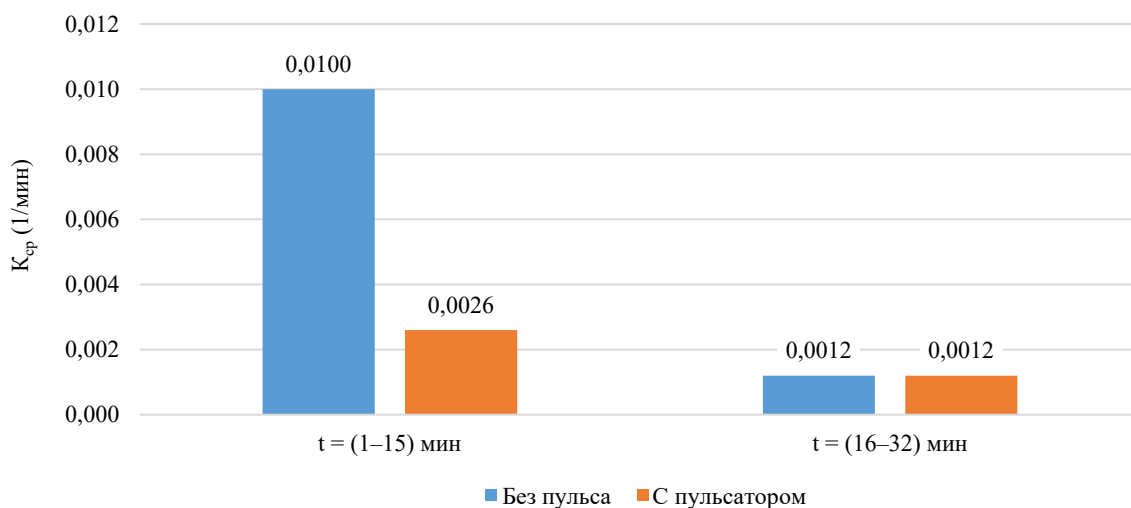


Рис. 8. Значения угловых коэффициентов на разных временных интервалах

Обсуждение и заключение. Полученные зависимости относительного прироста температуры при работе пульсатора и без него от времени позволили наглядно сравнить процессы роста температуры и получить значения угловых коэффициентов при этих двух режимах. Коэффициенты показывают: пульсирующий режим позволяет снижать рост температуры в 3,8 раза в первые 15 мин. на всех измеряемых точках ниши, что доказывает эффективность влияния предлагаемого метода. В последующий временной интервал во всех случаях была зафиксирована стабилизация температурных показателей, температура в нише без пульсатора и с включением пульсатора увеличивалась незначительно.

Эффективность пульсаций наблюдалась на расстоянии не менее чем трех диаметров ($L = 3d$) ниши в данных условиях. Было установлено, что при каждом включении пульсатора наблюдалась устойчивая картина роста турбулентного теплопереноса. Таким образом, можно утверждать, что данный метод может быть использован для управления тепловой нагрузкой на различном оборудовании и ряде технологических процессов.

Проведенные эксперименты дали возможность получить первичную информацию об эффективности воздействия описанного выше метода на тепломассоперенос, в дальнейшем работа будет продолжена, и эксперименты будут направлены на получение и анализ размерных и безразмерных характеристик турбулентного тепломассопереноса.

Список литературы / References

1. Вараксин А.Ю., Протасов М.В. О влиянии вдува газа на защиту поверхностей тел, обтекаемых двухфазным потоком. *Теплофизика высоких температур*. 2017;55(6):785–788. <https://doi.org/10.7868/S0040364417060151>
- Varaksin AY, Protasov MV. The Effect of Gas Injection on the Protection of Body Surfaces Streamlined by a Two-Phase Flow. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 2017;55(6):785–788. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0040364417060151>
2. Коркмаз М.Э., Гупта М.К. Современный уровень криогенного охлаждения и его применение при механической обработке труднообрабатываемых сплавов. *Материалы*. 2024;17(9):2057. <https://doi.org/10.3390/ma17092057>
- Korkmaz ME, Gupta MK. A State of the Art on Cryogenic Cooling and Its Applications in the Machining of Difficult-to-Machine Alloys. *Materials*. 2024;17(9):2057. <https://doi.org/10.3390/ma17092057>
3. Мислибаев И.Т., Махмудов А., Мусурманов Э.Ш. Исследование кинематики движения потока воздуха при вентиляции тупиковых рабочих мест шахты. *Academic research in educational sciences*. 2021;2(6):226–236. <https://doi.org/10.24412/2181-1385-2021-6-226-236>
- Mislibaev IT, Makhmudov A, Musurmanov ESh. Study of the Kinematics of the Air Flow Movement during Ventilation of Dead-End Working Places of the Mine. *Academic Research in Educational Sciences*. 2021;2(6):226–236. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2181-1385-2021-6-226-236>
4. Курнаева С.В., Бугаева Н.С., Тимофеев В.Н. Исследование процессов тепломассопереноса в индукционных канальных печах для производства алюминия. В: *Труды международной научно-практической конференции «Фундаментальные научные исследования: теоретические и практические аспекты»*. Кемерово, 25–26 мая 2016 года. В 3-х томах. Том 3. Кемерово: Западно-Сибирский научный центр; 2016. С. 121–125.
- Kurnaeva SV, Bugaeva NS, Timofeev VN. Investigation of Heat and Mass Transfer Processes in Induction Duct Furnaces for Aluminum Production. In: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Fundamental Scientific Research: Theoretical and Practical Aspects”*. Kemerovo, May 25-26, 2016. In 3 volumes. Volume 3. Kemerovo: West Siberian Scientific Center; 2016. P. 121–125. (In Russ.)
5. Черечукин В.Г. Оценка эффективности вентиляции тупиковых выработок по факту взрывобезопасности. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2016;(10):347–351.
- Cherechukin VG. Explosion Hazard Assessment of Blind Drift Ventilation Efficiency. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2016;(10):347–351. (In Russ.)
6. Смирняков В.В., Родионов В.А., Смирнякова В.В., Орлов Ф.А. Влияние формы и размеров пылевых фракций на их распределение и накопление в горных выработках при изменении структуры воздушного потока. *Записки горного института*. 2022;253:71–81. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.12>
- Smirnyakov VV, Rodionov VA, Smirnyakova VV, Orlov FA. The Influence of the Shape and Size of Dust Fractions on Their Distribution and Accumulation in Mine Workings When Changing the Structure of Air Flow. *Journal of Mining Institute*. 2022;253:71–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.12>
7. Кузнецова Е.А., Михина Т.В. Производственный травматизм в РФ: анализ состояния в регионах и по видам экономической деятельности. *Социально-трудовые исследования*. 2022;1(46):8–15. <https://doi.org/10.34022/2658-3712-2022-46-1-8-15>
- Kuznetsova EA, Mikhina TV. Occupational Injuries in the Russian Federation: Analysis by Regions and Types of Economic Activity. *Social and Labor Research*. 2022;1(46):8–15. (In Russ.) <https://doi.org/10.34022/2658-3712-2022-46-1-8-15>

8. Асламова Е.А., Асламова В.С., Блинова Д.С., Асламов А.А. Анализ трендов производственного травматизма в России за 2000–2020 годы. *Вестник Ангарского государственного технического университета*. 2021;1(15):175–180.

Aslamova EA, Aslamova VS, Blinova DS, Aslamov AA. Analysis of Production Trends Injuries in Russia in 2000–2020. *Bulletin of the Angarsk State Technical University*. 2021;1(15):175–180. (In Russ.)

9. Мальцев С.В., Казаков Б.П., Исаевич А.Г., Семин М.А. Исследование динамики процесса воздухообмена в системе тупиковых и сквозной выработок большого сечения. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020;(2):46–57. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-2-0-46-57>

Maltsev SV, Kazakov BP, Isaevich AG, Semin MA. Air Exchange Dynamics in the System of Large Cross-Section Blind Roadways. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2020;(2):46–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-2-0-46-57>

10. Ткаченко П. Статистика производственного травматизма в России в 2022 году. URL: <https://www.centrattek.ru/info/travmatizm-2022/> (дата обращения: 20.11.2024).

Tkachenko P. Occupational Injury Statistics in Russia in 2022. (In Russ.) URL: <https://www.centrattek.ru/info/travmatizm-2022/> (accessed: 20.11.2024).

11. Bai Y, Yao Yi, Zheng Sh. Design and Analysis of Heat Exchanger Efficiency. *Bulletin of Science and Practice*. 2023;9(6):373–380. <http://doi.org/10.33619/2414-2948/91/44>

12. Nel AJH, Vosloo JC, Mathews MJ. Evaluating Complex Mine Ventilation Operational Changes through Simulations. *Journal of Energy in Southern Africa*. 2018;29(3):22–32. <https://doi.org/10.17159/2413-3051/2018/v29i3a4445>

13. Zender-Świercz E. Review of IAQ in Premises Equipped with Façade–Ventilation Systems. *Atmosphere*. 2021;12(2):220. <https://doi.org/10.3390/atmos12020220>

14. Darmanis M, Çakan M, Moustris KP, Kavadias KA, Nikas K-SP. Utilisation of Mass and Night Ventilation in Decreasing Cooling Load Demand. *Sustainability*. 2020;12(18):7826. <https://doi.org/10.3390/su12187826>

15. Tähtinen K, Lappalainen S, Karvala K, Remes J, Salonen H. Association between Four-Level Categorisation of Indoor Exposure and Perceived Indoor Air Quality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018;15(4):679. <https://doi.org/10.3390/ijerph15040679>

Об авторах:

Александр Эдуардович Филин, доктор технических наук, профессор кафедры техносферной безопасности Национального исследовательского технологического университета МИСИС (119049, Российская Федерация, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), aleks_filin@bk.ru

Виолетта Александровна Филина, аспирант кафедры техносферной безопасности Национального исследовательского технологического университета МИСИС (119049, Российская Федерация, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1), [ORCID](#), [ResearcherID](#), danilovavikky@mail.ru

Светлана Вячеславовна Тертычная, кандидат технических наук, доцент кафедры техносферной безопасности Национального исследовательского технологического университета МИСИС (119049, Российская Федерация, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), svetter@mail.ru

Илья Юрьевич Курнос, старший преподаватель кафедры техносферной безопасности Национального исследовательского технологического университета МИСИС (119049, Российская Федерация, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), kurnosovilya@yandex.ru

Ирина Сергеевна Колбина, аспирант, ассистент кафедры техносферной безопасности Национального исследовательского технологического университета МИСИС (119049, Российская Федерация, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1), [ORCID](#), [ResearcherID](#), Zvc.665@yandex.ru

Дарья Эдуардовна Пронина, аспирант кафедры техносферной безопасности Национального исследовательского технологического университета МИСИС (119049, Российская Федерация, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1), [ORCID](#), [ResearcherID](#), depronina@atomtes.ru

Заявленный вклад авторов:

А.Э. Филин: научное руководство, написание рукописи, рецензирование и редактирование.

В.А. Филина: разработка концепции, проведение исследования.

С.В. Тертычная: формальный анализ, разработка методологии.

И.Ю. Курнос: написание черновика рукописи.

И.С. Колбина: валидация результатов.

Д.Э. Пронина: визуализация.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Aleksandr E. Filin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Technosphere Safety Department, National University of Science and Technology MISIS (4, Leninsky Prospekt, b. 1, Moscow, 119049, Russian Federation), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), aleks_filin@bk.ru

Violetta A. Filina, Postgraduate Student of the Technosphere Safety Department, National University of Science and Technology MISIS (4, Leninsky Prospekt, b. 1, Moscow, 119049, Russian Federation), [ORCID](#), [ResearcherID](#), danilovavikky@mail.ru

Svetlana V. Tertychnaya, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Technosphere Safety Department, National University of Science and Technology MISIS (4, Leninsky Prospekt, b. 1, Moscow, 119049, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), svetter@mail.ru

Ilya Yu. Kurnosov, Senior Lecturer of the Technosphere Safety Department, National University of Science and Technology MISIS (4, Leninsky Prospekt, b. 1, Moscow, 119049, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), kurnosovilya@yandex.ru

Irina S. Kolbina, Postgraduate Student, Assistant of the Technosphere Safety Department, National University of Science and Technology MISIS (4, Leninsky Prospekt, b. 1, Moscow, 119049, Russian Federation), [ORCID](#), [ResearcherID](#), Zvc.665@yandex.ru

Darya E. Pronina, Postgraduate Student of the Technosphere Safety Department, National University of Science and Technology MISIS (4, Leninsky Prospekt, b. 1, Moscow, 119049, Russian Federation), [ORCID](#), [ResearcherID](#), depronina@atomtes.ru

Claimed Contributorship:

AE Filin: academic advising, manuscript writing, reviewing and editing.

VA Filina: concept development, research.

SV Tertychnaya: formal analysis, methodology development.

IYu Kurnosov: writing a draft manuscript.

IS Kolbina: validation of results.

DE Pronina: visualization.

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

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

Поступила в редакцию / Received 03.12.2024

Поступила после рецензирования / Revised 26.12.2024

Принята к публикации / Accepted 09.01.2025

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 639.3

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-32-41>

Применение подводного видеонаблюдения для контроля рыбозащитного устройства на водозаборном сооружении тепловой электростанции



EDN: GZMIUV

А.Р. Саетов , М.Л. Калайда

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Российская Федерация

✉ sactov67@mail.ru

Аннотация

Введение. В ближайшее время сохранит актуальность проблема выбора средств определения эффективности рыбозащитных устройств (РЗУ). Ранее необходимые данные можно было получить только ихтиологическими исследованиями. Для этого используются специфические методики и оборудование. Ситуацию изменила новая редакция Свода правил СП 101.13330.2023¹, которая предусматривает возможность применения гидроакустических средств для определения эффективности РЗУ. В открытом доступе нет публикаций об особенностях и перспективах такого подхода. Можно предположить, что метод подводного видеонаблюдения сопоставим по результатам с ихтиологическим (гидроакустическим). Цель работы — подтвердить данную гипотезу.

Материалы и методы. При ихтиологических исследованиях на Заинской электростанции рыб отлавливали сетями с ячейей 10, 18, 20, 22, 30 и 70 мм. Для отбора проб фитопланктона применяли батометр Молчанова ГР-18. Пробы зоопланктона отбирали сетью Апштейна. Зообентос собирали автоматическим дночерпателем ДАК-250. Подводное видеонаблюдение вели с помощью камеры «Практик Мурена» с разрешением 720 HD (1280×720 пикселей). Это оборудование оснащено встроенной инфракрасной подсветкой. Информация выводится на надводный мониторный блок. Объектив — широкоугольный, с углом обзора 130°.

Результаты исследования. Преимущество предложенного метода, выявленное в ходе научных изысканий, касается объема выборки. При видеонаблюдении она оказалась в 2,25 раза больше, чем при традиционном методе. Очевидно, что видеокамеры фиксируют больше особей в сравнении с количеством рыб, попавших в сети. Широкая выборка обеспечивает статистически более значимый эффект. С ростом объема данных увеличивается точность характеристик генеральной совокупности, сокращается случайная ошибка. Для определения коэффициента эффективности (Кэф) РЗУ учитывали концентрацию рыб до и после РЗУ, а также показатель выживаемости особей после контакта с РЗУ. При использовании традиционного метода в 2023 году средний Кэф рыбозащитной эффективности РЗУ на береговой насосной станции № 3 Заинской электростанции составил 86,9 %. Новый подход, предложенный авторами данной статьи, в тех же условиях показал аналогичную среднюю эффективность — 87,3 %. Разница совершенно незначительна — 0,46 %. Максимальное расхождение фиксировалось весной 2023 года. Тогда показатель альтернативного метода был на 9,3 % больше в сравнении с традиционным. Минимум отметили осенью — 0,1 %.

Обсуждение и заключение. Удалось подтвердить гипотезу, согласно которой метод подводного видеонаблюдения сопоставим по результатам с ихтиологическим (гидроакустическим). Новый подход все еще не признан законодательно, и его можно использовать только как вспомогательный. Во-первых, видеонаблюдение позволит выяснить, нужны ли ихтиологические изыскания. Во-вторых, эксплуатант водозабора может задействовать экспериментальный метод между ихтиологическими исследованиями для получения оперативной информации об эффективности РЗУ.

Ключевые слова: эффективность рыбозащитного устройства, гидроакустическая проверка устройства, ихтиологическая проверка рыбозащиты, подводное видеонаблюдение рыбозащитного устройства

¹ Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. Свод правил СП 101.13330.2023 Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. URL. <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/318744/> (дата обращения: 10.12.2024).

Благодарности. Авторы благодарят руководство и коллег Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», Татарского филиала Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, филиала АО «Татэнерго» — Заинской государственной районной электростанции, а также анонимных рецензентов за помощь, оказанную при подготовке статьи.

Для цитирования. Саетов А.Р., Калайда М.Л. Применение подводного видеонаблюдения для контроля рыбозащитного устройства на водозаборном сооружении тепловой электростанции. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(1):32–41. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-32-41>

Original Empirical Research

Use of Underwater Video Surveillance to Monitor a Fish Protection Device at a Thermal Power Plant Water Intake Facility

Ainur R. Saetov , Marina L. Kalaida 

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

 saetov67@mail.ru

Abstract

Introduction. In the near future, the issue of selecting appropriate methods to assess the effectiveness of fish protection devices (FPDs) will continue to be relevant. Previously, the necessary data could only be obtained by ichthyological studies, which involved using specific techniques and equipment. However, the introduction of a new edition of the Code of Rules SP 101.13330.2023 changed the situation and opened up the possibility of using sonar tools to determine the FPDs effectiveness. While there is a lack of public information regarding the specifics and potential of this approach, it is possible that underwater video surveillance may yield similar results to ichthyological (hydroacoustic) methods. This study aims to verify this hypothesis.

Materials and Methods. During ichthyological studies at the Zainskaya power plant, fish were captured using nets with mesh sizes of 10, 18, 20, 22, 30, and 70 mm. A Molchanov GR-18 bathometer was used to take phytoplankton samples. Zooplankton samples were collected by the Apstein network. Zoobenthos samples were collected using an automatic DAK-250 dredger. Underwater video surveillance was conducted using a Praktik Murena camera with a resolution of 720 HD (1280×720 pixels), which is equipped with built-in infrared illumination and displays information on a surface monitor. The camera has a wide-angle lens with a 130° viewing angle.

Results. A notable advantage of the proposed method, identified in the course of scientific research, concerned the sample size. With video surveillance, it turned out to be 2.25 times larger than with the traditional method. This was because video cameras captured more individuals than the number of fish caught in a net. A larger sample size provided a more statistically significant result. As the amount of data increased, the accuracy of the characteristics of the general population increased, and random error decreased. To determine the FPD efficiency coefficient (EC), the concentration of fish before and after the FPDs, as well as the survival rate of individuals after contact with the FPDs were taken into account. When using the traditional method in 2023, the average EC of the FPDs efficiency at on-shore pumping station No. 3 was 86.9%. Under the same conditions, the new approach proposed by the authors showed a similar average efficiency of 87.3%, with a difference of only 0.46%, which was completely insignificant. The maximum discrepancy was in the spring of 2023, where the indicator of the alternative method was 9.3% higher than the traditional one, while the minimum was noted in autumn at 0.1%.

Discussion and Conclusion. So, it was possible to confirm the hypothesis that the underwater video surveillance method is comparable in results with the ichthyological (hydroacoustic) method. However, the new approach is not yet legally recognized and can only be used as an additional tool. Firstly, video surveillance can help to determine whether ichthyological studies are necessary. Secondly, water intake operators can use the experimental method in between ichthyological surveys to obtain operational data on the effectiveness of FPDs.

Keywords: fish protection device efficiency, hydroacoustic verification of the device, ichthyological verification of fish protection, underwater video surveillance of the fish protection device

Acknowledgements. The authors would like to thank the management and colleagues of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Kazan State Power Engineering University, the Tatar branch of the All-Russian Scientific Research Institute of Fisheries and Oceanography, the branch of JSC Tatenergo — Zainskaya State Regional Power Plant, as well as anonymous reviewers for their help in preparing the article.

For citation. Saetov AR, Kalaida ML. Use of Underwater Video Surveillance to Monitor a Fish Protection Device at a Thermal Power Plant Water Intake Facility. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(1):32–41. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-32-41>

Введение. Оборудование тепловых электростанций требует охлаждения. Для этого используют воду, которую гидротехнические сооружения (водозаборы) берут из природных и искусственных водоемов [1]. Два обязательных условия работы такого объекта — бесперебойная подача воды и рыбозащитное устройство (РЗУ), препятствующее попаданию рыб в оборудование [2].

Минимальная нормативная эффективность РЗУ — 70 % [3]. Этому требованию соответствуют современные конструкции РЗУ².

Система водоснабжения Заинской государственной районной электростанции (ГРЭС) — оборотная. Сбросная вода охлаждается в Заинском водохранилище. Циркуляционно-техническую воду подают три береговые насосные станции (БНС). Заинское водохранилище — рыбохозяйственный водоем. С учетом этого обстоятельства и природных факторов на всех трех БНС с 2015 по 2018 гг. установили РЗУ типа ВВЗ (водовоздушная завеса). Она должна защищать молодь рыб от водозабора, а водозабор — от плавающего и притопленного мусора. Такими же РЗУ оснащали промышленные и энергетические водозаборы на Ириклинской, Калининградской и Рефтинской ГРЭС. Устройства показали высокую рыбозащитную эффективность [4].

Восходящая водовоздушная завеса формируется потоком воды, которая подается насосами на систему придонных модулей РЗУ. Туда же по параллельному трубопроводу поступает воздух. Проходя через аэрирующие сопла, он направляется в перфорированный трубопровод, смешивается с водой, поднимается на поверхность и таким образом образует препятствие для рыб и мусора (рис. 1).

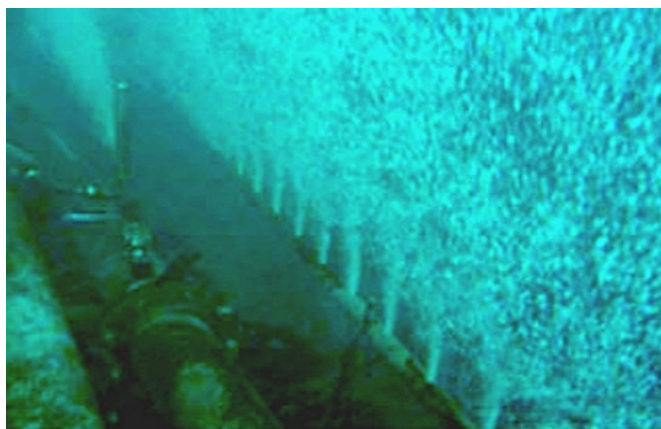


Рис. 1. РЗУ типа ВВЗ в действии

Для РЗУ типа ВВЗ по дну перед зоной водозабора прокладывают перфорированный трубопровод. Из его отверстий постоянно подается водовоздушная смесь. Рыбы зрительно воспринимают «стену» из пузырьков воздуха как физическую преграду. Кроме того, их отпугивает гидроакустический шум воздушных потоков. При этом рыбы не травмируются. РЗУ типа ВВЗ состоит из однотипных взаимозаменяемых модулей, поэтому обслуживать его проще, чем другие защитные устройства. В зимнее время водовоздушная завеса образует полынь. Из-за постоянного перемешивания воды она не замерзает, и водозабор не забивается льдом.

Использование РЗУ типа ВВЗ для защиты молоди рыб базируется, в частности, на испуге. Именно так рыбы реагируют на стену из движущихся вверх пузырьков воздуха — и отплывают от нее. Высокая эффективность метода объясняется комплексным воздействием на молодь. Во-первых, для зрительных рецепторов рыбы водовоздушная завеса — это внешний раздражитель. Во-вторых, она воспринимается как механическая преграда (стена). В-третьих, завеса издает шум. Пузырьки воздуха поднимаются из отверстий перфорированных труб. При всплытии они расширяются и схлопываются с гидрокавитационным эффектом. Происходит микровзрыв, который отпугивает рыб.

В сравнении с воздушно-пузырьковой завесой энергетика водовоздушной завесы намного выше, так как ее формирует не только воздух, но и гораздо более плотный водной поток. В водовоздушной завесе рыба эффективнее поднимается в верхние слои и выносится оттоком от водозабора [5]. Как правило, водовоздушная завеса применяется на крупных водозаборах энергетического назначения.

² Об Инструкции о порядке осуществления контроля за эффективностью рыбозащитных устройств и проведения наблюдений за гибелью рыбы на водозаборных сооружениях. Приказ Федерального агентства по рыболовству от 1 сентября 2009 г. № 786. URL: <https://base.garant.ru/12171525/> (дата обращения: 10.12.2024).

Материалы и методы. Для оценки эффективности РЗУ водозаборных сооружений Заинской ГРЭС проводились ихтиологические исследования³. Анализировались количественный и качественный состав рыб, которые попали в сети в подводящем канале. Для вычисления коэффициента выживаемости выполнили специальные исследования. Контрольную группу рыб отлавливали перед РЗУ, а опытную — в подводящем канале после контакта с элементами РЗУ. В обеих группах подсчитывали число погибших и живых особей. Выживших наблюдали в течение суток [6]. Затем число погибших и выживших снова подсчитывали и таким образом получали коэффициент выживаемости.

Коэффициент эффективности РЗУ выражается в процентах. Это отношение количества рыб, задержанных РЗУ, к числу рыб, попадающих в водозаборное сооружение при отсутствии РЗУ. Учет вели круглосуточно в течение года.

На БНС № 3, оснащенной РЗУ, организовали наблюдательный пункт для отбора ихтиологических проб по стандартным методикам [7]. Вид рыб определяли по таксономическим ревизиям и сводкам [8].

Отмечена сезонная динамика попадания рыб в водозаборные сооружения БНС № 3 Заинской ГРЭС. До и после РЗУ самое большое количество рыбы попадает летом, наименьшее — осенью, зимой и ранней весной (таблица 1). Это объясняется тем, что холодная вода снижает активность рыб.

Таблица 1

Количественный и видовой состав рыб, зафиксированных в водозаборных сооружениях БНС № 3 Заинской ГРЭС перед РЗУ и после РЗУ в 2023 году, экз.

Виды рыб	Зима		Весна		Лето		Осень	
	Перед РЗУ	После РЗУ	Перед РЗУ	После РЗУ	Перед РЗУ	После РЗУ	Перед РЗУ	После РЗУ
Лещ	—	—	—	—	5	—	—	—
Уклейка	45	—	1	1	6	1	—	2
Густера	6	—	7	1	—	—	—	4
Голавль	—	—	2	—	—	—	—	—
Плотва	—	—	2	1	56	1	2	4
Сом	—	—	—	—	1	—	—	—
Окунь	21	2	36	6	250	115	152	6
Всего	72	2	48	9	318	117	154	16

По данным круглосуточных наблюдений на БНС № 3, наибольшее число рыб попадает в сети и оборудование в сумерки и ночью (в 21:00, 1:00, 5:00 и 9:00). В это время рыбы хуже видят преграды, и их захватывает течение у РЗУ. В первую очередь это касается молоди. Ей сложнее сопротивляться потоку.

Двигательная активность карповых рыб уменьшается с 20:00 до 6:00. Это выявил спектральный анализ, который занял 34 часа.

Одновременно с ихтиологическими исследованиями организовали подводное видеонаблюдение. Перед РЗУ и после РЗУ устанавливали камеру «Практик Мурена» [9]. Она вела фото- и видеосъемку. Это оборудование выводит информацию на надводный монитор и сохраняет данные. Разрешение 1280×720 пикселей обеспечивает четкое изображение даже в условиях слабого освещения. Кроме того, можно включить светодиодную или инфракрасную подсветку. Они дистанционно регулируются, и это важно при работе в мутной воде или в плохую погоду. Специальные датчики измеряют глубину и температуру воды. Опциональная функция компаса отображает направление камеры, то есть показывает, в какую сторону она повернута.

Благодаря мощному встроенному литийионному аккумулятору (10 000 мА·ч) камера может работать 6 часов даже в холодную погоду, при этом индикатор аккумулятора отображает время его работы.

На рис. 2 представлен надводный блок. Это портативный пятидюймовый цветной TFT-монитор (от англ. thin-film transistor — тонкопленочные транзисторы).

³ Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. Свод правил СП 101.13330.2023. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/318744/> (дата обращения: 10.12.2024).



Рис. 2. Подводная видеочка «Практик Мурена»

Высокое разрешение 720 HD (1280×720 пикселей) дает ясную и четкую картинку даже на глубине 10–15 м в условиях средней прозрачности воды. Специальный козырек защищает экран от солнечного света. Можно установить карту памяти microSD объемом до 128 Гб. Широкий угол обзора — 130 градусов. Мощная подсветка — 2 LED белых и 4 инфракрасных светодиода позволяют изучать подводный мир днем и ночью даже в условиях слабой прозрачности воды. Класс защиты видеочка (объектива): IP 68. Влагозащищенный и износостойкий видеокабель длиной 15 м выдерживает нагрузку до 15 кг. Температурный режим эксплуатации от -20°C до $+60^{\circ}\text{C}$.

Комплекс объединяет элементы с тремя основными функциями: видеочка, источник питания и накопитель информации. Потребовалось лишь два дополнения. Во-первых, для переноски, хранения и защиты от осадков купили алюминиевый бокс (рис. 3). Его утеплили, чтобы аккумулятор дольше работал в холодное время года. Во-вторых, дополнительно установили внешний жесткий диск объемом 2 терабайта, чтобы сохранять весь отснятый материал.



Рис. 3. Бокс и надводный блок видеочка «Практик Мурена»

Для установки и фиксации камеры под водой разработали специальный кондуктор (рис. 4).

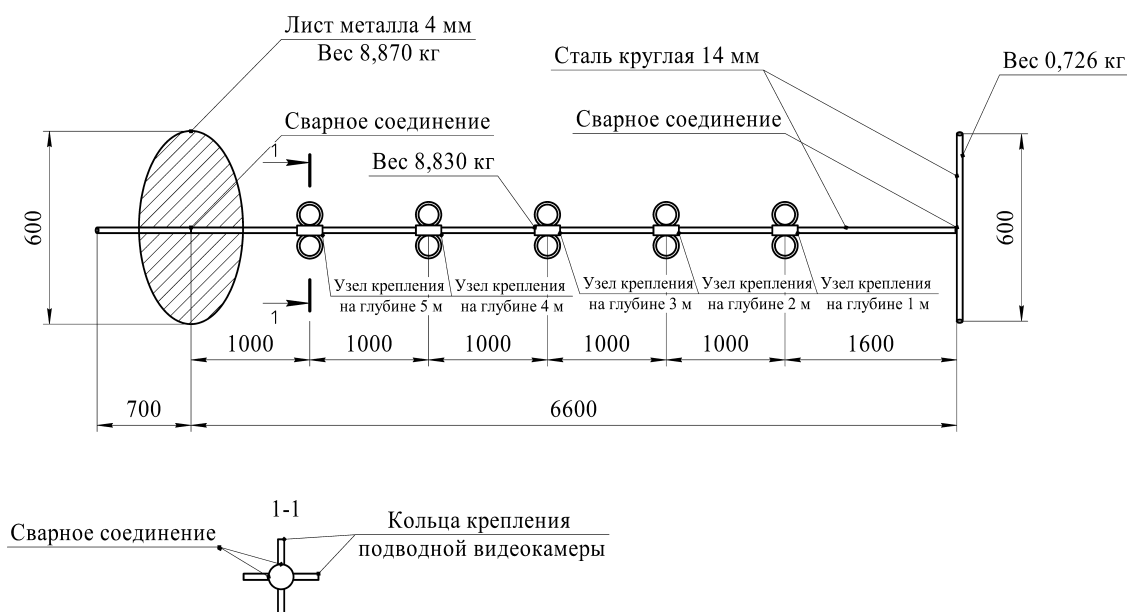


Рис. 4. Кондуктор для установки подводного видеонаблюдения

Кондуктор изготовлен из стального круглого прутка диаметром 14 мм длиной 7300 мм. В верхней части — поперечная перекладина диаметром 14 мм длиной 600 мм, приваренная к основной части. Перекладина выполняет роль рукояти при погружении нижнего конца кондуктора в донный грунт и при повороте для ориентации видеокамеры в нужном направлении. На расстоянии 600 мм от нижнего конца кондуктора сварным соединением закреплён круглый металлический лист толщиной 4 мм. Он ограничивает проникновение кондуктора в грунт и фиксирует его в вертикальном положении. Для крепления подводной камеры через каждые 90° по окружности металлического листа приварены металлические кольца. Расстояние между ними — 1 000 мм. Общая масса конструкции кондуктора не превышает 19 кг, поэтому с ней может работать даже один исследователь.

Результаты исследования. Съёмка перед и после РЗУ на БНС № 3 Заинской ГРЭС выявила стабильность видового состава рыб. Он не зависит от сезона и в целом соответствует данным ихтиологических исследований. В ходе работ удалось зафиксировать 1654 особей. У 256 экземпляров (15,48 % от общего числа) не удалось установить вид [10]. Поэтому для объективности на рис. 5 представлен количественный состав, а в таблицу 2 внесли все полученные данные [11].

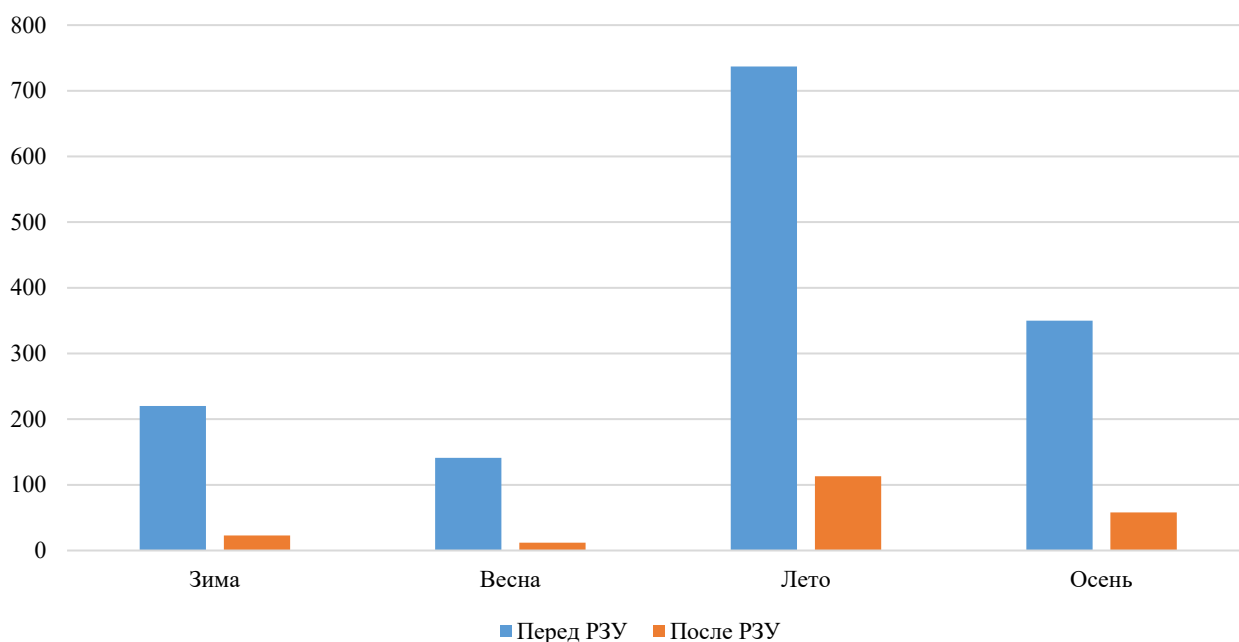


Рис. 5. Количество рыб, попавших на камеру подводного видеонаблюдения перед и после РЗУ на БНС № 3 в 2023 году, экз.

Таблица 2

Количество и виды рыб, зафиксированных камерами подводного видеонаблюдения до и после РЗУ на БНС № 3 в разные сезоны 2023 года, экз.

Виды рыб	Зима		Весна		Лето		Осень	
	Перед РЗУ	После РЗУ	Перед РЗУ	После РЗУ	Перед РЗУ	После РЗУ	Перед РЗУ	После РЗУ
Уклейка	89	3	63	2	271	15	131	7
Густера, лещ*	18	1	12	–	71	8	35	5
Окунь	42	6	24	2	143	25	72	15
Голавль	22	3	12	3	78	16	35	8
Плотва	20	5	14	2	69	14	32	5
Не определено	29	5	16	3	105	35	45	18
Всего	220	23	141	12	737	113	350	58

*Густеру и леща объединили, т.к. их бывает сложно различить на экране.

Общее количество рыб, зафиксированных в районе РЗУ двумя методами, представлено в таблице 3. Согласно этим данным, рыба особенно активна осенью. Сравнительно высокая активность отмечается летом, низкая — зимой и весной.

Таблица 3

Общее количество рыб, зафиксированных в районе РЗУ Заинской ГРЭС в период проведения исследований ихтиологическим (ихт.) методом и методом подводного видеонаблюдения (эксп.) в 2023 году

Сезон и метод фиксации	Зима		Весна		Лето		Осень		Всего за год	
	Ихт.	Эксп.	Ихт.	Эксп.	Ихт.	Эксп.	Ихт.	Эксп.	Ихт.	Эксп.
Количество	74	243	57	153	170	408	435	850	736	1654

В сравнении с ихтиологическим наблюдением подводное зафиксировало в 2,25 раза больше особей. Чем больше размер выборки, тем выше вероятность обнаружить статистически значимый эффект. К тому же больший объем данных увеличивает точность оценки параметров генеральной совокупности и уменьшает случайную ошибку. Это преимущество альтернативного метода исследования.

Согласно итогам круглосуточных наблюдений, вне зависимости от сезона подводные камеры чаще фиксируют рыб в светлое время суток (таблица 4).

Таблица 4

Количество рыб, зафиксированных камерами подводного видеонаблюдения в 2023 году на БНС № 3 Заинской ГРЭС, экземпляров/%

Время	0:00–4:00	4:00–8:00	8:00–12:00	12:00–16:00	16:00–20:00	20:00–0:00	За сезон
Зима	4/ 1,65	78/ 32,10	53/ 21,81	36/ 14,81	42/ 17,28	30/ 12,35	243/ 100
Весна	2/ 1,31	51/ 33,33	33/ 21,57	15/ 9,8	33/ 21,57	19/ 12,42	153/ 100
Лето	13/ 1,53	337/ 39,65	185/ 21,76	104/ 12,24	155/ 18,23	56/ 6,59	850/ 100
Осень	4/ 0,98	162/ 39,71	93/ 22,79	39/ 9,56	77/ 18,87	33/ 8,09	408/ 100
Всего за год	23/ 1,39*	628/ 37,97*	364/ 22,01*	194/ 11,73	307/ 18,56*	138/ 8,34*	1654/ 100

*Показатель рассчитывается не по времени суток, а по итогам года. Это доля от общего годового количества — 1654.

Подводное видеонаблюдение выявило наименьшее количество рыбы в сумерки и ночью, с 22:00 до 4:00. Это объясняется биоритмикой большинства рыб. Их двигательная активность снижается с 20:00 до 6:00 [11]. С 0:00 до 4:00 камера подводного видеонаблюдения зафиксировала лишь 23 экземпляра из 1654, или 1,39 %. Этот показатель остается низким (от 0,98 % до 1,65 %) независимо от сезона.

С 20:00 до 0:00 видеоследование обнаружило 138 экземпляров из 1654, или 8,34 %. Особенно низкие показатели фиксировались летом (6,59 %) и осенью (8,09 %).

С 12:00 до 16:00 удалось заснять 194 экземпляра из 1654, или 11,37 %. Минимумы отмечены весной (9,80 %) и осенью (9,56 %).

Для ихтиологических исследований коэффициент эффективности (Кэф) РЗУ рассчитали по формуле:

$$K_{\text{эф}} = \frac{C_0 - C}{C_0} \cdot B \cdot 100 \%,$$

где C — концентрация рыб после РЗУ; C_0 — концентрация рыб перед РЗУ; B — коэффициент выживаемости рыб после контакта с элементами конструкции РЗУ.

$K_{\text{эф}}$ (в %) РЗУ по результатам ихтиологических исследований в 2023 году:

- зима — 97,2;
- весна — 83,7;
- лето — 83,4;
- осень — 83,3.

В 2023 году средний коэффициент рыбозащитной эффективности РЗУ на БНС № 3 составил 86,9 % (по нормам — не менее 70 %).

Одновременно с ихтиологическими исследованиями на БНС № 3 шли опыты по фиксации рыб с помощью подводной камеры. Их также отслеживали до и после РЗУ. Кэф РЗУ по результатам видеонаблюдения в 2023 году:

- зима — 89,6 %;
- весна — 91,5 %;
- лето — 84,7 %;
- осень — 83,4 %.

Средний Кэф РЗУ в этом случае — 87,3 %.

В таблице 5 сопоставляются показатели рыбозащитной эффективности РЗУ, полученные разными методами.

Таблица 5

Сравнение эффективности ихтиологического и альтернативного (экспериментального) методов определения рыбозащитной эффективности на РЗУ БНС № 3 в 2023 году, %

Время года	Кэф РЗУ (ихтиологический метод)	Кэф РЗУ (экспериментальный метод)	Разница (– ниже, + выше)
Зима	97,20	89,60	–7,80
Весна	83,70	91,50	+9,30
Лето	83,40	84,70	+1,60
Осень	83,30	83,40	+0,10
2023 год	86,90	87,30	+0,46

Как видим, пиковая разница в эффективности — менее 10 %, минимальная — 0,1 %, средняя — 0,46 %.

Обсуждение и заключение. Подводное видеонаблюдение на РЗУ типа ВВЗ в условиях БНС № 3 Заинской ГРЭС подтвердило данные традиционных ихтиологических исследований. По результатам эти два метода расходятся незначительно. Средняя разница менее 1 % (точнее, 0,46 %) говорит о корректности результата. Это подтверждает гипотезу об информативности и перспективности метода подводного видеонаблюдения.

Уточним, что экспериментальный метод все еще не признан законодательно. В связи с этим его нельзя использовать как самостоятельный и достаточный подход. Однако он будет полезен, во-первых, чтобы выяснить, нужны ли ихтиологические изыскания. Во-вторых, между традиционными исследованиями можно задействовать подводное видеонаблюдение для получения дополнительной информации об эффективности РЗУ.

Таким образом, предложенный метод дает эксплуатанту водозабора возможность оперативно отслеживать эффективность работы РЗУ. Такой мониторинг можно проводить значительно чаще, чем профессиональный ихтиологический (гидроакустический).

Подводное видеонаблюдение хорошо подходит также для дистанционного определения таких параметров рыб, как длина. При этом особи не извлекаются из воды и не травмируются [12].

Еще одно преимущество нового метода перед традиционным — большая выборка. В рамках представленной научной работы отмечено различие в 2,25 раза в пользу подводного видеонаблюдения. Увеличение выборки позволяет повысить точность оценки и сократить вероятность ошибок при расчетах.

Список литературы / References

1. Афанасьева Е.А., Кислякова М.Д. Основные проблемы энергетики и возможные способы их решения. *Молодой ученый*. 2017;40(174):1–4. URL: <https://moluch.ru/archive/174/45823/> (дата обращения: 13.12.2024).
Afanaseva EA, Kislyakova MD. The Main Challenges of Energy and Potential Solutions. *Molodoi uchenyi*. 2017;40(174):1–4. (In Russ.) URL: <https://moluch.ru/archive/174/45823/> (accessed: 13.12.2024).
2. Водные объекты Республики Татарстан. Гидрографический справочник. Казань: Фолиант; 2018. С. 189–203.
Water Bodies of the Republic of Tatarstan. Hydrographic Reference Book. Kazan: Foliant; 2018. P. 189–203. (In Russ.)
3. Bretzel JB, Doyle KE, An Vi Vu, Watts RJ, Galbusera C, Boys CA, et al. A Touch too Much — Interactions of Various Species of Freshwater Fish and Crustacea at a Simulated Fish Protection Screen. *Ecological Engineering*. 2024;204:107281. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107281>
4. Ivanov AV. Safe Habitation for Protected Fish at Hydroelectric Power Plants. *Power Technology and Engineering*. 2023;57:26–38. <https://doi.org/10.1007/s10749-023-01619-4>
5. Ivanov AV. On Protecting Fish in a Hydroelectric Power Station. *Power Technology and Engineering*. 2022;56:529–537. <https://doi.org/10.1007/s10749-023-01548-2>
6. Бражник С.Ю., Устюжинский Г.М., Валуев К.В., Гончаров С.М., Меньшиков С.И., Леман В.Н. и др. Методические рекомендации по сбору и обработке данных гидрологических и ихтиологических исследований в ходе проведения испытаний по определению эффективности рыбозащитных сооружений (устройств). Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии; 2024. С. 52.
Brazhnik SYu, Ustyuzhinskii GM, Valuev KV, Goncharov SM, Menshikov SI, Leman VN, et al. Methodological Recommendations for the Collection and Processing of Hydrological and Ichthyological Research Data during Tests to Determine the Effectiveness of Fish Protection Structures (Devices). Moscow: All-Russian Scientific Research Institute of Fisheries and Oceanography; 2024. P. 52. (In Russ.)
7. Калайда М.Л., Саётов А.Р. Водные биологические ресурсы в структуре экологических проблем энергетических объектов. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2022;24(2):175–185. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-2-175-185>
8. Kalaida ML, Saetov AR. Water Biological Resources in the Structure of Environmental Problems of Energy Facilities. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2022;24(2):175–185. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-2-175-185>
9. Elham Foroozandeh, Pouya Derakhshan Barjoei. Fish Behaviors in Electromagnetic Fields. *Journal of Molecular Biomarkers & Diagnosis*. 2018;09(1):1000377. <http://doi.org/10.4172/2155-9929.1000377>
10. Christie AE. Fish Protection at Ontario Hydro Thermal Generating Stations: Recent Developments. *SIL Proceedings, 1922–2010*. 1985;22(4):2508. <https://doi.org/10.1080/03680770.1983.11897713>
11. Павлов Д.С., Скоробогатов М.А. Миграции рыб в зарегулированных реках. Москва: КМК; 2014. С. 413. URL: <http://elib.vniro.ru/lib/document/DB4/9EBCA007-6936-4D97-8FF9-40975ACE5665/> (дата обращения: 17.09.2024).
Pavlov DS, Skorobogatov MA. *Fish Migrations in Regulated Rivers*. Moscow: KMK; 2014. P. 413. (In Russ.) URL: <http://elib.vniro.ru/lib/document/DB4/9EBCA007-6936-4D97-8FF9-40975ACE5665/> (accessed: 17.09.2024).
12. Решетников Ю.С. (ред.). Аннотированный каталог круглоротых и рыб континентальных вод России. Москва: Наука; 1998. С. 21–219. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_000573328/ (дата обращения: 17.09.2024).
Reshetnikov YuS. (ed.). *An Annotated Catalog of Cyclostomes and Fishes of the Continental Waters of Russia*. Moscow: Nauka; 1998. P. 21–219. (In Russ.) URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_000573328/ (accessed: 17.09.2024).
13. Кузнецов М.Ю. Гидроакустические методы и средства оценки запасов рыб и их промысла. Часть 1. Гидроакустические средства и технологии их использования при проведении биоресурсных исследований ТИНРО-центра. *Известия ТИНРО*. 2013;172:20–51. URL: https://www.researchgate.net/publication/291228890_Gidroakusticeskie_metody_i_sredstva_ocenki_zapasov_ryb_i_ih_promysla_Cast_1_Gidroakusticeskie_sredstva_i_tehnologii_ih_ispolzovania_pri_provedenii_bioresurnyh_issledovanij_TINRO-Centra (дата обращения: 17.09.2024).
14. Kuznetsov MYu. Hydroacoustic Methods and Tools for Fish Stock Assessment and Fishery Maintenance. Part 1. Hydroacoustic Tools and Technologies of Their Use in Bioresource Researches of TINRO-Center. *Izv. TINRO*. 2013;172:20–51. (In Russ.) URL: https://www.researchgate.net/publication/291228890_Gidroakusticeskie_metody_i_sredstva_ocenki_zapasov_ryb_i_ih_promysla_Cast_1_Gidroakusticeskie_sredstva_i_tehnologii_ih_ispolzovania_pri_provedenii_bioresurnyh_issledovanij_TINRO-Centra (accessed: 17.09.2024).

Об авторах:

Айнур Расихович Саетов, аспирант кафедры водных биоресурсов и аквакультуры Казанского государственного энергетического университета (420066, Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань, Красносельская улица, 51), [ORCID](#), saetov67@mail.ru

Марина Львовна Калайда, доктор биологических наук, заведующая кафедрой водных биоресурсов и аквакультуры Казанского государственного энергетического университета (420066, Российская Федерация, г. Казань, Красносельская улица, 51), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), kalayda4@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

А.Р. Саетов: разработка методологии, написание чернового варианта статьи, иллюстрации.

М.Л. Калайда: разработка концепции, научное руководство.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Ainur R. Saetov, Postgraduate Student of the Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture, Kazan State Power Engineering University (51, Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russian Federation), [ORCID](#), saetov67@mail.ru

Marina L. Kalaida, Dr. Sci. (Biol.), Head of the Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture, Kazan State Power Engineering University (51, Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), kalayda4@mail.ru

Claimed Contributorship:

AR Saetov: methodology development, writing a draft of a manuscript, visualization.

ML Kalaida: concept development, academic advising.

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

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

Поступила в редакцию / Received 28.12.2024

Поступила после рецензирования / Revised 20.01.2025

Принята к публикации / Accepted 31.01.2025

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 504.054 52–56

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-42-54>

Особенности развития зелёной энергетики в Российской Федерации

Л.А. Минасян , А.В. Благин , А.В. Канеева

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

✉ larmin1@mail.ru

EDN: MTPKEN

Аннотация

Введение. Вопросы устойчивого развития, охраны окружающей среды и перехода к низкоуглеродной экономике не теряют своей актуальности для стран по всему миру, в том числе и для Российской Федерации. В условиях глобальных изменений климата и истощения традиционных источников энергии необходимость в развитии зелёной энергетики приобретает особую значимость. Однако несмотря на наличие определённого потенциала данный сектор в России пока ещё недостаточно развит, что обусловлено различными экономическими, технологическими и законодательными факторами. В научной литературе существует ряд теоретических исследований, посвящённых вопросам возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Тем не менее, многие аспекты функционирования и становления зелёной энергетики пока ещё мало изучены, этот научный пробел затрудняет полноценное понимание механизмов и стратегий её дальнейшего развития.

В связи с вышеизложенным цель данного исследования заключается в том, чтобы проанализировать существующие особенности и тенденции развития зелёной энергетики в Российской Федерации, выявить потенциальные препятствия и возможности для её расширения, определить пути преодоления негативных аспектов её функционирования. Задачи авторов исследования сосредоточены на анализе приоритетов государственной политики России, подписавшей Рамочную конвенцию ООН об изменении климата, Парижское соглашение по климату и Киотский протокол о сокращении выбросов парниковых газов, на определении влияния государственной политики, технологий и инвестиций на развитие возобновляемых источников энергии, а также на изучении факторов, которые могут способствовать ускорению перехода страны к более устойчивым энергетическим моделям. Результаты исследования призваны не только заполнить текущий пробел в научном знании, но и стать основой для выработки рекомендаций, направленных на оптимизацию политики в сфере развития зелёной энергетики в стране.

Материалы и методы. Авторами проанализированы законодательные материалы, касающиеся исследуемой темы. Были использованы статистические данные по видам энергетических мощностей страны за последнее десятилетие. Исследование проводилось на основе нормативных и правовых актов РФ. Изучены результаты мониторинга реализации государственных программ и стратегий по рассматриваемому вопросу. В качестве основных методов исследования были использованы контент-анализ и структурно-функциональный анализ. Современное положение дел в энергетической отрасли представлено на основе анализа иерархий как совокупности элементов, каждый из которых отражает конкретную ступень в достижении поставленной цели.

Результаты исследования. Эксплицирован явный рост использования возобновляемых источников энергии в общей мировой энергетической мощности. Установлено, что в России уделяется значительное внимание развитию возобновляемых источников энергии, при этом акцент делается на внедрение механизмов государственно-частного партнерства в этой области. Проанализированы методы и принципы государственной поддержки, направленные на развитие данного сегмента, а также технологии конкурсного отбора (ДПМ ВИЭ.1 и ДПМ ВИЭ.2) для ввода в эксплуатацию генерирующих объектов, использующих разнообразные виды возобновляемых источников энергии. Подтверждено, что дорожная карта развития энергетики в России соответствует предложенной иерархии стратегий, разработанной на основе гибридного подхода. Также установлены приоритеты в области сокращения парникового эффекта и борьбы с загрязнением окружающей среды.

Обсуждение и заключение. Данные, полученные в результате проведенного авторами исследования, свидетельствуют о том, что Россия начала движение в направлении активного внедрения возобновляемых источников энергии, не оставляя при этом без внимания и функционирование традиционной энергетики на невозобновляемых источниках, осуществляя мероприятия по минимизации возникающих при этом издержек. Становление зелёной энергетики в стране пока идёт медленными темпами, её развитие тормозят, с одной стороны, уже имеющийся мощный потенциал энергетических мощностей, а с другой стороны, негативные факторы, отрицательно влияющие как на изготовление, так и на применение ВИЭ. Но, радуя за повсеместное форсирование внедрения зелёной энергетики, нельзя не принимать во внимание тот факт, что процесс перехода к ней таит в себе немало угроз, которые надо уметь прогнозировать и устранять. Для этого должно быть проведено тщательное исследование влияния различных видов возобновляемых источников энергии на окружающую среду и здоровье людей. Поэтому внедрение ВИЭ должно быть поэтапным, тщательно продуманным. В связи с этим данная тема требует дальнейшего изучения.

Ключевые слова: Российская Федерация, энергосистема страны, возобновляемые источники энергии, законодательные акты, этапы и перспективы развития

Для цитирования. Минасян Л.А., Благин А.В., Канеева А.В. Особенности развития зеленой энергетики в Российской Федерации. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(1):42–54. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-42-54>

Original Theoretical Research

Specifics of Green Energy Development in the Russian Federation

Larisa A. Minasyan , Anatoly V. Blagin , Anna V. Kaneeva 

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

✉ larmin1@mail.ru

Abstract

Introduction. The issues of sustainable development, environmental protection and transition to a low-carbon economy remain relevant for countries worldwide, including the Russian Federation. In the context of global climate change and depletion of traditional energy sources, the need to develop "green" energy has become increasingly important. However, despite the presence of a certain potential, this sector in Russia is still underdeveloped, which is due to various economic, technological and legislative factors. There are numerous theoretical studies on renewable energy sources in the scientific literature, but many aspects of their functioning and development remain insufficiently explored. This scientific gap makes it difficult to fully understand the mechanisms and strategies for its further development.

In connection with the above, this study aims to analyze the current features and trends in the development of green energy in the Russian Federation. The study will also identify potential obstacles and opportunities for the expansion of green energy, as well as ways to overcome negative aspects of its functioning. The objectives of the authors of the study are focused on analyzing the priorities of public policy in Russia as a signatory to the UN Framework Convention on Climate Change, the Paris Climate Agreement, and the Kyoto Protocol on Reducing Greenhouse Gas Emissions, on determining the impact of public policy, technology and investment on the development of renewable energy sources, as well as on studying factors that can accelerate the country's transition to more sustainable energy models. The results of the study aim not only to fill a current gap in scientific knowledge, but also to provide the basis for developing recommendations that can help optimize energy policy in the country.

Materials and Methods. The authors analyzed legislative materials related to the topic of study. Statistical data on the types of energy capacities in the country over the past decade were used. The study was conducted based on regulatory and legal acts of the Russian Federation. Results from monitoring the implementation of government programs and strategies on the issue were also studied. Content analysis, structural and functional analysis were used as main research methods. The current state of affairs in the energy industry was presented based on the analysis of hierarchies, which was a set of elements, each of which reflected a specific step in achieving the goal.

Results. The clear growth of renewable energy sources (RES) use in the total global energy capacity has been explicated. It has been established that Russia is paying significant attention to the development of renewable energy sources, with a focus on introducing public-private partnerships in this area. Methods and principles of government support aimed at developing this sector, as well as competitive technologies (RES.1 and RES.2) for the commissioning of generating facilities using various forms of renewable energy, have been analyzed. It has been confirmed that the energy development roadmap in Russia corresponds to a proposed hierarchy of strategies based on a hybrid approach. Priorities in reducing greenhouse gas emissions and combating pollution have also been established.

Discussion and Conclusion. The data obtained from the research conducted by the authors indicates that Russia has started to move towards the active implementation of renewable energy sources while not disregarding the use of traditional energy from non-renewable resources, taking steps to minimize associated costs. The development of green energy in the country is still proceeding at a slow rate. Its development is hampered, on the one hand, by the already powerful potential of energy capacities, and on the other hand, by negative factors affecting both the production and use of renewable energy sources. While advocating for a faster transition to green energy, it is important to acknowledge that this process is fraught with challenges that must be predicted and addressed. To do so, a thorough analysis of the impact of different types of renewable energy sources on the environment and human health is necessary. Therefore, the introduction of renewable energy sources should be phased and carefully thought out. In this regard, this topic requires further study.

Keywords: Russian Federation, the country's energy system, renewable energy sources, legislative acts, stages and prospects of development

For citation. Minasyan LA, Blagin AV, Kaneeva AV. Specifics of Green Energy Development in the Russian Federation. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(1):42–54. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-42-54>

Введение. Актуальность вопроса о развитии зелёной энергетики в России обусловлена необходимостью перехода к более устойчивым и экологически чистым источникам энергии в условиях глобальной климатической изменчивости и истощения традиционных ресурсов. В связи с тем, что Российская Федерация обладает обширными запасами углеводородов и активно использует атомную энергетику, проблема внедрения и развития возобновляемых источников энергии в стране остается недостаточно исследованной и особенно в плане возможного негативного влияния их на окружающую среду и здоровье людей. Значительное внимание уделяется существующим мощностям и объемам энергопроизводства, однако вопросы использования альтернативных источников энергии, таких как солнечная, ветровая и гидроэнергетика, а также их интеграция в общую энергетическую систему остаются без должного научного обоснования.

Российская Федерация — страна, обладающая большими объемами природных энергетических ресурсов, что определяет ее как мирового лидера по запасам углеводородного сырья, использованию и экспорту атомной энергии. В принятой Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года¹ определены прогнозные показатели по объему добычи различных видов топлива. На рис. 1 приведены эти данные по двум этапам реализации Стратегии: на 2024 и на 2035 год в соответствии с двумя видами сценариев — нижним и верхним. Оба сценария нацелены на сохранение макроэкономической стабильности государства. Сценарий, соответствующий верхней границе диапазона параметров развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК), предполагает достижение темпов экономического роста выше среднемировых. Сценарий, соответствующий нижней границе, призван обозначать предел устойчивости энергетики страны и обеспечения ее энергетической безопасности.

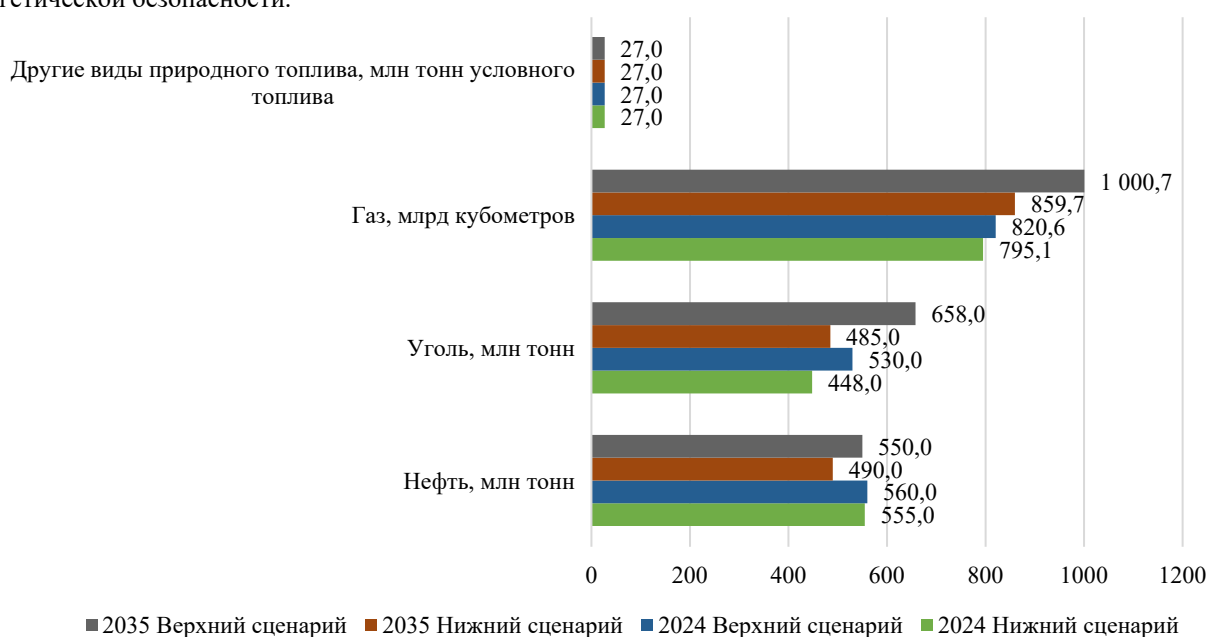


Рис. 1. Прогноз топливно-энергетического баланса России (2024, 2035 гг.)

¹ Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации № 1523–р от 09.06.2020 года. URL: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> (дата обращения: 13.01.2025).

Судя по данным на рис. 1, в стране не планируется вплоть до 2035 года как-то существенно уменьшить добычу природных, невозобновляемых энергоресурсов. В Энергетической стратегии отмечается, что одной из главных целей развития энергетики является содействие социально-экономическому развитию государства, способствование развитию других отраслей экономики, что в качестве приоритетов государственной энергетической политики выделяет «гарантированное обеспечение энергетической безопасности страны в целом и на уровне субъектов Российской Федерации, в особенности расположенных на геостратегических территориях; первоочередное удовлетворение внутреннего спроса на продукцию и услуги в сфере энергетики»².

При этом объемы добычи и производства энергетических ресурсов из добытого сырья, производство топлива и электрической энергии в Российской Федерации устойчиво превышают внутреннее потребление: по нефти — более чем в 1,9 раза, газу — в 1,5 раза, углю — в 1,8 раза, дизельному топливу — в 2,6 раза, автомобильному бензину — в 1,1 раза [1]. Таким образом, становится ясно, что Россия выступает одним из мировых лидеров по экспорту энергетических ресурсов. Получаемую прибыль планируется использовать для развития отрасли, ускорения технологических и цифровых путей эволюции, а также для достижения таких национальных целей, как устойчивый рост реальных доходов граждан страны.

В Стратегии отмечается, что среди крупнейших экономик мира топливно-энергетический баланс Российской Федерации является одним из самых экологически чистых (низкоуглеродных) — более трети генерации электрической энергии приходится на атомную энергетику, гидроэнергетику и другие возобновляемые источники энергии, около половины — на природный газ³. Российская Федерация несмотря на полную обеспеченность природными энергетическими ресурсами выступает в едином тренде с мировой энергетикой, реализуя задачи по производству и потреблению энергии, устойчивой промышленной политике, определенные в Программе ООН по окружающей среде⁴.

На сегодняшний день литературные источники в основном сосредоточены на отдельных аспектах зелёной энергетики, таких как правовые, экономические и технологические вопросы. Однако существует явный недостаток комплексного анализа текущего состояния возобновляемых источников энергии в России. Это показывает пробел в научных знаниях о взаимодействии государственной политики, рынков капитала и научных разработок, необходимых для эффективного продвижения и внедрения инновационных и устойчивых технологий в энергетическом секторе страны. Более того, эмпирические данные о реальных возможностях и перспективах роста этого сегмента экономики России недостаточно исследованы.

Поэтому целью и задачей представленного исследования являлся комплексный анализ особенностей и тенденций развития зелёной энергетики в Российской Федерации. Он включает в себя изучение влияния государственной политики на внедрение возобновляемых источников энергии, оценку существующих барьеров и возможностей для активизации роста этой сферы, а также разработку рекомендаций по улучшению условий для дальнейшего развития зелёной энергетики в стране.

Материалы и методы. В ходе исследования были использованы нормативные и правовые акты РФ: Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года, Государственная программа Российской Федерации «Развитие энергетики», указ Президента РФ «О сокращении выбросов парниковых газов», Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года, распоряжение Правительства РФ «Об основных направлениях государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2035 года», Федеральный закон «Об электроэнергетике».

Изучены данные Федеральной службы государственной статистики Российской Федерации, Ассоциации развития возобновляемой энергетики (АРВЭ), статистика ВИЭ, информационные статьи сайта UNEP (The United Nations Environment Programme), Программа ООН по окружающей среде, оценочные доклады, представленные на сайте IPCC (Межправительственная группа экспертов по изменению климата — The Intergovernmental Panel on Climate Change), материалы по проблемам развития зелёной энергетики в мире и в России, представленные в научных трудах отечественных и зарубежных авторов. Особое внимание уделено результатам обзора «Возобновляемая энергетика в России и мире», представленного Росэнерго⁵. Были проана-

² Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации № 1523-р от 09.06.2020 года. URL: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVdYT4lgsApssm6mZRb7wx.pdf> (дата обращения: 13.01.2025).

³ Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации № 1523-р от 09.06.2020 года. URL: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVdYT4lgsApssm6mZRb7wx.pdf> (дата обращения: 13.01.2025).

⁴ Программа ООН по окружающей среде. URL: <https://www.unep.org/ru> (дата обращения: 13.01.2025).

⁵ Возобновляемая энергетика в России и мире. Минэнерго России. Москва: 2022. 105 с. URL: <https://rosenergo.gov.ru/upload/iblock/e04/3xtm87iv99x76b23c6wjul3as5pz8z8zj.pdf?ysclid=lxezlwzc66231521884> (дата обращения: 13.01.2025).

лизированы планы, отчеты и итоги мониторинга реализации Государственной программы Российской Федерации «Развитие энергетики»⁶ с использованием метода контент-анализа и структурно-функционального анализа.

Использован смешанный исследовательский метод, включающий в себя качественный и количественный анализы. Публичные выступления государственных деятелей, тексты в открытой печати, нормативно-правовые документы были подвергнуты качественному анализу, вторичная информация из статистических источников — количественному анализу. В качестве основы для определения и анализа взаимосвязей стратегий внедрения финансирования мероприятий в целях устойчивого развития в Российской Федерации авторами был применен методологический подход, предложенный авторами [1].

Результаты исследования. Анализ статистических данных, изысканий ученых, изучение документов органов власти, которые провели авторы в рамках представленной работы, позволяют утверждать, что количество невозобновляемых энергетических источников, несмотря на их значительные запасы, из года в год сокращается, что в конечном итоге может привести к полному истощению этих ресурсов. Рост населения, постоянное повышение его жизненного уровня приводят к увеличению потребления энергии, которое с 1960 годов выросло в 3,6 раза⁷. В этом состоит один из основополагающих поводов для активного поиска и внедрения альтернативных источников энергии.

Другие поводы изложены в Программе ООН по окружающей среде. И в первую очередь это изменение климата на Земле, необходимость устранения его последствий. Ключевой причиной глобального потепления называют, как известно, выбросы парниковых газов. В 2020 году средняя приземная температура воздуха на 1,1 °C превысила доиндустриальный уровень 1850–1900 годов. Если сложившуюся ситуацию оставить без внимания, то можно прогнозировать потепление климата за нынешнее столетие более чем на 2,9 °C. Согласно докладу Межправительственной группы экспертов за 2021 год, антропогенное изменение климата в том виде, в котором оно преобладает в настоящее время, является беспрецедентным за последние 2000 лет и усиливается во всех регионах мира⁸. Для жизни на Земле это может иметь катастрофические последствия. В соответствии с Парижским соглашением по климату, принятому в 2015 году, предпочтительный предел повышения температуры должен составлять 1,5 °C, и это требует значительного сокращения выбросов парниковых газов в окружающую среду — на 50 % к 2030 году, на 100 % — к концу XXI века⁹. В обзоре [2] подробно рассмотрены движущие силы изменения климата, проанализированы его последствия, эксплицированы меры по их смягчению.

Следует понимать, что мы живем в эпоху природного кризиса. Сохранение, восстановление и разумное использование природных богатств являются поэтому основными задачами на текущий момент. В качестве доказательства этого факта UNEP приводит конкретные примеры уничтожения природы, вызванные деятельностью человека, доказывая тем самым, что «мы используем эквивалент 1,6 Земли для поддержания нашего нынешнего образа жизни, и экосистемы не могут идти в ногу с нашими потребностями»¹⁰.

Поддержка территорий, пострадавших от стихийных бедствий, промышленных аварий и антропогенных кризисов, борьба с загрязнением окружающей среды, сведение к минимуму неблагоприятного воздействия химических веществ — эти мероприятия могут и должны способствовать восстановлению природы, ее богатств, оказывать в то же время существенное влияние на принятие государствами всех необходимых мер для их реализации.

В настоящее время правовой основой международного взаимодействия по вопросам изменения климата является Рамочная конвенция ООН, принятая 9 мая 1992 года, получившая развитие в Киотском протоколе (11 декабря 1997 года). Для достижения конечных целей Рамочной конвенции принято Парижское соглашение по климату (12 декабря 2015 года). РФ является стороной Рамочной конвенции, Киотского протокола и Парижского соглашения¹¹. Российская Федерация 25 ноября 2020 года заявила о своем первом определяемом на национальном уровне вкладе (ОНУВ) в рамках реализации Парижского соглашения, эти данные размещены на официальном портале секретариата Рамочной конвенции ООН об изменении климата¹². Основой для

⁶ Государственная программа Российской Федерации «Развитие энергетики». Постановление Правительства Российской Федерации № 321 от 15.04.2014 г. URL: <https://minenergo.gov.ru/activity/government-program?ysclid=m7afzr9it1340468075> (дата обращения: 13.01.2025).

⁷ Там же

⁸ Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press. IPCC; 2021. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> (дата обращения: 13.01.2025).

⁹ The Paris Agreement. United Nations. URL: <https://www.un.org/ru/climatechange/paris-agreement> (дата обращения: 13.01.2025).

¹⁰ Facts about the nature crisis. UN environment programme. URL: <https://www.unep.org/facts-about-nature-crisis> (дата обращения: 13.01.2025).

¹¹ О ратификации рамочной Конвенции ООН об изменении климата. Федеральный закон URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/7188>. О принятии Парижского соглашения. Постановление Правительства Российской Федерации № 1228 от 21 сентября 2019 года. URL: <http://static.government.ru/media/files/10US0FqDc05omQ1VgnC8rL6PbY69AvA.pdf> (дата обращения: 13.01.2025).

¹² NDC Registry. United Nations. URL: <https://unfccc.int/ru/NDCREG> (дата обращения: 13.01.2025).

данного заявления стали Указ Президента РФ «О сокращении выбросов парниковых газов», согласно которому правительству страны поставлена задача обеспечить к 2030 году сокращение выбросов парниковых газов до 70 % относительно уровня 1990 года с учетом максимально возможной поглощающей способности лесов и иных экосистем и при условии устойчивого и сбалансированного социально-экономического развития Российской Федерации¹³, и Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года¹⁴. Стратегия предусматривает два сценария такого развития: инерционный и целевой (интенсивный). Именно целевой сценарий рассматривается в качестве основного, предполагающего реализацию взятых Российской Федерацией обязательств в рамках Парижского соглашения и Рамочной конвенции и достижение баланса между антропогенными выбросами парниковых газов и их поглощением не позднее 2060 года. В рамках технологического развития особое внимание в Стратегии уделено развитию в стране возобновляемых источников энергии. В распоряжении Правительства РФ «Об основных направлениях государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2035 года»¹⁵ говорится, что использование возобновляемых источников энергии является одним из значимых мероприятий, «связанных с выполнением международных обязательств Российской Федерации по ограничению выбросов парниковых газов».

Согласно Федеральному закону «Об электроэнергетике» возобновляемыми источниками энергии являются следующие виды (таблица 1)¹⁶:

Таблица 1

Возобновляемые источники энергии

Энергия солнца
Энергия ветра
Энергия вод (в том числе энергия сточных вод), за исключением случаев использования такой энергии на гидроаккумулирующих электроэнергетических станциях
Энергия приливов
Энергия волн водных объектов, в том числе водоемов, рек, морей, океанов
Геотермальная энергия с использованием природных подземных теплоносителей
Низкопотенциальная тепловая энергия земли, воздуха, воды с использованием специальных теплоносителей
Биомасса, включающая в себя специально выращенные для получения энергии растения, в том числе деревья, а также отходы производства и потребления, за исключением отходов, полученных в процессе использования углеводородного сырья и топлива
Биогаз
Газ, выделяемый отходами производства и потребления на свалках таких отходов
Газ, образующийся на угольных разработках

Мировой технический потенциал всех видов ВИЭ различен по своему объему. Так, доля солнечной энергии составляет 62,52 %, геотермальной энергии (на глубине до 10 километров) — 32,75 %, энергии Мирового океана — 4,47 %, энергии ветра — 0,23 %¹⁷.

Наблюдается постоянный рост использования ВИЭ в общей мировой энергетической мощности (рис. 2) [3].

¹³ О сокращении выбросов парниковых газов. Указ Президента РФ № 666 от 4 ноября 2020 года. URL: www.kremlin.ru/acts/bank/45990 (дата обращения: 13.01.2025).

¹⁴ Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. Распоряжение Правительства РФ № 3052-р от 29 октября 2021 г. URL: <http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3fWQ32e2yA0BhtlpyzWfHaiUa.pdf> (дата обращения: 13.01.2025).

¹⁵ Об основных направлениях государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2035 года. Распоряжение Правительства РФ № 1-р от 8 января 2009 года (в ред. распоряжения Правительства РФ № 1446-р от 1 июня 2021 года). URL: <http://government.ru/docs/all/66930/> (дата обращения: 13.01.2025).

¹⁶ Об электроэнергетике. Федеральный закон № 35-ФЗ от 26 марта 2003 года. Официальный сайт Президента России. URL: www.kremlin.ru/acts/bank/19336 (дата обращения: 13.01.2025).

¹⁷ Там же

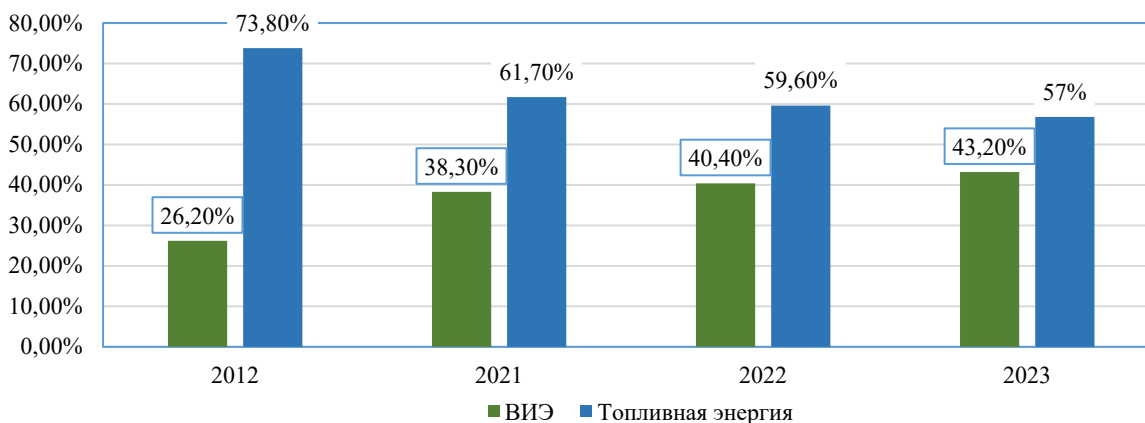


Рис. 2. Рост использования возобновляемых источников энергии

Наибольший объем выработки электроэнергии на солнечных (СЭС) и ветровых (ВЭС) электростанциях производится в Китае, далее следуют США, Индия, Германия, Бразилия. Из-за наличия большого числа гидроэлектростанций считается, что Россия в определенной степени обеспечена возобновляемыми источниками энергии, но при этом она сильно отстает почти по всем другим видам, представленным в таблице 1. Этот факт определил необходимость развития в стране возобновляемых источников энергии, которым уделяется достаточное внимание на государственном уровне. Основной упор при этом делается на реализацию государственно-частного партнерства в этой области. В частности, распоряжением правительства¹⁸ предусматривается проведение конкурсных отборов с установлением целевых показателей величин объемов ввода генерирующих объектов по видам возобновляемых источников энергии, базовых предельных величин капитальных затрат на возведение 1 кВт установленной мощности генерирующего объекта для каждого из видов, базовых предельных величин показателя эффективности и т. д.

Государственная поддержка и финансовые стимулы для развития возобновляемой энергетики в период с 2013 по 2021 год дали результаты, которые резко отличаются от эпизодических фактов предыдущих лет.

Между тем, совокупная установленная мощность ВИЭ в энергосистеме РФ еще мала, основной вклад в энергетику страны по-прежнему вносит традиционная топливная. ВИЭ составляет только 2,41 % в единой энергетической системе страны. По состоянию на 1 апреля 2024 года совокупная установленная мощность объектов ВИЭ в России составляла 6,11 ГВт с лидированием ветровых и солнечных электростанций (рис. 3).

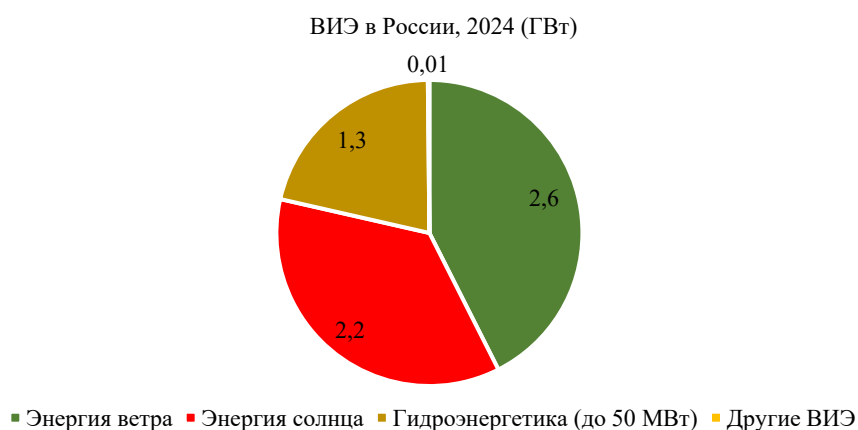


Рис. 3. Возобновляемые источники энергии в России. 2024 год

С 2013 по 2024 год в стране действовала программа ДПМ ВИЭ 1.0. Она была направлена на финансовую поддержку внедрения возобновляемых источников энергии. Проводился конкурсный отбор среди претендентов с условием заключения договоров о предоставлении мощности на ВИЭ сроком на 15 лет. Как подчеркивал заместитель директора департамента развития энергетики Министерства энергетики Российской Федерации Андрей Максимов, «инвесторы получают гарантию возврата своих вложений с фиксированной доходностью за счет платежей за мощность» [4].

¹⁸ Об основных направлениях государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2035 года. Распоряжение Правительства РФ № 1-р от 8 января 2009 года (в ред. распоряжения Правительства РФ № 1446-р от 1 июня 2021 года). URL: <http://government.ru/docs/all/66930/> (дата обращения: 13.01.2025).

Важно отметить постоянное увеличение ввода новых мощностей в этот период. Так, с 2014 по 2023 год энергетика на основе ВИЭ выросла с 1,66 до 6,11 ГВт. Наивысший пик пришелся на 2020 и 2021 годы, после чего в связи с санкциями со стороны недружественных для России государств произошел заметный спад ввода новых мощностей (рис. 4)¹⁹.

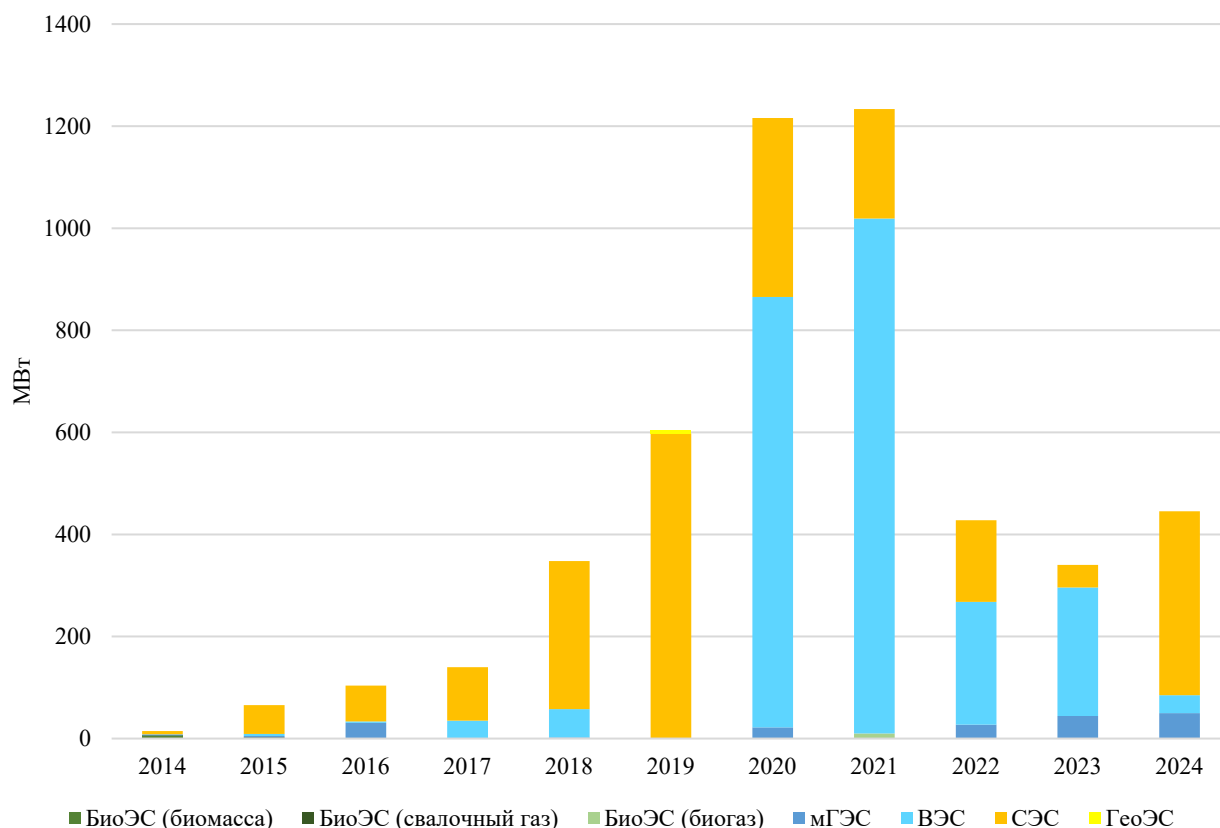


Рис. 4. Динамика ввода в эксплуатацию электростанций на возобновляемых источниках энергии в России

Зависимость производства отечественного оборудования для объектов генерации на основе использования ВИЭ от поставок комплектующих и материалов из иностранных государств привела к торможению ряда инвестиционных проектов²⁰. В то же время все ранее заявленные инвестиционные проекты продолжали свою работу. Со стороны государства были предприняты меры, направленные на конкретизацию сроков проведения конкурсных отборов по строительству генерирующих объектов ВИЭ на оптовом и розничных рынках электроэнергии, были внесены изменения в директивные документы, регламентирующие данную отрасль²¹.

Программа ДПМ ВИЭ 1.0 способствовала созданию производственной базы оборудования для ввода мощностей зелёной энергетики, которой в стране в необходимом объеме не существовало, что и определило зависимость развития этой отрасли от импортных закупок. Как отмечал А. Максимов, «итоном действия первой программы было введение новых объектов ВИЭ, но также создание научной основы для производства необходимого оборудования» [4]. С 2024 года действует программа ДПМ ВИЭ 2.0 сроком до 2035 года, нацеленная на повышение достигнутых в первой программе показателей. Между тем, во второй программе проведена коррекция оценки проектов конкурсного отбора, которая в первой программе определялась по уровню капитальных

¹⁹ Статистика ВИЭ. АРБЭ. URL: <https://reda.ru/industry/statistics/?ysclid=lxha7d8w6b624652409#graph2> (дата обращения: 13.01.2025).

²⁰ Рынок возобновляемой энергетики РФ: текущий статус и перспективы развития. Сантехника Отопление Кондиционирование. URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/rynok-vozobnovlyaemoy-energetiki-rf-tekuschiy-status-i-perspektivy-razvitiya-chast-1> (дата обращения: 13.01.2025).

²¹ О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации в части переноса сроков проведения в 2022 году конкурсного отбора инвестиционных проектов по строительству генерирующих объектов, функционирующих на основе использования возобновляемых источников энергии, на оптовом рынке электрической энергии и мощности и конкурсных отборов проектов строительства генерирующих объектов, функционирующих на основе использования возобновляемых источников энергии, на розничных рынках электрической энергии. Постановление Правительства Российской Федерации № 338 от 10.03.22г. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=460412>

О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам проведения конкурсных отборов инвестиционных проектов по строительству генерирующих объектов, функционирующих на основе использования возобновляемых источников энергии, на оптовом и розничных рынках электрической энергии и по вопросам установления отдельных особенностей государственного регулирования цен (тарифов) в электроэнергетике в 2022 и 2023 годах. Постановление Правительства Российской Федерации № 999 от 01.06.22г. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202206010030?ysclid=lxgus4o9z227009000>

О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации № 1172 от 27 декабря 2010 года. Постановление Правительства РФ № 2389 от 29.12.23 г. URL: <https://base.garant.ru/408323687/?ysclid=lxha7ty7t736108420> (дата обращения: 13.01.2025).

затрат. Теперь номинантами стали те проекты, которые продемонстрировали более высокую эффективность вводимых объектов. Первый конкурсный отбор в рамках второй программы был проведен в 2021 году, совокупная мощность поддержанных проектов составила 2,7 ГВт. Новый подход определил повышение эффективности и снижение цены объектов ВИЭ примерно на 85 %.

В работе [1] представлена дорожная карта, в которой на основе гибридного подхода эксплицированы стратегии, содействующие зелёному развитию. Выделены 12 стратегий, которые указывают на то, что стратегии нижнего уровня имеют большее значение, по сравнению со стратегиями верхнего уровня (рис. 5). В соответствии с предложенной иерархией авторами статьи проанализировано, в какой мере развитие энергетики в России соответствует названным критериям.



Рис. 5. Иерархическая структура стратегий зелёных инноваций [1]

Авторы отмечают, что основополагающим критерием этой структуры является S1 «Экологические правила и практика». Как было сказано выше, Россия является стороной Рамочной конвенции, Киотского протокола, Парижского соглашения, приняв на государственном уровне все предписываемые экологические правила и практики, о чем свидетельствует блок нормативных документов страны.

Следующей ступенью в предложенной иерархии является S5 «Финансовые стимулы, снижение налогов и субсидии». Российская Федерация на основе государственно-частного партнерства выступает движущей силой зелёной трансформации: правительством РФ²² определены меры государственной поддержки по достижению реальной конкурентоспособности технологий использования возобновляемых источников энергии на фоне технологий получения энергии на основе ископаемых видов органического топлива. Используются при этом следующие меры: льготные тарифы для продажи электроэнергии, выработанной от ВИЭ, налоговые кредиты, льготные кредиты, внедрение зелёного тарифа в России для привлечения дополнительных инвестиций²³. За время функционирования механизма поддержки и стимулирования развития ВИЭ, с 2013 по 2021 год, в России введена в эксплуатацию 121 электростанция ВИЭ, в том числе 83 СЭС, 27 ВЭС, 11 МГЭС. Важным моментом здесь является законодательная установка долей ВИЭ в энергобалансе страны.

Как видно на рис. 5, следующий по важности уровень определяется тремя позициями: S3 «Сохранение ресурсов», S4 «Минимизация затрат» и S12 «Управление выбросами углерода». Что касается S12, то, согласно Стратегии²⁴, основной акцент в управлении выбросами делается на поглощении их лесами и болотами. Территория России обладает огромными локациями лесов и болот, и существует гипотеза о том, что поглощение пар-

²² Основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2035 года. Распоряжение Правительства РФ № 1-р от 08.01.2009 г. О внесении изменений в распоряжение Правительства РФ от 08.01.2009 № 1-р. Распоряжение Правительства РФ № 1446-р от 01.06.2021 г. Легалакт — законы, кодексы и нормативно-правовые акты Российской Федерации. URL: <https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-pravitelstva-rf-ot-01062021-n-1446-r-o-vnesenii/?ysclid=m7bgc5ly4u984542445> (дата обращения: 13.01.2025).

²³ О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации в части определения особенностей правового регулирования отношений по функционированию объектов микрогенерации. Постановление Правительства Российской Федерации № 299 от 02.03.2021 г. Официальное опубликование правовых актов. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202103060015?ysclid=m7bgl0kdif79000694> (дата обращения: 13.01.2025).

²⁴ О стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. Распоряжение Правительства РФ № 3052-р от 29.10.2021 г. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/726639341?ysclid=m7bgpyga7q176688002> (дата обращения: 13.01.2025).

никовых газов превалирует над их выделением. В стране организована Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ, а на ее основе создан Национальный кадастр с информацией в стандартизованном международном формате для детальной проверки данной гипотезы²⁵. Распоряжением правительства ему придан статус инновационного проекта государственного значения²⁶.

Наряду с общепринятыми в мировой практике мерами, в Стратегии предусмотрены мероприятия по обводнению ранее осушенных болот, обеспечению пожарной безопасности болот и лесов, по развитию лесной инфраструктуры, увеличению площади лесонасаждения и др. Исследования по секвестрации углерода за счет новых интегрированных технологий для увеличения здоровья сельских угодий проводятся во многих странах [5–14].

Уровень S8 «Государственная поддержка на ранней стадии развития» доказан всем предшествующим содержанием статьи. На рис. 5 уровень S11 «Государственное финансирование» расположен предпоследним при движении вверх, то есть как менее значимая стратегия, но авторы считают, что его следует расположить на одном уровне с S8, тем более, что стратегии S6 и S7 обеспечены в большей степени именно S11, как это указано в программе «Приоритет-2030»²⁷.

Стратегиями S6 «Зеленые технологии и обучение» и S7 «Исследования и разработки» большое значение придается сотрудничеству высших учебных заведений и промышленности. Здесь следует назвать программу «Приоритет-2030», реализуемую Министерством науки и высшего образования РФ с 2016 года, которая объединила деятельность 142 вузов страны для обеспечения их интегративного вклада в достижение национальных целей развития России, в их ряду разработка технологий, которые помогут устранить негативные последствия антропогенного воздействия. Реализация программы опирается, в том числе, и на деятельность Ассоциации зелёных вузов России, объединяющей 214 университетских добровольческих команд и клубов, принимающих активное участие в природоохранных мероприятиях. Межрегиональной экологической общественной организацией «ЭКА» активно внедряется в учебные заведения программа «Зелёные вузы России» на 2021–2026 годы в целях повышения экологической культуры российского общества²⁸. Безусловно, наметившийся устойчивый экологический тренд в российских вузах не может не обнадеживать, однако запаздывание страны в развитии ВИЭ, о чем говорилось выше, отразилось и на недостаточном количестве образовательных программ, реализующих подготовку специалистов в области альтернативных энергетических технологий. Подготовка высокопрофессиональных инженеров в сфере ВИЭ, как справедливо отмечено в иерархии на рис. 5, возможна только при включении S6 и S7 в S10 «Подход, основанный на сотрудничестве и широком участии». В этой связи следует упомянуть о включении в Перечень инициатив социально-экономического развития Российской Федерации до 2030 года²⁹, наряду с такими программами, как «Политика низкоуглеродного развития» и «Чистая энергетика (водород и ВИЭ)», номинации «Передовые инженерные школы» (ПИШ). Федеральный проект «Передовые инженерные школы» направлен на подготовку специалистов для высокопроизводительных секторов экономики. ПИШ создаются на общей основе вузами и технологическими компаниями для образования платформ совместных научных разработок и проектного обучения студентов в соответствии с профилем партнеров. Одним из тематических направлений является электро- и теплоэнергетика. В работу ПИШ включено 50 вузов страны и 150 компаний. Обязательная часть проекта — привлечение внебюджетных средств. По данным Минобрнауки, в 2022 году финансирование всех ПИШ из федерального бюджета составило 2,5 млрд рублей, а компании-партнёры школ подтвердили софинансирование ещё на 3,8 млрд. В 2023 году общее финансирование составило около 10 млрд рублей, а на 2024 год было запланировано выделить около 18 млрд рублей³⁰. Остается надеяться, что в перспективе будет выбрана площадка для решения научных и технических задач в рамках ВИЭ, а также составлены образовательные программы для подготовки инженерных кадров в этой сфере [15, 16].

²⁵ В Европе все вырубил. Россия стала легкими планеты. РИА Новости. URL: <https://ria.ru/20231011/poligon-1901702366.html?ysclid=ly5mwnjkl692557096> (дата обращения: 13.01.2025).

²⁶ Об утверждении важнейшего инновационного проекта государственного значения “Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ” и плана мероприятий (“дорожной карты”) по реализации первого этапа (2022–2024 гг.) важнейшего инновационного проекта государственного значения “Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ”. Распоряжение Правительства Российской Федерации № 3240-р от 29 октября 2022 года. Официальное опубликование правовых актов. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202211010041?ysclid=ly5ob08110614670035> (дата обращения: 13.01.2025).

²⁷ Программа «Приоритет 2030». Социоцентр. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405491263/> (дата обращения: 01.02.2025).

²⁸ Программа «Зелёные вузы России» на 2021–2026 годы. Москва: Межрегиональная экологическая общественная организация «ЭКА»; 2021. 54 с. URL: <https://ecamir.ru/upload/medialibrary/5e3/03gawihqv0b752qc2u2kgvgzsz0h0r4h.pdf> (дата обращения: 13.01.2025).

²⁹ Перечень инициатив социально-экономического развития Российской Федерации до 2030 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации № 2816-р от 06.10.2021 г. URL: <http://static.government.ru/media/files/jwsYsyJKWGGQAaCSMGGrd7q82RQ5xEC03.pdf> (дата обращения: 13.01.2025).

³⁰ Современные профессиональные компетенции. Социоцентр. URL: <https://engineers2030.ru/?ysclid=ly5v13806u55404777> (дата обращения: 13.01.2025).

Что касается стратегий S2 «Долгосрочное видение» и S9 «Экологическая осведомленность», то следует согласиться с авторами [1], что программы экологической осведомленности расширяют знания и понимание проблем устойчивого развития. Долгосрочное видение обеспечивает стратегическую основу для правительств, финансовых учреждений и бизнеса, позволяющую интегрировать устойчивое развитие в планирование.

Пройдя по всем ступеням дорожной карты, можно сделать вывод об эффективности предложенной авторами [1] навигации и приоритетности факторов на примере Российской Федерации, а также выявить уровень реализации этих стратегий в движении России к устойчивому развитию.

Обсуждение и заключение. В Российской Федерации благодаря выигрышной, по сравнению со многими другими странами, обеспеченности природными ресурсами и развитию атомной энергетики интерес к промышленному использованию ВИЭ пришел значительно позже, чем в других странах. Запоздывание внедрения ВИЭ в энергосистему страны обусловлено рядом причин:

- 1) большие природные запасы топливно-энергетических ресурсов;
- 2) значительные резервы мощности объединенных энергосистем;
- 3) работа крупных ГЭС, построенных в СССР;
- 4) развитая атомная энергетика;
- 5) низкие цены и тарифы на электрическую и тепловую энергию.

Но, как утверждают российские специалисты, потенциал возобновляемых источников энергии в России тоже достаточно высок. По их оценкам, он в 178 раз превышает современный уровень энергопотребления в стране, что и определяет приоритет развития ВИЭ. Государственная политика сегодня нацелена на ликвидацию отставания РФ от других стран по количеству солнечных и ветровых ВИЭ, на создание конкурентных преимуществ зелёной энергетики по сравнению с ископаемым топливом. Большое значение при этом могло бы иметь законодательное определение сроков внедрения долей ВИЭ в энергобаланс страны.

В стране наметился и начал осуществляться переход на более активное использование возобновляемых источников энергии. При этом не следует забывать, что прогресс в каком-то сегменте неминуемо влечет за собой регресс в другом. Что, собственно, и доказано предыдущим развитием топливно-энергетической сферы. Поэтому следует продолжить углубленное изучение всего процесса перехода к зелёной энергетике. Ведь известно, что внедрение альтернативных видов энергии требует тем не менее использования ископаемого топлива, производство, транспортировка и обслуживание компонентов ВИЭ приводят к увеличению спроса на редкоземельные минералы, затрагивая тем самым проблему истощаемости природных ресурсов. Для крупномасштабного производства энергии (особенно для солнечной энергии) необходимы большие участки территории. Производство солнечных панелей ведет к выбросу парниковых газов. ВИЭ создают токсичные отходы, например, у Solar Energy, по сравнению с атомными электростанциями, их в сотни раз больше. Существует опасность возгорания солнечных батарей. Не исключено и их вредное воздействие на окружающую среду и дикую природу. Они имеют низкий коэффициент полезного действия, а также относительно короткий срок службы, к тому же являются дорогостоящими. У ВИЭ высокая степень зависимости от природных условий, имеются серьезные риски в обеспечении устойчивости функционирования.

Негативные стороны внедрения и функционирования ВИЭ, экологическая опасность, которую они несут, широко обсуждаются учеными [17–20]. Ведутся научные исследования по определению влияния ВИЭ на среду обитания, специалисты занимаются поиском технологий для устранения сопутствующих негативных факторов, увеличения мощностей электростанций. На необходимость поэтапного и продуманного движения к зелёной энергетике обратил внимание и президент РФ В.В. Путин³¹, отметив, в частности, что зелёная энергетика активно развивается, но еще долго не сможет покрывать все потребности глобальной экономики. Процессы, связанные с внедрением и стабильным функционированием зелёной энергетики, займут немало времени, так как проходят поэтапно, включают в себя в том числе и научное обоснование экспликации угроз, которые возникают с использованием ВИЭ, и определение путей их устранения. Поэтому в настоящее время, когда еще используются невозобновляемые источники энергии, необходимо сокращать выбросы парниковых газов, бороться с загрязнением окружающей среды, сохранять, восстанавливать и бережно использовать природу, повышать экологическую культуру производства и населения.

³¹ Путин счел идеи о безуглеродной энергетике опасными для цивилизации. Продукты информационной группы «Интерфакс». URL: <https://www.interfax.ru/russia/684902> (дата обращения: 13.01.2025).

Список литературы / References

1. Sajid Ullah, Farman Ullah Khan, Imran Saeed. Promoting Green Growth through Identification of Sustainable Strategies: A Hybrid Approach. *International Journal of Emerging Markets*. 2024. <https://doi.org/10.1108/IJOEM-10-2023-1586>
2. Shivanna KR. Climate Change and Its Impact on Biodiversity and Human Welfare. *Proceedings of the Indian National Science Academy*. 2022;88(2):160–171. <https://doi.org/10.1007%2Fs43538-022-00073-6>
3. Elistratov VV. Renewable Energy Trends within the Concept of Low-Carbon Development. *Applied Solar Energy*. 2022;58(4):594–599. <https://doi.org/10.3103/S0003701X22040077>
4. Максимов А.Г. ВИЭ 2.0: новая программа развития зелёной энергетики в России. *Энергетическая политика*. 2020;(11(153)):22–27. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_11153_22
5. Maksimov A. RES 2.0: New Program for the Development of “Green” Energy in Russia. *Energy Policy*. 2020;(11(153)):22–27. (In Russ.) https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_11153_22
6. Sokolova I, Pisareva A. Ecological Organization of Grain Production Based on an Innovative Approach. *E3S Web of Conferences*. 2023;463:01036. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346301036>
7. Haixia Feng, Erwei Ning, Lei Yu, Xingyu Wang, Vladimir Zyrianov. The Spatial and Temporal Disaggregation Models of High-Accuracy Vehicle Emission Inventory. *Environment International*. 2023;181(4):108287. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108287>
8. Amelung W, Bossio D, de Vries W, Kögel-Knabner I, Lehmann J, Amundson R, et al. Towards a Global-Scale Soil Climate Mitigation Strategy. *Nature Communications*. 2020;11:5427. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18887-7>
9. Nefedova L, Degtyarev K, Kiseleva S, Berezkin M. Prospects for Green Hydrogen Production in the Regions of Russia. *E3S Web of Conferences*. 2021;265:04011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126504011>
10. Bennett M, March A, Failler P. Blue Farming Potentials: Sustainable Ocean Farming Strategies in the Light of Climate Change Adaptation and Mitigation. *Green and Low-Carbon Economy*. 2024;2(2):71–86. <https://doi.org/10.47852/bonviewGLCE3202978>
11. Crowther TW, Glick HB, Covey KR, Bettigole C, Maynard DS, Thomas SM, et al. Mapping Tree Density at a Global Scale. *Nature*. 2015;525(7568):201–205. <https://doi.org/10.1038/nature14967>
12. Denny DMT, Cerri CEP, Cherubin MR, Burnquist HL. Carbon Farming: Nature-Based Solutions in Brazil. *Green and Low-Carbon Economy*. 2023;1(3):130–137. <https://doi.org/10.47852/bonviewGLCE3202887>
13. de Oliveira DC, Maia SMF, Freitas RdCA, Cerri CEP. Changes in Soil Carbon and Soil Carbon Sequestration Potential under Different Types of Pasture Management in Brazil. *Regional Environmental Change*. 2022;22(3):87. <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01945-9>
14. Lambert E, Deyganto KO. The Impact of Green Legacy on Climate Change in Ethiopia. *Green and Low-Carbon Economy*. 2024;2(2):97–105. <https://doi.org/10.47852/bonviewGLCE32021372>
15. Khudhur Jassim Hamad. Green Economy and Sustainable Development Concepts, Principles and Requirements for Transformation in Iraq. *Journal of STEPS for Humanities and Social Sciences*. 2022;1(3):1–14. <https://doi.org/10.55384/2790-4237.1089>
16. Ivanov I, Persyanova G. Training of Organizational and Managerial Personnel Responsible for the Environmental Safety Strategy. *E3S Web of Conferences*. 2023;413:03001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341303001>
17. Chernaya I, Masyuk N, Prosalova VS, Bodunkova A, Bushueva MA. University 4.0 Concept: Educational and Scientific Policies, Innovative Development of Vocational Education and Training. *Frontiers in Education*. 2023;8:1125361. <https://doi.org/10.3389/educ.2023.1125361>
18. Проценко П.П., Николаева Т.А. Оценка негативного влияния на окружающую среду альтернативных источников энергии. *Вестник АмГУ*. 2021;(93):76–78. <https://doi.org/10.22250/jasu.93.16>
19. Protsenko PP, Nikolaeva TA. Assessment of the Negative Impact on the Environment of Alternative Energy Sources. *Vestnik AmGU*. 2021;(93):76–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.22250/jasu.93.16>
20. Ebube Favour Orisa, Etim E. Akan. The Other Side: Negative Impacts of Exploiting Renewable Energy Sources. *European Journal of Engineering and Technology Research*. 2021;6(3):30–33. <https://doi.org/10.24018/ejers.2021.6.3.2384>
21. Борисова Ю.С., Самарская И.С. Сравнительный анализ влияния объектов традиционной и альтернативной энергетики на окружающую среду. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2021;(4):58–63. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-4-58-63>
22. Borisova YuS, Samarskaya NS. Comparative Analysis of the Impact of Objects of Traditional and Alternative Energy on the Environment. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2021;(4):58–63. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-4-58-63>
23. Karamov DN, Maltsev IA, Tsyrendorzhiev BB. Analysis of World Practices for Stimulating the Development of Renewable Energy Sources. A Case Study for Russian Conditions. *E3S Web Conf*. 2021;289:01017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128901017>

Об авторах:

Лариса Артаваздовна Минасян, доктор философских наук, профессор кафедры физики Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), larmin1@mail.ru

Анатолий Вячеславович Благин, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), a-blagin@mail.ru

Анна Витальевна Канеева, кандидат филологических наук, доцент кафедры Мировых языков и культуры Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), m_anna7@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Л.А. Минасян: разработка концепции, написание рукописи.

А.В. Благин: разработка концепции, научное руководство.

А.В. Канеева: написание черновика рукописи, визуализация.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Larisa A. Minasyan, Dr. Sci. (Philosoph.), Professor of the Department of Physics, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), larmin1@mail.ru

Anatoly V. Blagin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Department of Physics, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), a-blagin@mail.ru

Anna V. Kaneeva, Dr. Sci. (Philolog.), Associate Professor of the Department of World Languages and Culture, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#), m_anna7@mail.ru

Claimed Contributorship:

LA Minasyan: concept development, manuscript writing.

AV Blagin: concept development, academic advising.

AV Kaneeva: writing a draft of the manuscript, visualization.

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

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

Поступила в редакцию / Received 20.01.2025

Поступила после рецензирования / Revised 12.02.2025

Принята к публикации / Accepted 17.02.2025

МАШИНОСТРОЕНИЕ

MACHINE BUILDING



УДК 62.78

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-55-64>

Система цифрового мониторинга безопасности для авторемонтного предприятия

В.В. Егельский , Н.Н. Николаев , Е.В. Егельская ✉, Э.А. Панфилова

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

✉ egelskaya72@mail.ru

EDN: HDWZAF

Аннотация

Введение. В научной литературе описываются возможности искусственного интеллекта (ИИ) для обеспечения производственной безопасности. Рассматриваются методы контроля рисков, даются рекомендации по предотвращению инцидентов. Изучена связь между компетенциями машинистов грузоподъемных кранов и вероятностью аварий. Есть примеры использования нейросетей для определения надежности съемных грузозахватных приспособлений. Описан дистанционный мониторинг эксплуатационной безопасности. При этом недостаточно проработаны вопросы применения ИИ для контроля рисков в автосервисе. Представленное исследование призвано закрыть данный пробел. Цель работы — показать возможности использования нейросетей для формирования системы мониторинга безопасности на авторемонтном предприятии.

Материалы и методы. В качестве базовой информации использовали проектные материалы станции технического обслуживания при Центре по ремонту и обслуживанию техники. Это предприятие создали специалисты кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» (ЭТСиЛ) Донского государственного технического университета (ДГТУ). Риски классифицировали по ГОСТ ISO 12 100¹ и ГОСТ Р 58 771². Нейронные сети обучали по открытым библиотекам для языка «Питон» (Python). Модель системы цифрового мониторинга с визуализацией реализовали в системе имитационного моделирования «Эни лоджик» (AnyLogic).

Результаты исследования. Авторы представленной работы обучили 20 нейросетей и отметили пять с наименьшими значениями функций ошибок (от 74 % до 78 %). Из пяти наиболее корректно сработавших нейросетей выбрали ту, которая точнее предсказала выходной параметр — 74 %. Наилучшая нейронная сеть, определяющая уровень риска для зоны кузовного ремонта, — это многослойный персептрон с 30 нейронами во входном слое, 15 нейронами в скрытом слое и 3 нейронами в выходном слое. Ее задействовали для создания цифрового двойника, который в режиме реального времени предупреждает о потенциально опасных событиях: движении автомобиля, крана, открытии осмотровой канавы. Кроме того, обнаруживаются работники без средств индивидуальной защиты и лица без допуска в зону работ.

Обсуждение и заключение. Применение модели цифровой системы мониторинга безопасности позволит заранее обнаруживать зоны с повышенным риском проведения работ, сокращать аварийность и производственный травматизм. Внедрение этой модели в центрах по ремонту автотранспортных средств предполагает установку датчиков и систем оповещения. В перспективе планируется исследовать возможность дополнения системы мониторинга риска алгоритмами, которые помогут персоналу в ремонте конкретных видов машин.

Ключевые слова: безопасность авторемонтного предприятия, инструмент оценки риска, безопасность зоны кузовного ремонта, цифровой двойник для оценки безопасности

© Егельский В.В., Николаев Н.Н., Егельская Е.В., Панфилова Э.А., 2025

¹ ГОСТ ISO 12100–2013. Межгосударственный стандарт Безопасность машин. Основные принципы конструирования. Оценки риска и снижения риска. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/4c0/4293772097.pdf?ysclid=m4jji252s3577051840> (дата обращения: 10.11.2024).

² ГОСТ Р 58771–2019. Менеджмент риска. Технологии оценки риска. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293724/4293724640.pdf?ysclid=m4jjuuqqt740249077> (дата обращения: 10.11.2024).

Благодарности. Авторы выражают признательность коллегам за помощь при подготовке материалов исследования: Короткому Анатолию Аркадьевичу — заведующему кафедрой «ЭТСиЛ» ДГТУ, доктору технических наук, профессору, и Хвану Роману Владимировичу — доценту кафедры «ЭТСиЛ» ДГТУ, кандидату технических наук.

Для цитирования. Егельский В.В., Николаев Н.Н., Егельская Е.В., Панфилова Э.А. Система цифрового мониторинга безопасности для авторемонтного предприятия. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(1):55–64. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-55-64>

Original Empirical Research

Digital Safety Monitoring System for Auto Repair Company

Vladislav V. Egelsky^{ID}, Nikolai N. Nikolaev^{ID}, Elena V. Egelskaya^{ID}✉, Elvira A. Panfilova^{ID}

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

✉ egelskaya72@mail.ru

Abstract

Introduction. The scientific literature discusses the potential of artificial intelligence (AI) for ensuring industrial safety. Risk control methods are considered and recommendations for incident prevention are given. The relationship between the competencies of lifting crane operators and the probability of accidents has been studied. Examples of using neural networks for determining the reliability of removable lifting devices are presented. Remote monitoring of operational safety is described. However, the use of AI to manage risks in a car repair station has not been sufficiently studied. This research aims to address this gap. The aim of this work is to demonstrate the potential of neural networks in creating a safety monitoring system for an automobile repair facility.

Materials and Methods. The design materials of the service station at the equipment repair and maintenance center served as basic information. This enterprise was created by specialists of the Department of Operation of Transport Systems and Logistics at the Don State Technical University (DSTU). Risks were classified according to GOST ISO 12 100 and GOST R 58 771. Neural networks were trained using open-source libraries for the Python programming language. The digital monitoring system model with visualization was implemented using the AnyLogic simulation system.

Results. The authors of this work trained 20 neural networks and selected five with the lowest error function values (from 74% to 78%). Out of five networks that worked most correctly, one was chosen that predicted the output parameter more accurately — 74%. The neural network with the best performance was a multilayer perceptron with 30 neurons in the input layer, 15 in the hidden layer, and 3 in the output layer. It was used to create a digital twin that warned in real time about potentially dangerous events: the movement of a car, a crane, and the opening of an inspection pit. Additionally, it identified workers without personal protective equipment or access to the work area.

Discussion and Conclusion. The use of a digital safety monitoring system model will make it possible to identify high-risk work areas in advance, and reduce accidents and industrial injuries. The introduction of this model in auto repair facilities involves the installation of sensors and warning systems. In the future, we plan to explore the possibility of integrating algorithms with the risk monitoring system to help personnel repair specific types of machines.

Keywords: auto repair shop safety, risk assessment tool, body repair shop safety, digital twin for safety assessment

Acknowledgements. The authors would like to thank their colleagues for their help in preparing the research materials: Anatoly A. Korotkiy, Head of the Department of Operation of Transport Systems and Logistics at DSTU, Dr. Sci. (Engineering), Professor, and Roman V. Khvan, Associate Professor at the Department of Operation of Transport Systems and Logistics at DSTU, Cand. Sci. (Engineering).

For citation. Egelsky VV, Nikolaev NN, Egelskaya EV, Panfilova EA. Digital Safety Monitoring System for Auto Repair Company. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(1):55–64. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-55-64>

Введение. В ближайшее время методы машинного обучения будут все шире использоваться для обеспечения безопасности и оценки производственных рисков на предприятиях по ремонту транспорта. Об этом свидетельствуют активное развитие искусственного интеллекта и транспортной сферы. Как следствие, растет актуальность теоретических и прикладных исследований данной темы.

Внедряются новые, более сложные машины и оборудование. Автосервисные предприятия все шире задействуют информационные и коммуникационные технологии. Меняются производственные алгоритмы и схемы выполнения работ. Эти процессы могут быть источником вредного воздействия на людей и оборудование. Многие такие потенциально опасные ситуации все еще сложно прогнозируются. Комплексный подход в данном случае предполагает соблюдение перечисленных ниже правил.

1. Важно контролировать поведение персонала, соблюдение требований безопасности. Следует сфокусироваться на таких вопросах, как проведение работ и использование средств индивидуальной защиты (СИЗ).
2. Необходимо регулярно обновлять информацию о характеристиках и состоянии сложного технологического оборудования.
3. Сотрудники должны знать, какие средства пожаротушения есть на предприятии и как ими пользоваться.
4. Всех членов коллектива нужно ознакомить с правилами эвакуации и оказания первой помощи.

Отметим, что качество такой сложной, многофакторной системы нельзя определить по качеству ее составляющих. Общая безопасность в данном случае будет понятием более высокого порядка, и наилучшим инструментарием для ее обеспечения обладает искусственный интеллект. Учитывая очевидную нестатичность рассмотренных выше элементов, отметим важность самообучения нейросетей, которые следует привлечь для решения задач представленной научной работы.

Производственная практика подвергается внешним рискам и генерирует собственные. Невозможно полностью устранить все потенциальные угрозы, однако известны подходы к снижению, ограничению опасности. Один из них — внедрение защитных и контролирующих устройств, которые называются средствами коллективной защиты³. Задача таких решений — уменьшить вероятность вреда или его тяжесть.

В [1] подробно рассматриваются вопросы применения различных методов контроля производственных рисков, даются рекомендации для формирования и поддержки системы безопасности. В [2] приводятся примеры использования нейронных сетей для обеспечения контроля надежности съемных грузозахватных приспособлений. Есть исследования о влиянии компетенций машинистов грузоподъемных кранов на вероятность возникновения аварийных ситуаций [3].

В этом же направлении ведется патентная работа. Например, в патенте RU 2 682 020 C1 описан способ дистанционного контроля безопасности при эксплуатации объекта [4]. Решение базируется на цифровых информационно-технологических системах. Местоположение объектов контроля безопасности фиксируются по геоточкам, данные об их параметрах передаются в нейросетевую систему. Для дистанционного контроля используют видеокамеры. Комплекс объединяет серверное и мобильное программное обеспечение. Патент RU 2 534 371 C1 устанавливает способ дистанционного контроля опасных производственных объектов. Для этого задействуют:

- информационно-технологическую систему;
- средства радиочастотной идентификации;
- комплекс устройств для реализации метода.

Предлагается оснастить объекты контроля безопасности радиочастотными метками (англ. radio frequency identification — RFID). Они предназначены для записи и считывания данных через удаленные устройства, которые в патенте называют ридерами. Так фиксируются параметры безопасности контролируемых объектов и обеспечивается их дистанционная корректировка. При этом неограниченное число авторизованных пользователей получает интернет-доступ к базе данных.

Авторы [5] на примере здравоохранения рассматривают возможность применения блокчейна и интернета вещей для создания систем комплексного мониторинга.

В [6] предлагается установить на объекте датчики контроля опасности. С этой целью моделируются три ситуации:

- можно разблокировать преграды и открывать доступ на объект;
 - нельзя разблокировать преграды и открывать доступ на объект;
 - следует остановить работу промышленного оборудования.
- В последнем случае отключение произойдет при активации светозвуковых сигналов об опасности.

Методы машинного обучения рассматривались для контроля безопасности мостов и дорог. Автор [7] акцентирует внимание на обнаружении повреждений. В этом случае для обучения нейросети используют массив данных, собранных на объекте без изъездов. Эту информацию сравнивают:

- с новыми данными о целых и поврежденных объектах;
- с прогнозами из окрестности выходного сигнала нейронной сети.

Отдельного внимания заслуживает работа колумбийских ученых, посвященная использованию нейронных сетей для повышения безопасности передвижения слабовидящих людей [88]. Авторы создавали искусственные нейронные сети из коэволюционного кооперативного генетического алгоритма. Он отвечает за структурирование, модификацию и обучение нейросетей. Разработанная программа сформировала несколько нейросетей. После обучения выбрали те, которые лучше предотвращают столкновения, то есть будут полезны слабовидящему человеку.

³ О внесении изменений в трудовой кодекс Российской Федерации Часть 1. Глава 1. Ст. 4. N 498-ФЗ от 26.12.2024 г. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/ (дата обращения: 29.12.2024)

Анализ научных работ о безопасности в различных сферах выявил общие тенденции:

- проверка имеющихся в системе рисков, а также методов их снижения основана на стандартах ISO 12100 и ISO 14121;
- активно применяется машинное обучение нейронных сетей;
- широко используются датчики, системы накопления и обработки информации о состоянии объектов контроля;
- датчиками и метками следует оснащать как оборудование, так и экипировку персонала.

Отметим, однако, недостаточную проработанность вопросов использования искусственного интеллекта для контроля и снижения производственных рисков в сфере автомобильного сервиса. Представленное научное исследование призвано закрыть данный пробел. Цель работы — показать возможности использования нейросетей для формирования системы мониторинга безопасности на авторемонтных предприятиях.

Материалы и методы. Исходными материалами для научных изысканий были открытые данные об инцидентах на станциях технического обслуживания и ремонта автотранспортных средств. Принимались во внимание:

- случаи аварий, травмирования персонала;
- причины таких событий.

Исследование предполагает создание и обучение нейросетей, позволяющих оценить уровень производственного риска на авторемонтных предприятиях. Разработка может стать базой будущей единой системы мониторинга безопасности, основанной на цифровых технологиях. На рис. 1 представлена схема функционирования такой системы. Нейронная сеть показана как отдельный инструмент оценки риска.

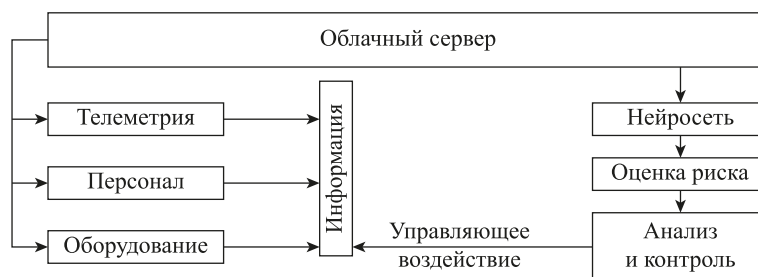


Рис. 1. Схема работы системы мониторинга безопасности предприятия автосервиса

Облачный сервер автоматически получает от датчиков сведения о телеметрии, персонале, использовании СИЗ и оборудовании. Нейронная сеть анализирует риски и выдает информацию для управляющих воздействий.

Итак, частная задача представленной научной работы — формирование искусственной нейронной сети. Для ее создания необходимо выбрать инструменты, а также входные и выходные параметры.

Авторы рассмотрели готовые платформы различных компаний — в частности, «Тензор флоу» (TensorFlow), «Пи торч» (PyTorch), «Кирас» (Keras), «Экс-джи буст» (XGBoost), «Статистика» (Statistica).

Первые четыре платформы требуют написания программного кода, а при работе со «Статистикой» в этом нет необходимости. Весь нужный функционал заложен в графическом интерфейсе. Кроме того, Statistica обладает обширным инструментарием обработки и представления данных.

Для создания нейросети используем входные данные по ремонту автомобилей на станции технического обслуживания. Этот объект — подразделение Центра по ремонту и обслуживанию техники, который создали специалисты кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета.

Рассмотрим формирование нейронной сети оценки риска для зоны кузовного ремонта. Назовем показатели безопасности, которые непрерывно меняются [9].

1. Остаточный ресурс (или срок службы) технологического оборудования. Присвоим показателю код А.
2. Остаточный ресурс (или срок службы) до проведения планового технического обслуживания или освидетельствования. Присвоим показателю код В.
3. Срок, оставшийся до планового повышения квалификации допущенных к выполнению работ специалистов. Присвоим показателю код D.
4. Срок, оставшийся до следующей проверки оборудования пожаротушения (преимущественно огнетушителей). Присвоим показателю код Е.

Перечислим показатели, которые определяются только двумя состояниями: безопасное и опасное.

1. Полнота выдачи и правильность использования спецодежды и СИЗ (выданы или не выданы, правильно или неправильно). Присвоим показателю код G.
2. Выполнение работ допущенными специалистами (да или нет). Присвоим показателю код H.
3. Освещенность зоны работ (соответствует или не соответствует нормативам). Присвоим показателю код I.
4. Температура воздуха в зоне работ (соответствует или не соответствует нормативам). Присвоим показателю код J.

5. Содержание контролируемых вредных веществ в зоне выполнения работ (соответствует или не соответствует нормативам). Присвоим показателю код К.

При необходимости набор показателей можно расширить.

Также следует выделить особый класс переменных — лингвистические качественные показатели, то есть словесные описания параметров оборудования. Например, техническое состояние оборудования «очень хорошее», «хорошее», «удовлетворительное», «плохое», «очень плохое». Такие сведения получают при опросах персонала, который работает с оборудованием. Присвоим этому показателю код С. Лингвистические оценки можно представить в численном виде с помощью функции желательности Харрингтона [10].

Итак, выше представлены буквенные обозначения кодов показателей безопасности. Они нужны для удобства введения информации в нейросеть. В таблице 1 приводятся некоторые показатели, касающиеся оборудования в зоне кузовного ремонта.

Таблица 1
Некоторые показатели безопасности технологического оборудования зоны кузовного ремонта

№	Оборудование	Код показателя		
		Остаточный ресурс (или срок службы)		Техническое состояние
		До планового техобслуживания или освидетельствования	После планового техобслуживания или освидетельствования	
1	Электрические ножницы ручные ИЗ-5403	A1	B1	C1
2	Установка газовой сварки и резки	A2	B2	C2
3	Точечный сварочный аппарат МТ-601	A3	B3	C3
4	Комбинированная электросварочная установка	A4	B4	C4

Создание и обучение нейронных сетей требует объемных выборок данных, поэтому количественные и качественные входные параметры для зоны кузовного ремонта привели к единому виду с помощью функции желательности Харрингтона. Это позволяет определить обобщенный показатель оценки риска [10].

С целью классификации выходного параметра нейронной сети воспользуемся графом, представленным в ISO 14121 (рис. 2).

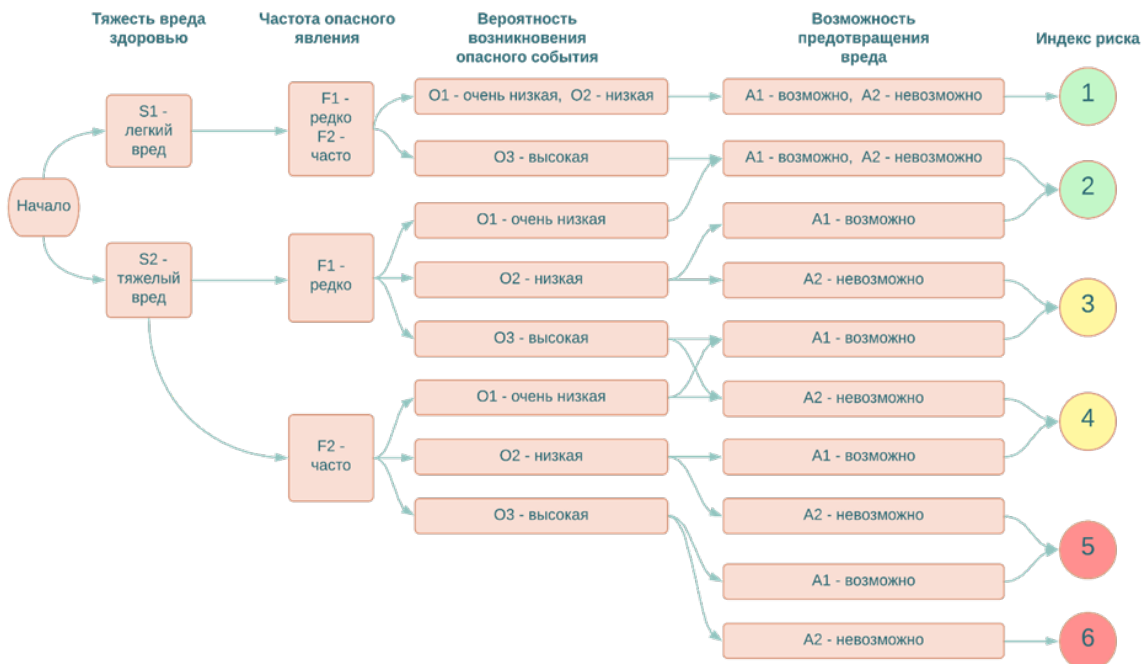


Рис. 2. Граф оценки рисков по ISO 14121 [10]

Буквенные обозначения взяли из указанного стандарта. Они не связаны с кодами в таблице 1. Следует также отметить, что данный граф — это лишь методический ориентир для оценки уровня риска, он не позволяет учесть все многообразие воздействующих факторов. Именно для этого и обучается нейронная сеть.

Для оценки каждой опасной ситуации на выходе графа учитываются описанные ниже условия:

- индекс риска, равный 1 или 2, соответствует наименьшему приоритету действий (приоритет 3);
- индекс риска 3 или 4 соответствует среднему приоритету действий (приоритет 2);
- индекс риска 5 или 6 соответствует наивысшему приоритету действий (приоритет 1).

Таким образом, можно выделить риски, которые соответствуют зеленому (наименьшему), желтому (среднему) и красному (высокому) уровню опасности. То есть выходной параметр нейронной сети — обобщенный показатель оценки риска определим как зеленый, желтый или красный.

Для обучения нейронных сетей в электронных таблицах «Эксель» (Excel) сгенерировали входные параметры для 1 тыс. вариантов показателей зоны кузовного ремонта. При меньшем количестве вариантов нейронные сети не могут качественно обнаружить все закономерности и взаимосвязи. На основе рассчитанного значения обобщенной функции желательности оценки риска [11] для каждого варианта данных определили уровень риска по трехцветной шкале. Фрагмент данных для обучения нейронной сети представлен на рис. 3. Это часть кодов, не вошедших в таблицу 1.

1	A6	A7	A8	A	SAFETY
2	0,44	0,74	0,19		ЗЕЛЕНЫЙ
3	0,97	0,22	0,65		ЖЕЛТЫЙ
4	0,79	0,73	0,17		ЗЕЛЕНЫЙ
5	0,57	0,01	0,06		ЖЕЛТЫЙ
6	0,68	0,69	0,23		ЗЕЛЕНЫЙ
7	0,67	0,61	0,08		КРАСНЫЙ
972	0,18	0,26	0,44		ЖЕЛТЫЙ
973	0,34	0,64	0,12		ЖЕЛТЫЙ
974	0,26	0,32	0,82		ЗЕЛЕНЫЙ
975	0,01	0,20	0,24		КРАСНЫЙ
976	0,66	0,65	0,14		ЖЕЛТЫЙ
977	0,86	0,56	0,79		КРАСНЫЙ
978	0,22	0,02	0,27		КРАСНЫЙ
979	0,34	0,90	0,11		ЖЕЛТЫЙ

Рис. 3. Фрагмент данных для обучения нейронной сети

Исходную информацию импортировали в таблицу данных, созданную в рабочей книге Statistica.

Модуль «Нейронные сети» среды Statistica решает задачи пяти типов:

- регрессия — regression;
- классификация — classification;
- временные ряды (регрессия) — time series (regression);
- временные ряды (классификация) — time series (classification);
- кластерный анализ — cluster analysis.

В разрабатываемой модели нейронной сети выходной параметр — это уровень риска (зеленый, желтый, красный), поэтому данная задача решается как задача классификации.

Далее необходимо выбрать тип искусственной нейросети. В рамках этой работы рассматривались:

- многослойный персептрон (multilayered perceptron, MLP);
- сеть радиальной базисной функции (radial basis function).

Система предложила, а авторы использовали:

- количество нейронов скрытого слоя;
- количество тренируемых и возвращаемых сетей;
- функции активации скрытого и выходного слоя сети.

Результаты исследования. Система разбивает входные данные на тренировочную, проверочную и контрольную выборки. Их соотношение оставили по умолчанию. В качестве функций ошибок выбрали сумму квадратов отклонений и кросс-энтропию, которые Statistica применяет для оценки качества обучения нейронных сетей.

В итоге обучили 20 нейронных сетей и отметили пять с наименьшими значениями функций ошибок (рис. 4). Система автоматически выбирала тип функции ошибок для каждой нейросети. В использованной версии Statistica окно с обученными нейронными сетями не раздвигается по вертикали, поэтому на рис. 4 показаны только три из пяти сетей. Здесь значения функции ошибок — от 76,7 % до 78 %. У скрытых на рис. 4 нейросетей 1 и 2 значения функции ошибок — 77,2 % и 74 % соответственно.

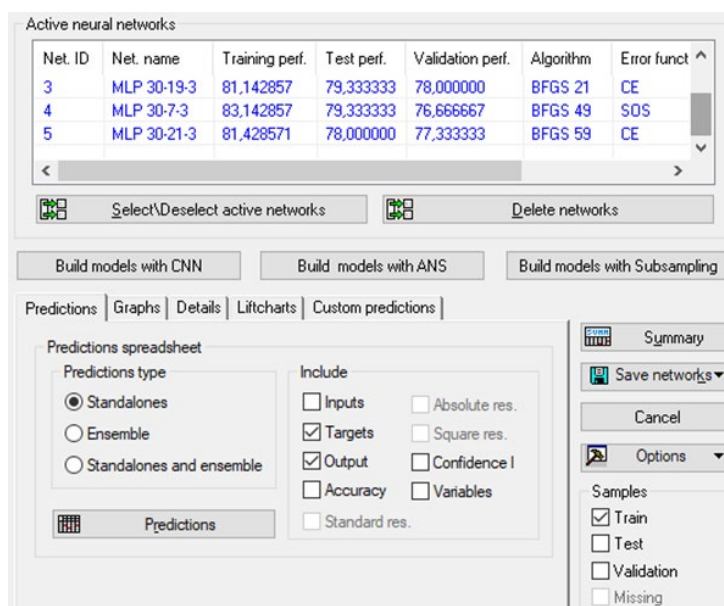


Рис. 4. Процесс обучения нейронных сетей архитектуры MLP

Ошибка нейронной сети оценивалась с помощью кросс-энтропии [12]. В качестве функции активации скрытого слоя нейронов система выбрала гиперболическую тангенциальную функцию, а для выходного слоя нейронов — многомерную логистическую функцию.

Полученную нейронную сеть после сохранения в формате xml можно загрузить и использовать для вычислений в среде Statistica. Здесь же можно сохранить нейронную сеть в виде кода на нескольких языках программирования для последующего использования в разработке программного обеспечения.

Из пяти обученных нейросетей, наиболее соответствующих проверочной и тестовой выборкам данных, определили наилучшую по точности предсказания выходного параметра — 74 %. Этот показатель выражается в процентах сходимости с выходными параметрами выборок (рис. 5).

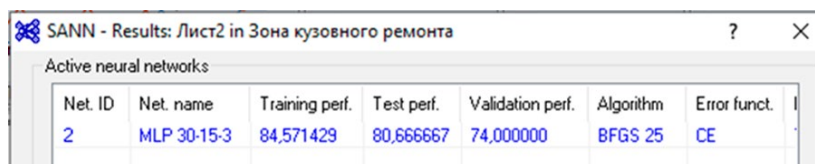


Рис. 5. Результат обучения нейронных сетей

Наилучшая нейронная сеть, определяющая уровень риска для зоны кузовного ремонта, имеет структуру MLP 30-15-3, то есть многослойный персептрон с 30 нейронами во входном слое, 15 нейронами в скрытом слое и 3 нейронами в выходном слое. Входной слой в 30 нейронов определяется количеством входящих показателей для данной рабочей зоны. В разделе «Материалы и методы» описаны 10 групп таких индикаторов. Все их невозможно привести из-за ограниченного объема статьи. При необходимости количество показателей можно увеличить.

Полученную нейросеть перевели на язык программирования «Ява» (Java). Код (рис. 6) внедрили в программу цифрового двойника [13] и систему искусственного интеллекта [14] платформы оценки безопасности автосервисного предприятия, разработанную на AnyLogic.

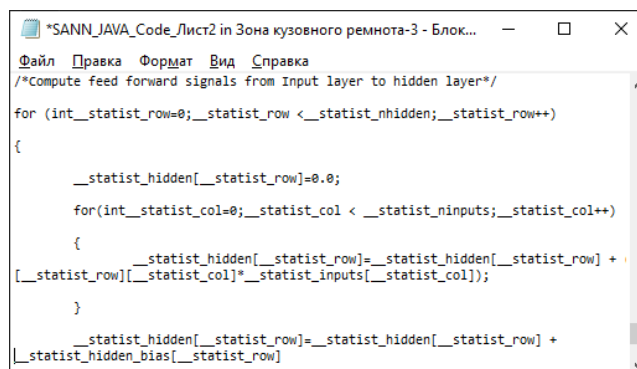


Рис. 6. Фрагмент кода нейронной сети на языке Java

Цифровой двойник платформы оценки безопасности автосервисного предприятия, разработанный на AnyLogic, представлен на рис. 7.

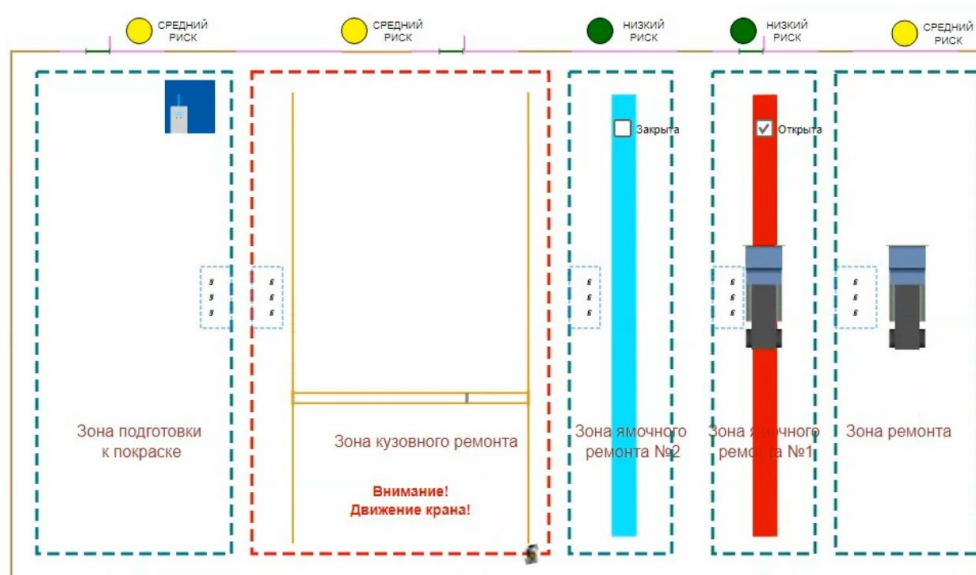


Рис. 7. Цифровой двойник платформы оценки безопасности

Цифровой двойник в режиме реального времени [15] отображает уровни риска на каждом участке производственного цеха, выводит предупреждения о потенциально опасных событиях:

- движение крана;
- въезд и выезд автомобиля;
- открытие осмотровой канавы.

Выявляются работники без средств индивидуальной защиты и лица, не имеющие допуска в зону проведения опасных работ.

В результате своевременно обнаруживаются опасные факторы производственного процесса автосервисного предприятия. Их комплексная оценка представляется как определенный уровень риска. При этом развитию неблагоприятного сценария могут препятствовать два фактора:

- персонал своевременно получает информацию об опасности в графической (цветовой) и звуковой форме;
- устраняются факторы риска, т. е. проводятся мероприятия по предупреждению аварий и производственных травм.

Обсуждение и заключение. Результаты представленного исследования закрывают один из пробелов в менеджменте рисков. Его научная новизна обусловлена спецификой работы автосервисных предприятий, которые ранее не рассматривались с этой точки зрения. Первая и наиболее вероятная сфера практического применения предложенной модели цифровой системы мониторинга безопасности — авторемонтные мастерские. Следует отметить, что практическое использование данного решения предполагает обязательную установку на объекте датчиков и систем оповещения. Применение модели цифровой системы мониторинга безопасности позволит заранее обнаруживать зоны с повышенным риском проведения работ и сократить производственный травматизм. Так, цифровой двойник платформы оценки безопасности автосервисного предприятия сгенерировал и передал следующую информацию, необходимую для контроля и управленческих решений:

- в зоне подготовки к покраске — средний уровень риска;
- в зоне кузовного ремонта — средний уровень риска, особого внимания требует движущийся кран;
- в 1-й зоне ямочного ремонта — низкий уровень риска при открытой яме;
- во 2-й зоне ямочного ремонта — низкий уровень риска при закрытой яме;
- в зоне ремонта — средний уровень риска.

В планах дальнейших исследований — развитие системы мониторинга риска в автосервисе. Ее можно дополнить элементами, которые помогут персоналу при обслуживании конкретных моделей машин. Объединение систем помощи и мониторинга позволит избежать ошибочных действий и повысит безопасность работ. Это важно при обслуживании автомобилей с особенностями конструкции — например, военных. Планируется задействовать технологию дополненной реальности и выводить на специальные экраны визуальные подсказки.

Список литературы / References

1. Панфилов А.В., Бахтеев О.А., Дерюшев В.В., Короткий А.А. Система адаптивного дистанционного мониторинга и контроля эксплуатации опасных объектов на основе риск-ориентированного подхода. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2020;(2):19–29. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-2-19-29>
- Panfilov AV, Bakhteev OA, Deryushev VV, Korotkiy AA. Adaptive Remote Monitoring and Control System for the Operation of Hazardous Facilities Based on a Risk-Based Approach. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2020;(2):19–29. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-2-19-29>
2. Егельский В.В., Николаев Н.Н., Егельская Е.В., Короткий А.А. Использование искусственного интеллекта для контроля надежности съемных грузозахватных приспособлений. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2024;(2):57–67. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-57-67>
- Egelsky VV, Nikolaev NN, Egelskaya EV, Korotkiy AA. Use of Artificial Intelligence to Monitor the Reliability of Removable Load-Handling Devices. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2024;2:57–67. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-57-67>
3. Егельский В.В., Николаев Н.Н., Егельская Е.В., Короткий А.А. Влияние компетенций специалистов грузоподъемных кранов на вероятность возникновения аварийных ситуаций. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;2:70–79. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-70-79>
- Egelsky VV, Nikolaev NN, Egelskaya EV, Korotkiy AA. Influence of the Competencies of Lifting Crane Specialists on the Probability of Emergencies. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;2:70–79. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-70-79>
4. Лагерева А.В., Лагерева И.А., Каныгин П.С., Кинжибалов А.В., Кинжибалов А.А., Кобилев А.Г. и др. Способ дистанционного контроля безопасности при эксплуатации объекта на базе цифровых информационно-технологических систем. Патент РФ № 2682020. 2019. Бюл. № 8. 14 с.
- Lagerev AV, Lagerev IA, Kanygin PS, Kinzhibalov AV, Kinzhibalov AA, Kobilev AG, et al. A Method of Remote Safety Control during the Operation of an Object Based on Digital Information Technology Systems. Patent RF No. 2682020. 2019. 14 p. (In Russ.)
5. Sanjay Kumar Jena, Ram Chandra Barik, Rojalina Priyadarshini. A Systematic State-of-Art Review on Digital Identity Challenges with Solutions Using Conjugation of IOT and Blockchain in Healthcare. *Internet of Things*. 2024;25:101111. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101111>
6. Müller E, Hopf H. Competence Center for the Digital Transformation in Small and Medium-Sized Enterprises. *Procedia Manufacturing*. 2017;11:1495–1500. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.281>
7. Le HB, Felici F, Paley JI, Duval BP, Moret J-M, Coda S, et al. Distributed Digital Real-Time Control System for TCV Tokamak. *Fusion Engineering and Design*. 2014;89(3):155–164. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2013.11.001>
8. Alvarado Coral JD, España E Muñoz. Sistema Anticolisión para Invidentes Usando Redes Neuronales Evolutivas. *Inge Cuc*. 2018;14(2):28–44. <http://doi.org/10.17981/ingecuc.14.2.2018.03>
9. Федорченко С.Г. Интегральная мера оценки состояния энергетической безопасности. *Проблемы энергетики региона*. 2014;24:1–16. URL: https://journal.ie.asm.md/assets/files/03_01_24_2014.pdf (дата обращения: 29.12.2024).
- Fedorchenko SG, Fedorchenko GS. Integral Measure of Evaluation of the Status of Energy Security. *Problems of the Regional Energetics*. 2014;24:1–16. (In Russ.) URL: https://journal.ie.asm.md/assets/files/03_01_24_2014.pdf (дата обращения: 29.12.2024).
10. Zhang Qi, Durfee EH, Satinder Singh. Risk-Aware Analysis for Interpretations of Probabilistic Achievement and Maintenance Commitments. *Artificial Intelligence*. 2023;317:103864. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2023.103864>
11. Menzefricke JS, Wiederkehr I, Koldewey Ch, Dumitrescu R. Socio-Technical Risk Management in the Age of Digital Transformation — Identification and Analysis of Existing Approaches. *Procedia CIRP*. 2021;100:708–713. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.094>
12. Popov K, Bold RDe, Chai H-K, Forde MC, Ho CL, Hyslip JP, et al. Big-Data Driven Assessment of Railway Track and Maintenance Efficiency Using Artificial Neural Networks. *Construction and Building Materials*. 2022;349:128786. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128786>
13. Liu Liu, Ningshuang Zeng, Yan Liu, Daguang Han, König M. Multi-Domain Data Integration and Management for Enhancing Service-Oriented Digital Twin for Infrastructure Operation and Maintenance. *Developments in the Built Environment*. 2024;18:100475. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100475>
14. Kutscher V, Anokhin O, Anderl R. Enhancing Digital Twin Performance Through Simulation of Computerized Numerical Control Firmware. *Procedia Manufacturing*. 2020;49:69–74. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.06.013>
15. Vogt A, Müller RK, Kampa T, Stark R, Großmann D. Concept and Architecture for Information Exchange between Digital Twins of the Product (CPS) and the Production System (CPPS). *Procedia CIRP*. 2021;104:1292–1297. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.217>

Об авторах:

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

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

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

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

Заявленный вклад авторов:

В.В. Егельский: формальный анализ.

Н.Н. Николаев: разработка методологии.

Е.В. Егельская: написание, рецензирование и редактирование статьи.

Э.А. Панфилова: валидация результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

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

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

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

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

Claimed Contributorship:

VV Egelsky: formal analysis.

NN Nikolaev: methodology development.

EV Egelskaya: writing, reviewing and editing an article.

EA Panfilova: validation of results.

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

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

Поступила в редакцию / Received 14.01.2025

Поступила после рецензирования / Revised 31.01.2025

Принята к публикации / Accepted 06.02.2025

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



УДК 669.1:66.04

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-65-71>

Оригинальное эмпирическое исследование

Объёмные изменения и структурные напряжения в стали после закалки в магнитном поле

В.Н. Пустовойт , Ю.В. Долгачев  

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

 yuridol@mail.ru

EDN: JGDGMF

Аннотация

Введение. Как известно, закалка стали сопровождается объёмными изменениями, вызванными разностью удельных объёмов превращающихся фаз. Возникающие объёмные изменения приводят к структурным напряжениям в стали. Присутствие напряжений в закаленном изделии сказывается отрицательно на сопротивлении хрупкому разрушению, что обуславливает, например, снижение безопасности при эксплуатации стальных конструкций. В связи с этим важным является совершенствование методов термической обработки (ТО) стали, которые позволяют снизить закалочные напряжения. Наложение постоянного магнитного поля в процессе фазового превращения оказывает влияние на кинетику перехода и образующиеся продукты превращения. Для этого перспективного метода ТО недостаточно данных об объёмных изменениях при закалке. Цель работы — исследование особенностей влияния постоянного магнитного поля на объёмные изменения и структурные напряжения при закалке стали.

Материалы и методы. Исследования проводились на техническом железе и углеродистых сталях 35, 45, У8, У10, У12. Магнитные поля напряженностью 1,4 и 1,6 МА/м создавались в межполюсном зазоре электромагнита ФЛ-1 конструкции МГУ. Количественная оценка объёмных изменений после обычной и магнитной закалки выполнялась путём измерения удельных объёмов методом гидростатического взвешивания.

Результаты исследования. Получены концентрационные зависимости изменения удельных объёмов углеродистых сталей при закалке в магнитном поле от температур 800 и 1 000 °С, на которых отмечалось отсутствие изменений объёмного эффекта мартенситного превращения в техническом железе и стали У10 при закалке от 800 °С, а также наличие разных по знаку изменений объёмного эффекта в сталях с содержанием углерода: от 0 до 1 % — уменьшение удельного объёма, от 1,0 до 1,2 % — увеличение удельного объёма. Расчётные данные показывают, что после закалки без поля уровень структурных напряжений возрастает с увеличением содержания углерода в аустените и повышением температуры нагрева под закалку. Влияние магнитного поля сводится к уменьшению структурных напряжений в низко- и среднеуглеродистых сталях и к их увеличению — в высокоуглеродистых. При низких температурах отпуска уровень структурных напряжений после закалки в магнитном поле для среднеуглеродистой стали 45 ниже, а для стали У12 — выше, чем после закалки без поля.

Обсуждение и заключение. Полученные данные для низко- и среднеуглеродистых сталей объясняются большей степенью распада мартенсита *in situ nascendi* при охлаждении в магнитном поле и увеличением количества мартенситной фазы в высокоуглеродистых сплавах железа. Изменение объёмного эффекта, вызванное приростом под действием магнитного поля количества мартенситной фазы, превалирует над изменением объёмного эффекта, обусловленного ее распадом в процессе закалочного охлаждения. Величина и знак наблюдаемых эффектов определяются содержанием углерода в исходном аустените, причем существует узкий диапазон концентраций, для которых магнитная закалка не оказывает практически никакого воздействия на уровень структурных напряжений. Действие магнитного поля во время отпуска несколько замедляет снижение остаточных напряжений в температурном интервале распада мартенсита. Структурные напряжения после термической

обработки в магнитном поле без учёта температурного градиента по сечению в основном определяются эффектами, полученными при закалке в магнитном поле. Усиление явлений распада мартенсита вызывает снижение, а увеличение полноты мартенситного превращения — повышение уровня структурных напряжений.

Ключевые слова: закалка, сталь, объёмные изменения, структурные напряжения, магнитное поле, отпуск

Благодарности. Авторы благодарят редакцию журнала за ценные замечания по содержанию статьи, сотрудников кафедры «Материаловедение и технологии металлов» ДГТУ, профессора Ю.М. Домбровского и доцента С.А. Гришину, за помощь в получении и обсуждении результатов.

Для цитирования. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В. Объёмные изменения и структурные напряжения в стали после закалки в магнитном поле. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(1):65–71. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-65-71>

Original Empirical Research

Volumetric Changes and Structural Stresses after Quenching in a Magnetic Field

Viktor N. Pustovoit^{id}, Yuri V. Dolgachev^{id}✉

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

✉ yuridol@mail.ru

Abstract

Introduction. As is well known, the process of steel hardening is accompanied by volumetric changes due to the difference in specific volumes of transforming phases. These volume changes result in structural stresses within the steel. The presence of these stresses in a hardened product negatively affects its resistance to brittle fracture, leading, for example, to decreased safety during operation of steel structures. In this regard, it is essential to improve heat treatment (HT) methods that reduce quenching stresses. One promising method involves applying a permanent magnetic field during phase transformation, which affects the kinetics of transition and resulting transformation products. However, there is a lack of data on volumetric changes during quenching for this method. The aim of this work is to investigate the effects of permanent magnetic fields on volumetric changes and structural stresses during steel hardening.

Materials and Methods. The research was conducted on technical iron and carbon steel 35, 45, U8, U10, U12. Magnetic fields with strengths of 1.4 and 1.6 MA/m were generated in an interpolar gap of the FL-1 electromagnet, designed by Moscow State University. Volumetric changes after conventional and magnetic quenching were quantitatively assessed by measuring the specific volumes using hydrostatic weighing method.

Results. Concentration dependencies of changes in specific volumes of carbon steels during quenching in a magnetic field at temperatures of 800 and 1 000°C were obtained. There were no changes in the volume effect of martensitic transformation in iron and U10 steel when quenching at temperatures higher than 800°C. Different changes in the volume effect were observed in steels with carbon content: from 0 to 1% — reduction in specific volume; from 1.0% to 1.2% — increase in specific volume. Calculation data showed that after quenching without a field, the level of structural stresses increased with an increase in the carbon content in austenite and an increase in the heating temperature for quenching. The influence of the magnetic field was reduced to a decrease in structural stresses in low- and medium-carbon steels and their increase in high-carbon steels. At low tempering temperatures, the level of structural stresses after quenching in a magnetic field was lower for medium-carbon 45 steel, and higher for U12 steel, than after quenching without a field.

Discussion and Conclusion. The data obtained for low- and medium-carbon steels can be explained by the increased degree of martensite decomposition “in statu nascendi” upon cooling in a magnetic field and an increase in the amount of martensite phase in high-carbon iron alloys. The change in the volume effect caused by the increase in the amount of martensite phase under the influence of a magnetic field prevailed over the change in the volume effect caused by its decomposition during the quenching cooling process. The magnitude and sign of the observed effects were determined by the carbon content in the original austenite, and there was a narrow range of concentrations for which magnetic hardening had virtually no effect on the level of structural stresses. The effect of a magnetic field during tempering somewhat slowed down the reduction of residual stresses in the temperature range of martensite decomposition. Structural stresses after heat treatment in a magnetic field, without taking into account the temperature gradient across the cross-section, were mainly determined by the effects obtained during quenching in a magnetic field. The intensification of the phenomena of martensite decomposition caused a decrease, and an increase in the completeness of the martensite transformation, an increase in the level of structural stresses.

Keywords: hardening, steel, volumetric changes, structural stresses, magnetic field, tempering

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board of the journal for their valuable comments, the staff of the Department of Materials Science and Technology of Metals at DSTU, Professor Yu.M. Dombrovsky and Associate Professor S.A. Grishin, for their help in obtaining and discussing the results.

For citation. Pustovoit VN, Dolgachev YuV. Volumetric Changes and Structural Stresses after Quenching in a Magnetic Field. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(1):65–71. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-65-71>

Введение. Известно, что закалка стали сопровождается объёмными изменениями [1], вызванными разностью удельных объёмов превращающихся фаз. Возникающие объёмные изменения [2] приводят к структурным напряжениям в стали [3]. Присутствие напряжений в закаленном изделии [4] сказывается отрицательно на сопротивлении хрупкому разрушению, что, например, обуславливает снижение безопасности при эксплуатации стальных конструкций [5].

Наложение постоянного магнитного поля в процессе фазового превращения оказывает влияние на кинетику перехода и образующиеся продукты превращения. В работах [6, 7] приведены результаты исследований изменений в тонкой структуре и фазовом составе сталей при закалке в магнитном поле. При этом показано, что при воздействии магнитного поля происходит мультипликативное зарождение кристаллов мартенсита и увеличивается темп превращения, а также повышается температура M_n до M_d с образованием мартенсита напряжения в интервале сверхпластичности превращения [8, 9]. Это приводит к увеличению объёмной доли α -мартенсита вследствие ранней активизации отпускного этапа свежесформованной α -фазы, снижению объёмной доли $A_{ост.}$ в инструментальных сталях, значительному утонению в мультиплетном профиле рентгеновского рефлекса {211}. Совокупность указанных обстоятельств приводит к изменениям в фазовом составе сталей, а также в структуре и свойствах продуктов превращения после закалки в магнитном поле.

Актуальной является разработка методов термической обработки (ТО), позволяющих снизить закалочные напряжения. Приведённые выше данные о перспективной технологии ТО с участием внешнего магнитного поля указывают на то, что структурные изменения, происходящие под действием магнитного поля в процессе закалочного превращения, могут сказываться на объёмном и напряжённом состоянии стали. Однако детального исследования влияния магнитного поля на изменения в напряжённом состоянии закаленных сталей ранее не проводилось. В связи с вышесказанным целью настоящей работы является исследование объёмных изменений и структурных напряжений, возникающих от действия постоянным магнитным полем при закалке стали.

Материалы и методы. Исследования проводились на техническом железе и углеродистых сталях 35, 45, У8, У10, У12. Магнитные поля напряженностью $H = 1,4$ и $1,6$ МА/м создавались в межполюсном зазоре электромагнита ФЛ-1 конструкции МГУ.

Объёмные изменения после обычной закалки и с наложением магнитного поля оценивались количественно путём измерения удельного объёма гидростатическим взвешиванием. На первом этапе образцы взвешивались в воздушной среде (P_B). Далее образцы, подвешенные на тонкую капроновую нить $8\phi \div 18_{\text{мм}}$, взвешивались в дистиллированной воде ($P_Ж$). Величина удельного объёма с учётом плотности дистиллированной воды $\delta_Ж$ и воздуха $\delta_В$ определялась следующим выражением:

$$v_0 = \frac{P_B - P_Ж}{P_B(\delta_Ж - \delta_В)} + \frac{1}{\delta_В}. \quad (1)$$

Результаты исследования. График, представленный на рис. 1, демонстрирует влияние магнитного поля на объёмные изменения при мартенситном превращении в углеродистых сталях, при этом за нулевую отметку принято значение удельного объёма, имеющее место при обычной закалке. Можно отметить, что знак изменения удельного объёма и его величина находятся в корреляции с температурой нагрева под закалку и содержанием углерода в стали.

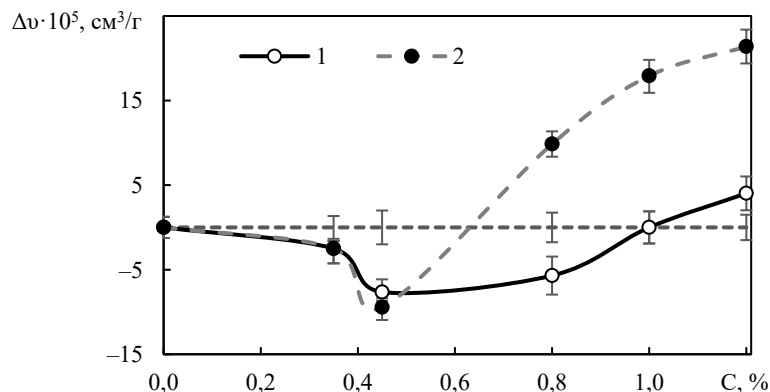


Рис. 1. Относительные изменения в удельных объёмах сталей при закалке во внешнем магнитном поле $H = 1,6$ МА/м: 1 — от 800 °C; 2 — от 1000 °C

На рис. 1, отображающем зависимость изменения удельного объёма от содержания углерода, можно отметить следующие отличительные особенности: нулевой объёмный эффект превращения в чистом железе и стали У10 при закалке от 800 °С, отличия по знаку в изменении объёмных эффектов в сталях с содержанием углерода 0 ÷ 1,0 и 1,0 ÷ 1,2 % С. При закалке с наложением магнитного поля в сталях с 0 ÷ 1,0 % С наблюдается уменьшение, а в сталях с 1,0 ÷ 1,2 % С — увеличение удельного объёма. Максимальная величина изменений в удельном объёме наблюдается при содержании 0,5 и 1,2 % углерода. С увеличением температуры закалки наблюдаются изменения в величинах эффектов от действия поля, а также смещение точки, имевшей нулевое объёмное изменение, к более низкоуглеродистым сталям.

Возникновению структурных напряжений в сплаве способствуют объёмные изменения в процессе фазовой трансформации, а также их неоднородность распределения по микрообъёмам [10, 11]. Структурные напряжения могут быть вычислены по методике расчёта, представленной в работе [12], которая позволяет определить напряжения тангенциального, осевого и радиального направления в сплошном цилиндре, если принять, что в анализируемом сечении отсутствует температурный градиент. Действие магнитного поля при закалке на структурные напряжения можно оценить с помощью выражения для вычисления тангенциальной составляющей напряжений на поверхности:

$$\sigma_{\tau} = -\frac{E \cdot l}{2(1-\mu)}, \quad (2)$$

где l — относительное значение структурной деформации на этапе превращения; E — модуль упругости; μ — коэффициент Пуассона.

При оценке l были использованы объёмные характеристики фаз и данные измерения удельных объёмов образцов такого малого размера, что можно пренебречь перепадом температуры между сердцевиной и поверхностью. Данные таблицы 1 показывают, что для случая обычной закалки структурные напряжения растут с концентрацией углерода в исходной фазе и с температурой закалки.

Таблица 1

Структурные напряжения (σ_{τ}) при различных режимах закалки

Сталь	σ_{τ} , МПа, при температуре закалки, °С*		Сталь	σ_{τ} , МПа, при температуре закалки, °С*	
	800	1 000		800	1 000
45	$\frac{-600,9}{-549,6}$	$\frac{-621,2}{-564,5}$	У10	$\frac{-795,4}{-795,4}$	$\frac{-923,2}{-1028,7}$
У8	$\frac{-774,9}{-766,6}$	$\frac{-903,8}{-939,4}$	У12	$\frac{-798,6}{-819,7}$	$\frac{-888,3}{-1007,0}$

*Числитель — закалка без магнитного поля; знаменатель — в поле $H = 1,6$ МА/м.

Результаты расчёта структурных напряжений, вызванных превращениями при часовом отпуске закаленных от 1 000 °С углеродистых сталей, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Структурные напряжения после закалки и отпуска

Сталь	Напряженность магнитного поля*, МА/м	σ_{τ} , МПа, при температуре отпуска, °С (с учётом предела текучести аустенита)					
		20	100	150	200	250	300
45	0/0	-421,1	-254,1	-205,3	-163,7	-140,8	-122,2
	0/1,4	-421,2	-273,0	-215,4	-162,9	-140,7	-122,2
	1,6/0	-364,5	-226,1	-196,7	-164,8	-141,1	-122,1
	1,6/1,4	-364,5	-234,4	-200,4	-165,4	-141,7	-122,1
У12	0/0	-688,3	-527,8	-490,7	-536,4	-527,0	-484,2
	0/1,4	-688,3	-584,6	-536,5	-573,7	-531,4	-484,2
	1,6/0	-807,0	-691,7	-634,6	-627,8	-530,7	-484,1
	1,6/1,4	-807,0	-741,6	-670,1	-671,3	-532,7	-484,1

*Числитель — при закалке, знаменатель — при отпуске.

Обсуждение и заключение. Наблюдаемые на рис. 1 эффекты для сталей с низким и средним содержанием углерода обусловлены протеканием отпускных процессов непосредственно при закалочном охлаждении в магнитном поле, а для сталей с высоким содержанием углерода — увеличением объёмной доли α -фазы. Анализ результатов теоретических расчётов [1] показывает, что для стали 45 после закалки в магнитном поле изменение $\Delta v = -9 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3/\text{г}$ вызвано снижением содержания на $0,04 \div 0,05 \text{ \% C}$ в мартенсите. Наблюдающееся для стали с содержанием углерода $1,2 \text{ \%}$ изменение $\Delta v = 22 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3/\text{г}$ обусловлено увеличением объёмной доли α -фазы на $4\text{--}5 \text{ \%}$, если принять, что содержание углерода в мартенсите при закалке в магнитном поле не изменяется по сравнению с обычной закалкой.

Сравнение данных графика на рис. 1 и результатов исследования тонкой структуры мартенсита обычной и магнитной закалки [6, 7] позволяет прийти к выводу, что изменение объёмного эффекта, вызванное приростом под действием магнитного поля количества мартенситной фазы превалирует над изменением объёмного эффекта, обусловленного ее распадом в процессе закалочного охлаждения.

Эффект от действия поля проявляется в понижении структурных напряжений в сталях с низким и средним содержанием углерода и их повышении в сталях с высокой концентрацией углерода (данные таблицы 1). Например, после закалки в магнитном поле сталей с $0,45 \text{ \%}$ и $1,2 \text{ \% C}$ с температуры $1\,000 \text{ }^\circ\text{C}$ уровень структурных напряжений в первом случае падает на $10 \text{ \%}$, а во втором случае возрастает на $13 \text{ \%}$. Сравнивая полученные результаты с данными рентгеноструктурных исследований [6, 7], можно отметить, что знак и величина эффектов обусловлены концентрацией углерода в исходной γ -фазе. Характерно, что есть концентрации, для которых закалка в магнитном поле незначительно изменяет значения структурных напряжений. Объяснить указанные эффекты от действия магнитным полем для сталей с низким и средним содержанием углерода можно усилением отпускных процессов непосредственно при образовании мартенсита в процессе закалки, а для сталей с высоким содержанием углерода — увеличением объёмной доли мартенсита.

Формирование остаточных напряжений в процессе закалки стали [13, 14] начинается, как известно, при $T_{\text{упр}}$ — температуре перехода материала из пластичного состояния в упругое. Поэтому структурные напряжения, возникающие при закалке [15, 16], складываются из напряжений, обусловленных изменением удельного объёма сплава при охлаждении от температуры $T_{\text{упр}}$ до M_n . Расчёт последних по формуле (2) показывает, что при охлаждении сплава до температуры M_n на поверхности сплошного цилиндра возникают растягивающие напряжения, превосходящие для всех исследуемых сплавов предел текучести аустенита (200 МПа). В связи с этим после закалки напряжения на поверхности сплошного цилиндра будут меньше приведенных в таблице 1 на величину предела текучести аустенита.

По данным таблицы 2 видно, что при низких температурах отпуска уровень структурных напряжений после закалки в магнитном поле для среднеуглеродистой стали 45 ниже, а для стали У12 — выше, чем после закалки без поля. Действие магнитного поля во время отпуска несколько замедляет снижение остаточных напряжений в температурном интервале распада мартенсита.

Таким образом, величина структурных напряжений после термической обработки в магнитном поле при отсутствии температурного градиента по сечению в значительной мере определяется эффектами, полученными при закалке в магнитном поле. Усиление явлений распада мартенсита вызывает снижение, а увеличение полноты мартенситного превращения — повышение уровня структурных напряжений.

Список литературы / References

1. Юрьев С.Ф. *Удельные объёмы фаз в мартенситном превращении аустенита*. Москва: Металлургиздат; 1950. 48 с.
2. Yurev SF. *Specific Volumes of Phases in the Martensitic Transformation of Austenite*. Moscow: Metallurgizdat; 1950. 48 p. (In Russ.)
3. Габелая Д.И., Кабаков З.К., Машченко М.А. Расчет изменения удельных объемов сплавов системы Fe — C в зависимости от содержания углерода и температуры. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2019;62(8):627–631. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-8-627-631>
4. Gabelaya DI, Kabakov ZK, Mashchenko MA. Calculation of Changes in Specific Volumes of Fe – C System Alloys Depending on Carbon Content and Temperatures. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019;62(8):627–631. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-8-627-631>
5. Villa M, Niessen F, Somers MAJ. In Situ Investigation of the Evolution of Lattice Strain and Stresses in Austenite and Martensite During Quenching and Tempering of Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2018;49:28–40. <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4387-0>
6. He BB, Liu L, Huang MX. Room-Temperature Quenching and Partitioning Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2018;49:3167–3172. <https://doi.org/10.1007/s11661-018-4718-9>

5. Вернези Н.Л. Коэффициент вариации предела текучести металла новых и долгое время эксплуатировавшихся строительных конструкций. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(3):44–54. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-44-54>
- Vernezi NL. Variation Coefficient of Metal Yield Strength in New and Long-Used Building Structures. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;7(3):44–54. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-44-54>
6. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В. Структурное состояние мартенсита и остаточного аустенита в углеродистых сталях после закалки в магнитном поле. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2022;(12(810)):10–14. <https://doi.org/10.30906/mitom.2022.12.10-14>
- Pustovoyt VN, Dolgachev YuV. Structural State of Martensite and Retained Austenite in Carbon Steels after Quenching in Magnetic Field. *Metallvedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2022;(12(810)):10–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.30906/mitom.2022.12.10-14> (In Russ.)
7. Pustovoyt VN, Dolgachev YuV, Egorov MS, Mozgovoy AV. Quantitative Structural-Phase Analysis of Changes in Steel after Quenching in Magnetic Field. *Metallurgist*. 2023;66(9–10):1241–1247. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01437-z>
8. Долгачев Ю.В., Пустовойт В.Н. Зарождение мартенсита напряжения в состоянии предмартенситной неустойчивости решетки. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(1):58–65. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-1-58-65>
- Dolgachev YV, Pustovoyt VN, Vernigorov YM. Stress Martensite Nucleation in a State of Premartensitic Lattice Instability. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(1):58–65. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-1-58-65>
9. Padmanabhan KA, Balasivanandha Prabu S, Mulyukov RR, Nazarov Ayrat, Imayev RM, Ghosh Chowdhury S. Environmental Superplasticity. In: *Superplasticity. Engineering Materials*. Berlin: Springer; 2018. P. 219–233. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31957-0_6
10. Krauss G. *Steels: processing, structure, and performance*. ASM International. 2015. 704 p
11. XiaoLei Wu, Ping Jiang, Liu Chen, Fuping Yuan, Yuntian T Zhu. Extraordinary Strain Hardening by Gradient Structure. *Proceedings of the National Academy of Sciences. U.S.A.* 2014;111(20):7197–201. <https://doi.org/10.1073/pnas.1324069111>
12. Беленов Ф.С. Кинетика закалки и определение временных закалочных напряжений. *Журнал теоретической физики*. 1952;22(1):111–120.
- Belenov FS. Kinetics of Quenching and Determination of Temporary Quenching Stresses. *Zhurnal teoreticheskoi fiziki*. 1952;22(1):111–120. (In Russ.)
13. Самойлович Ю.А. Временные и остаточные напряжения в прокатных валках при электрозакалке. *Сталь*. 2015;(1):51–56.
- Samoilovich YuA. Temporary and Residual Stresses in Rolling Rolls during Electric Tempering. *Stal'*. 2015;(1):51–56. (In Russ.)
14. Allain SYP, Gaudez S, Geandier G, Hell JC, Goune M, Danoix F, et al. Internal Stresses and Carbon Enrichment in Austenite of Quenching and Partitioning Steels from High Energy X-ray Diffraction Experiments. *Materials Science and Engineering: A*. 2018;710:245–250. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.10.105>
15. Dossett JL, Totten GE. Heat Treating of Irons and Steels. Vol. 4D. ASM International; 2014. 588 p. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v04d.9781627081689>
16. Навин Р.И., Динеш Бабу П., Маримусу П., Фалке С.С. Распределение остаточных сжимающих напряжений в стальных зубчатых колесах после индукционной закалки: влияние параметров на искажения, твердость и фазовый состав. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2021;(8(794)):48–55.
- Navin RI, Dinesh Babu P, Marimuthu P, Phalke SS. Distribution of Residual Compressive Stresses in Induction Hardened Steel Gears: Effect of Parameters on Distortion, Hardness and Phase Composition. *Metallvedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2021;(8(794)):48–55. (In Russ.)

Об авторах:

Виктор Николаевич Пустовойт, доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), pustovoyt45@gmail.com

Юрий Вячеславович Долгачев, доктор технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), uridol@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

В.Н. Пустовойт: разработка концепции, научное руководство, разработка методологии, административное руководство исследовательским проектом, предоставление ресурсов, написание черновика рукописи.

Ю.В. Долгачев: проведение исследования, формальный анализ, валидация результатов, визуализация, рецензирование и редактирование рукописи.

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](#), 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 (344003, Russian Federation, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), [SPIN-code](#), [ORCID](#), yuridol@mail.ru

Claimed Contributorship:

VN Pustovoyt: concept development, academic advising, methodology development, administrative management of the research project, provision of resources, writing a draft of the manuscript.

YuV Dolgachev: research, formal analysis, validation of results, visualization, review and editing of the manuscript.

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

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

Поступила в редакцию / Received 30.11.2024

Поступила после рецензирования / Revised 25.12.2024

Принята к публикации / Accepted 09.01.2025

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



УДК 67.08

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-72-80>

Использование соломы, угля и пенопласта для улучшения термических и механических характеристик полиуретана

И.Р. Антибас

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

✉ Imad.antypas@mail.ru

EDN: KPYSHG

Аннотация

Введение. Полиуретан, состоящий из полиола и изоцианата, считается одним из самых эффективных теплоизоляционных материалов. Вероятно, его изоляционные качества можно усилить, если добавить такие наполнители, как солома, уголь и пенопласт. При этом есть риск ухудшения сцепления. В литературе описано введение добавок в полиуретан как укрепляющих компонентов. Незначительные объемы наполнителей объясняются необходимостью сохранить однородность образцов. Отметим, что большинство добавок не оказали значительного влияния на термические свойства. Цель данного исследования — изучить возможность повышения термических и механических характеристик полиуретана добавлением наполнителей.

Материалы и методы. Изучались образцы полиуретана компании «Даумерк» (Daumerk, Турция) с различными добавками: четыре образца без наполнителей и шесть с добавлением 5 % и 10 % угля, соломы и пенопласта. Теплопроводность оценивали методом горячей пластины. Для испытания на сжатие задействовали устройство, обеспечивающее нагрузку до 5000 Н. Акустические свойства измеряли прибором для оценки звукопоглощения.

Результаты исследования. Образец, содержащий 63 % изоцианата и 37 % полиола, обладает наименьшей плотностью (33 кг/м³). Причины: отсутствие наполнителей и однородная структура материала. Добавление 5 % наполнителей не оказало значительного влияния на плотность образца, потому что плотности соломы и пенопласта близки к плотности полиуретана без добавок. Низкое водопоглощение — у образцов без добавок (50 % изоцианата и 50 % полиола) и с добавкой пенопласта 5% (62 % изоцианата и 33 % полиола). При увеличении доли изоцианата водопоглощение растет. Образцы с более высокой плотностью и без наполнителей демонстрируют лучшие показатели звукопоглощения. При низком содержании добавок (5 %) звукопоглощение увеличивается благодаря однородности структуры. При более высоком объеме добавок (10 %) звукопоглощение снижается из-за недостаточно прочных связей в материале. Добавка 10 % пенопласта обеспечивает максимальную устойчивость к воде.

Обсуждение и заключение. Оптимальное содержание наполнителей улучшает термические, механические и акустические характеристики полиуретана, открывая новые возможности для его применения. Большой объем наполнителей негативно сказывается на свойствах материала. Так, высокое содержание соломы заметно повышает водопоглощение. Рекомендуется использовать 5 % соломы с 62 % изоцианата и 33 % полиола. Теплопроводность этого состава — 0,023 Вт/м·К, плотность — 37 кг/м³, прочность на сжатие — 358 кН/м². Результаты исследования подтверждают возможность и целесообразность использования наполнителей (особенно угля и соломы) в производстве полиуретановых материалов. Модифицированный состав будет дешевле и с лучшими физическими характеристиками. Задачей дальнейших исследований может быть изучение других видов наполнителей для полиуретана.

Ключевые слова: теплоизоляционные свойства полиуретана, полиуретан с добавлением угля, полиуретан с добавлением соломы

Благодарности. Автор благодарит за помощь в проведении исследования и работе над статьей Ю.Н. Костюка — кандидата технических наук, доцента кафедры общей и инженерной геологии Института наук о Земле Южного федерального университета.

Для цитирования. Антибас И.Р. Экспериментальные исследования по улучшению свойств модифицированного материала. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(1):72–80. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-72-80>

Original Empirical Research

The Use of Straw, Coal and Foam to Improve Thermal and Mechanical Properties of Polyurethane

Imad R. Antibas 

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

✉ Imad.antypas@mail.ru

Abstract

Introduction. Polyurethane, a material composed of polyol and isocyanate, has been recognized as one of the most efficient thermal insulation materials. However, its insulating properties can be further enhanced by incorporating additives such as straw, coal, or foam. Nevertheless, there is a concern regarding the potential for reduced adhesion. The literature describes the introduction of additives into polyurethane as strengthening components. The limited volumes of fillers are justified by the need to maintain the uniformity of the samples. It should be noted that most additives did not significantly impact the thermal properties of the material. The aim of this research is to investigate the possibility of improving thermal and mechanical characteristics of polyurethane by adding fillers.

Materials and Methods. Samples of polyurethane from the company "Daumerk" (Turkey), with various additives, were experimentally studied. In the first stage, four samples were prepared without fillers, and in the second stage, six more samples were created with 5% and 10% additions of coal, straw, and foam. Thermal conductivity was assessed using a hot plate method, while compression testing was conducted using a device that could apply loads up to 5,000 N. Acoustic properties were measured with an instrument that evaluated the sound absorption coefficient.

Results. The sample containing 63% isocyanate and 37% polyol had the lowest density of 33 kg/m³. This was due to the absence of fillers and the homogeneous structure of the material. Adding 5% fillers did not significantly affect the density of the sample because the densities of straw and foam were close to the density of polyurethane without additives. Low water absorption was found in samples without additives (50% isocyanate and 50% polyol) and with 5% addition of foam (62% isocyanate and 33% polyol). As the proportion of isocyanate increased, water absorption increased. Samples with higher density and no fillers had better sound absorption. With a low additive content (5%), sound absorption increased due to the homogeneity of the structure. However, with a higher additive volume (10%), sound absorption decreased due to weaker bonds in the material. Adding 10% foam provided maximum resistance to water.

Discussion and Conclusion. The optimal filler content improves thermal, mechanical, and acoustic properties of polyurethane, opening up new possibilities for its application. However, a large volume of fillers can have a negative effect on the material's properties. For example, a high straw content can significantly increase water absorption. Therefore, it is recommended to use 5% straw content in combination with 62% isocyanate and 33% polyol, resulting in a thermal conductivity of 0.023 W/m·K, a density of 37 kg/m³, and a compressive strength of 358 kN/m². These results confirm the feasibility and possibility of using fillers, such as coal and straw, in the production of polyurethane materials. A modified composition with these fillers would be cheaper and possess better physical properties than the original material. Further research could focus on studying other types of fillers for polyurethane.

Keywords: thermal insulation properties of polyurethane, polyurethane with the addition of coal, polyurethane with the addition of straw

Acknowledgments. The author would like to thank Yu.N. Kostyuk, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of General and Engineering Geology of the Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University.

For citation. Antibas IR. The Use of Straw, Coal and Foam to Improve Thermal and Mechanical Properties of Polyurethane. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(1):72–80. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-72-80>

Введение. Глобальная энергетическая повестка обусловила активные исследования теплоизоляционных материалов. Изучается их эффективность, связанная с характеристиками и структурой [1]. Одним из лучших изоляционных материалов считается полиуретан — затвердевшая пена из полиола и изоцианата [2]. В этот состав можно вводить натуральные наполнители, но немного, иначе ухудшится сцепление [3].

В научной литературе приводятся доказательства, что добавление соломы и угля может улучшить термические, механические и акустические свойства полиуретана [4].

Авторы [5] получили набор образцов, смешав очищенную почву, нагретую до температуры 105 °С, с компонентами полиуретана. Некоторым образцам придали форму, другие взяли после свободного вспенивания. Провели испытания на сжатие, гибкость, текучесть и замерзание. Результаты сопоставили с данными опытов по образцам из мрамора, керамики и базальта. Установлено, что у смеси с очищенной почвой — лучшая ударная прочность. Однако нужно учитывать более низкий удельный вес полиуретановых образцов.

Исследователи [6] интегрировали переработанный и чистый полиуретан в различных соотношениях (максимум — 10%). Образцы с увеличенным количеством переработанного полиуретана быстрее вспенивались и обладали лучшими характеристиками на растяжение и сжатие.

В [7] в качестве наполнителя для полиуретана рассматривается скорлупа грецких орехов и фундука. Доказано, что эти добавки хорошо сочетаются с компонентами полиуретана. Даже небольшой их объем повышает механические свойства и термическую стабильность образцов.

В [8] показана возможность использования силикагеля как армирующей добавки для полиуретана. Изучались четыре образца с 0 %, 1 %, 3 % и 5 % силикагеля. Испытания показали, что при 5 % теплопроводность снижается до 0,0268 (Вт/м·К) в сравнении с материалом без наполнителя 0,0314 (Вт/м·К). Напряжение и прочность на сжатие увеличиваются на 18 % при добавлении 3 % силикагеля, но снижаются, если объем наполнителя превышает 3 %.

Автор [9] добавлял в полиуретан оболочки зерновых культур и резину от переработанных шин. Установлена оптимальная пропорция добавок: 5 % оболочек зерновых и 15 % резины. Такое соотношение обеспечивает максимальную механическую прочность материала.

Цель научных изысканий, описанных в представленной статье, — изучить возможность улучшения свойств полиуретана с помощью добавок: соломы, угля и пенопласта. Предполагается, что предложенное решение позволит снизить теплопроводность при сохранении хороших механических, акустических и физических характеристик. В этом случае можно будет говорить об экономической целесообразности использования модифицированного материала для повышения энергоэффективности объектов. Причем сам состав должен быть более доступен по цене, т. к. компоненты полиуретана частично заменяются дешевыми наполнителями.

Материалы и методы. В ходе тепловых, физических, механических и акустических испытаний изучались образцы полиуретана компании «Даумерк» (Daumerk, Турция) с добавками и без них.

Подготовка образцов. На первом этапе экспериментов подготовили четыре образца полиуретана. Основные компоненты смешали без добавления наполнителей и залили в форму (рис. 1).



Рис. 1. Деревянная форма для образцов

Размеры деревянной формы: 150×150×10 мм. На дно и внутреннюю поверхность крышки нанесли прозрачный клей, чтобы смесь не прилипла к форме. После заливки смеси крышку прикрепили четырьмя винтами.

В таблице 1 представлены образцы с различными соотношениями компонентов полиуретана.

Таблица 1

Компоненты полиуретана в составе образцов, %

Компонент	Номер образца			
	1	2	3	4
Изоцианат	50	60	63	65
Полиол	50	40	37	35

На втором этапе выбрали оптимальные соотношения изоцианата и полиола и сделали шесть новых образцов. В них добавляли по 5 % и 10 % коксового угля, соломы и пенопласта (таблица 2).

Таблица 2

Состав образцов с наполнителями, %

Номер образца	5	6	7	8	9	10
Изоцианат	62	60	62	60	62	60
Полиол	33	30	33	30	33	30
Наполнитель	Пенопласт — 5	Пенопласт — 10	Солома — 5	Солома — 10	Уголь — 5	Уголь — 10

Термические испытания. Использовали прибор ХТК («Хайлайт Тех Корп», НТС — Highlight Tech Corp, Китай), который позволяет определять теплопроводность методом горячей пластины в соответствии с американским стандартом ASTM C177¹ (рис. 2).



Рис. 2. Прибор для определения коэффициента теплопроводности

Прибор учитывает ток и приложенное напряжение — и таким образом измеряет тепловой поток Q между разными сторонами образца, а также разницу температур ΔT между его верхней и нижней поверхностями. Зная размеры образца (площадь A и толщину l), можно определить коэффициент теплопроводности λ :

$$Q = A \cdot \lambda \cdot \frac{\Delta T}{l} \rightarrow \lambda = Q \cdot \frac{1}{A \cdot \Delta T}. \quad (1)$$

Для обеспечения точности результатов прибор предварительно откалибровали по трем эталонным образцам из полистирола, полиэтилена и пенопласта с известной теплопроводностью [10]. После этого построили калибровочный график (рис. 3).

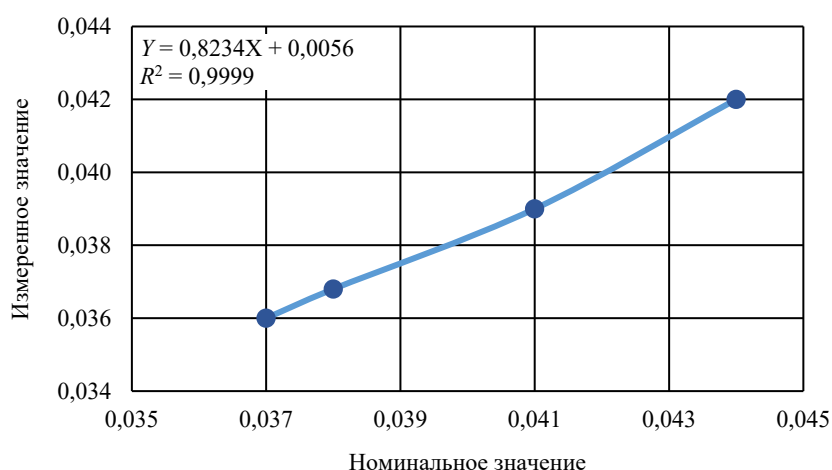


Рис. 3. Калибровочный график прибора для измерения теплопроводности:
 R^2 — коэффициент детерминации; Y — изменяемая величина

Общая погрешность в измерении коэффициента — 5–7 %.

¹ ASTM C177–19. Standard Test Method for Steady-State HeatFlux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus. URL: <https://www.astm.org/c0177-19.html> (дата обращения: 05.12.2024).

Испытание на сжатие. Испытание на сжатие проводили в соответствии с ISO 844². Использовалось устройство (рис. 4), которое позволяет приложить к поверхности образца нагрузку сжатия до 5000 Н с заданной скоростью. К образцам со сторонами 10×10 мм прикладывалась нагрузка со скоростью 1 мм/мин до появления деформации. Результаты фиксировал подключенный к устройству компьютер со специальным программным обеспечением.



Рис. 4. Устройство для испытания на прочность при сжатии

Определение плотности. Для определения плотности образцов в соответствии со стандартом ASTM C1622³ вычисляли соотношения веса и объема. Для этого использовали:

- весы с погрешностью $\pm 0,001$ г (рис. 5 а),
- штангенциркуль с точностью до $\pm 0,01$ мм (рис. 5 б).



а)



б)

Рис. 5. Устройства для определения плотности:
а — весы; б — штангенциркуль

² ISO 844:2021. *Standard Practice for Verification of Testing Frame and Specimen Alignment under Compressive Axial Force Application*. URL: <https://cdn.standards.itech.ai/samples/73560/24ff667df32b4981b29aa870b385bba2/ISO-844-2021.pdf> (дата обращения: 05.12.2024).

³ ASTM-C1622:2005-Standard. *Test Method for Apparent Density of Rigid Cellure Plastics*. URL: <https://pdfstandards.shop/product/publishers/astm/astm-c1622-4/> (дата обращения: 05.12.2024).

Таким образом, объем вычисляли с точностью до $\pm 0,01 \text{ мм}^3$, а затем определяли плотность образцов по формуле:

$$\rho = \frac{m}{v}, \quad (2)$$

где m — масса образца, кг; v — объем образца, мм^3 .

Определение водопоглощения. Для определения водопоглощения образцы погружали в воду на некоторое время. Его устанавливали в соответствии со стандартом ASTM D2842⁴. Процент водопоглощения рассчитывается как разница в весе образца до и после погружения, деленная на вес образца до погружения.

Определение звукопоглощения. Для измерения коэффициента звукопоглощения использовали прибор, который работает по принципу «передатчик — приемник» в соответствии с ISO 10534-1⁵ (рис. 6).



Рис. 6. Прибор для измерения коэффициента звукопоглощения

Образец размещают между звуковым передатчиком и приемником и отправляют звуковую волну с определенной энергией. Затем измеряют энергию волны, сканируют и анализируют частотный диапазон и определяют коэффициент звукопоглощения.

Комплект оборудования:

- двойной электронный осциллограф;
- вибратор с частотным диапазоном (1–10 кГц);
- углеродный усилитель для передачи звуковых волн;
- микрофон для приема звуковых волн;
- металлические основания для крепления усилителя и микрофона;
- мост, по которому скользят усилитель и микрофон;
- измеритель энергии.

Зная энергию волны до и после установки образца, можно рассчитать коэффициент звукопоглощения:

$$\alpha = \frac{E}{E_0}, \quad (3)$$

где α — коэффициент звукопоглощения; E — энергия волны после установки образца (вольт); E_0 — энергия волны до установки образца (вольт).

⁴ ASTM D2842–19. *Standard Test Method for Water Absorption of Rigid Cellular Plastics*. URL: <https://www.astm.org/d2842-19.html> (дата обращения: 05.12.2024).

⁵ ISO 10534–1:1996. *Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes*. URL: <https://cdn.standards.itech.ai/samples/18603/3bfc0004b5024b2f9d8e3f19879aaf61/ISO-10534-1-1996.pdf> (дата обращения: 05.12.2024).

Результаты исследования

Плотность. На рис. 7 представлены результаты определения плотности протестированных образцов.

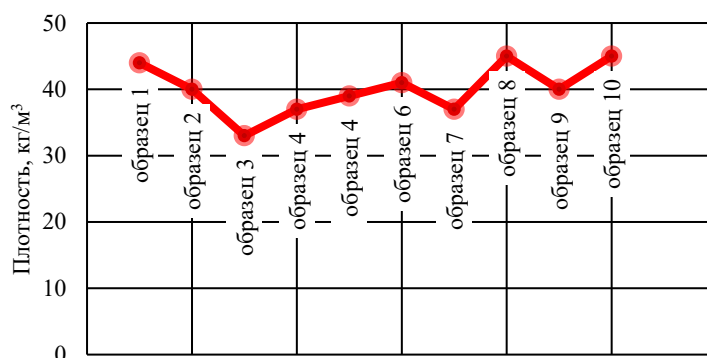


Рис. 7. Сравнение образцов по плотности

Наименьшая плотность образца 3 (33 кг/м^3) объясняется отсутствием наполнителей и однородностью его структуры. Добавление наполнителей, особенно в объеме 5 %, существенно не повлияло на плотность. Это объясняется, во-первых, незначительной долей добавки. Во-вторых, плотность добавок (особенно соломы и пенопласта) близка к плотности полиуретана без добавок.

Водопоглощение. Результаты испытаний на водопоглощение представлены на рис. 8.

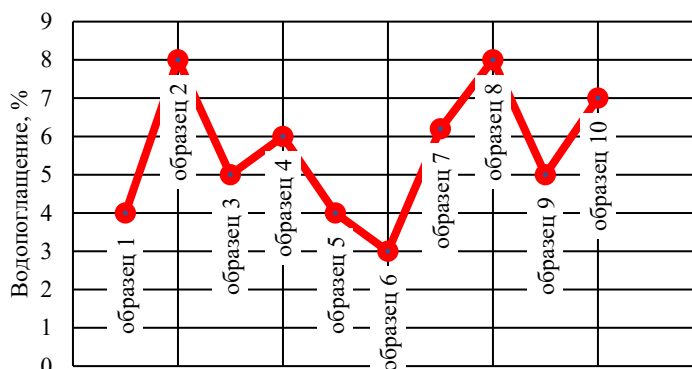


Рис. 8. Сравнение образцов по водопоглощению

Низкий уровень водопоглощения зафиксирован у образцов без добавок (50 % изоцианата и 50 % полиола) и с добавкой пенопласта 5 % (62 % изоцианата и 33 % полиола). С увеличением доли изоцианата уровень водопоглощения возрастает, особенно у образцов 8 и 10 с 10 % соломы и угля. Это согласуется с результатами, полученными другими исследователями [11]. Образец 2 отклоняется от общего правила, что может быть связано с особенностями его подготовки. Известно, что солома активно впитывает воду. Соответственно, у образцов с соломой водопоглощение выше. При добавлении гранул пенопласта, наоборот, водопоглощение снижается из-за высокой устойчивости данного материала к воде. По этой причине минимальное водопоглощение фиксируется у образца 6.

Термические свойства. Результаты термических испытаний образцов представлены на рис. 9.

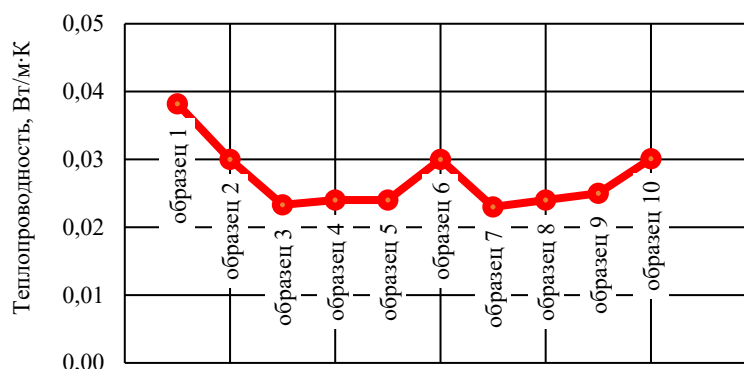


Рис. 9. Сравнение образцов по теплопроводности

Коэффициент теплопроводности образцов без добавок увеличивается с ростом доли полиола. При высоком содержании полиола улучшается контакт между компонентами, уменьшаются размеры ячеек, увеличивается плотность. Плотные материалы обеспечивают более эффективную передачу тепла, т. е. обладают более высокой теплопроводностью [12]. Добавление пенопласта и угля в высоких концентрациях также увеличивает плотность и заметно повышает теплопроводность [13]. Добавление наполнителей в малых количествах, напротив, может улучшить показатели теплопроводности. Например, при добавлении пенопласта и соломы в количестве 5 % возможно снижение значений теплопроводности до 0,023 Вт/м·К. Почти такой же результат 0,024 Вт/м·К получил автор работы [14].

Прочность на сжатие. На рис. 10 показаны результаты определения прочности на сжатие.

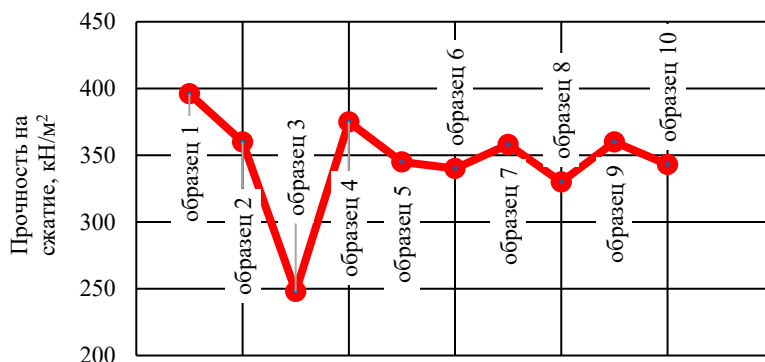


Рис. 10. Сравнение образцов по прочности на сжатие

Прочность на сжатие пропорциональна плотности материала, поэтому в образцах без добавок она повышается с увеличением содержания полиола. При добавлении 5 % соломы и угля прочность на сжатие высокая из-за однородности клеточной структуры. При добавлении 10 % наполнителя механическая прочность уменьшается из-за снижения внутренней связующей силы образца.

Акустические характеристики. На рис. 11 показаны результаты испытаний на звукопоглощение.

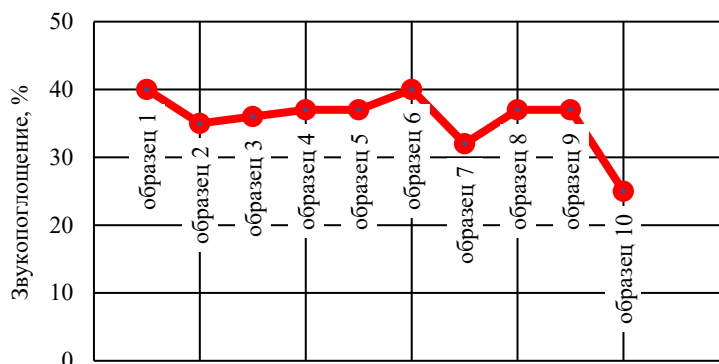


Рис. 11. Сравнение образцов по звукопоглощению

Среди образцов без наполнителей наилучший показатель у самого плотного — 1. При низком содержании добавок (5 %) звукопоглощение увеличивается благодаря однородной клеточной структуре. При более высоком уровне добавок (10 %) оно снижается из-за недостаточной прочности связей в материале образца.

Обсуждение и заключение. Итоги исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Добавление наполнителей в определенном объеме может улучшить термические, механические и акустические свойства полиуретана.
2. Увеличение доли добавок в целом ухудшает исследуемые свойства и может усилить поглощение воды. Так происходит при добавлении соломы.
3. Для достижения оптимального результата рекомендуется добавлять 5 % соломы в полиуретан, состоящий из 62 % изоцианата и 33 % полиола. Теплопроводность этого образца (его номер — 7) составила 0,023 Вт/м·К при плотности 37 кг/м³ и прочности на сжатие 358 кН/м².
4. Значения теплопроводности и механической прочности образца 7 лучше на 2 % и 4 % соответственно по сравнению с образцом без добавок (под номером 3).
5. К преимуществам образца 7 следует отнести также его меньшую стоимость. Солома дешевле, чем основные компоненты полиуретана.

В перспективе планируется изучение других наполнителей с точки зрения их влияния на свойства полиуретана.

Список литературы / References

1. Estravís S, Tirado-Mediavilla J, Santiago-Calvo M, Ruiz-Herrero JL, Villafañe F, Rodríguez-Pérez MÁ. Rigid Polyurethane Foam with Infused Nanoclays: Relationship between Cellular Structure and Thermal Conductivity. *European Polymer Journal*. 2016;80:1–15. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.04.026>
2. Hu Zhang, Wen-Zhen Fang, Yue-Ming Li, Wen-Quan Tao. Experimental Study of the Thermal Conductivity of Polyurethane Foam. *Applied Thermal Engineering*. 2017;115:528–538. <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.057>
3. Sair S, Oushabi A, Kammouni A, Tanane O, Abboud Y, El Bouari A. Mechanical and Thermal Conductivity Properties of Hemp Fiber Reinforced Polyurethane Composites. *Case Studies in Construction Materials*. 2018;8:203–212. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.02.001>
4. Zieleniewska M, Leszczyński MK, Szczepkowski L, Bryśkiewicz A, Krzyżowska M, Bień K, et al. Development and Application Evaluation of the Rigid Polyurethane Foam Composites with Egg Shell Waste. *Polymer Degradation and Stability*. 2016;132:78–86. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.02.030>
5. Eren Komurlu, Ayhan Kesimal. Experimental Study of Polyurethane Foam Reinforced Soil used as a Rock-Like Material. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical*. 2015;7(5):566–572. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.05.004>
6. Nontawat Kraitape, Chanchai Thongpin. Influence of Recycled Polyurethane Polyol on the Properties of Flexible Polyurethane Foam. *Energy Procedia*. 2016;89:186–197. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.05.025>
7. Bryśkiewicz A, Zieleniewska M, Przyjemska K, Chojnacki P, Ryszkowska J. Modification of Flexible Polyurethane Foam by the Addition of Natural Origin Fillers. *Polymer Degradation Stability*. 2016;132(1):1–9. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.05.002>
8. Nastaran Nazeran, Jafarsadegh Moghaddas. Synthesis and Characterization of Silica Aerogel Reinforced Rigid Polyurethane Foam for Thermal Insulation Application. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2017;461:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.01.037>
9. Formela K, Hejna A, Zedler Ł, Przybysz M, Ryl J, Saeb M, et al. Structural, Thermal and Physico-Mechanical Properties of Polyurethane/ Brewers' Spent Grain Composite Foams Modified with Ground Tire Rubber. *Industrial Crops and Products*. 2017;108:844–852. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.07.047>
10. Nicholas JV, White DR. *Traceable Temperatures: An Introduction to Temperature Measurement and Calibration*. 2ed. Chichester: Wiley; 2001. 400 p.
11. Sripathy M, Sharma KV. Flammability and Moisture Absorption Test of Rigid Polyurethane Foam. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2013;4(2):1–8. URL: <https://www.ijser.org/researchpaper/Flammability-and-Moisture-absorption-test-of-rigid-polyurethane-foam.pdf> (accessed: 05.12.2024).
12. Ramnas O, Jarfelt U. Thermal Conductivity of Polyurethane Foam Best Performance. In: *10th International Symposium on District Heating and Cooling, Hannover, September 3–5, 2006*. URL: https://lsta.lt/files/events/28_jarfelt.pdf (accessed: 05.12.2024).
13. Chan Wen Shan, Maizlinda Izwana Idris, Mohd Imran Ghazali. Study of Flexible Polyurethane Foam Reinforced with Coir Fibres and Tyre Particles. *International Journal of Applied Physics and Mathematics*. 2012;2(2):123–130. <http://dx.doi.org/10.7763/IJAPM.2012.V2.67>
14. Kpele Y. *Rationalizing Energy Consumption by Improving the Specifications of Thermal Insulation Materials*. Latakia: Tishreen University; 2009, 130 p.

Об авторе:

Имад Ризакалла Антибас, кандидат технических наук, доцент кафедры основ конструирования машин Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearchID](#), imad.antypas@mail.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Imad R. Antibas, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Fundamentals of Machinery Design Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearchID](#), imad.antypas@mail.ru

Conflict of Interest Statement: the author claims no conflict of interest.

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

Поступила в редакцию / Received 25.12.2024

Поступила после рецензирования / Revised 20.01.2025

Принята к публикации / Accepted 25.01.2025