ISSN 2949-6241

e-ISSN 2949-6233

Инженерные Технологии

№ 4 (12) 2025

ПРИВЕТСТВЕННОЕ СЛОВО К ЧИТАТЕЛЯМ

Уважаемые читатели и авторы журнала «Инженерные технологии», друзья и коллеги!

В прошедшем году исполнилось 95 лет со дня основания Воронежского государственного университета инженерных технологий. За годы существования ВГУИТ подготовил тысячи высококвалифицированных специалистов для реального сектора экономики Российской Федерации и Воронежской области, внес достойный вклад в формирование их кадрового и научно-технологического потенциала.

Сегодня Воронежский государственный университет инженерных технологий – один из признанных центров подготовки высококлассных специалистов для пищевой, перерабатывающей и химической промышленности страны и региона, альма-матер для целой плеяды выпускников, ставших руководителями крупных промышленных предприятий, известными общественными и государственными деятелями.

Практическая направленность профессиональной подготовки, современные образовательные технологии, инновационные проекты, реализуемые ВГУИТ в сотрудничестве с индустриальными партнерами, позволяют нам уверенно идти в ногу со временем.

В очередном номере нашего журнала мы традиционно обсуждаем теоретические и практические аспекты важнейших сфер науки и образования. В этом процессе мы пытаемся уловить новые идеи, возникающие и находящие свое воплощение в опыте работы научно-образовательных организаций разного профиля. В центре внимания широкая гамма вопросов фундаментального и прикладного характера по развитию информационных технологий, науки о материалах, направлений химической технологии. Результаты исследований будут полезны и найдут отклик среди разработчиков, производителей и потребителей наукоемкой продукции.

От имени руководства Воронежского государственного университета инженерных технологий, от членов редакционной коллегии журнала «Инженерные технологии» искренне желаем всем новых творческих достижений, здоровья, энтузиазма, вдохновения, благополучия и процветания!

Ректор ВГУИТ
Репников Николай Иванович

ПРИВЕТСТВЕННОЕ СЛОВО ЧИТАТЕЛЯМ

Уважаемые читатели и авторы журнала «Инженерные технологии»!

Мне очень приятно, что Российская инженерная академия (РИА) принимает активное участие в работе журнала и в этом юбилейном году являлась соорганизатором Всероссийской конференции с международным участием «Проблемы и инновационные решения в химической технологии – ПИРХТ (2025)», которая уже не первый раз собирает ведущих учёных и специалистов, успешно работающих в области химической технологии и экологии!

В числе приоритетных направлений деятельности РИА можно выделить следующие: информатизация общества на основе использования современных информационных технологий; разработка системы контроля технического состояния комплексов и систем различного назначения; использование изделий и технологий двойного назначения при создании высокотехнологичной продукции и диверсификация оборонно-промышленного комплекса; применение в промышленности нанотехнологий и наноматериалов.

Для эффективного развития этих направлений необходимо тесное сотрудничество промышленности и университетов с их богатой историей, глубокими академическими традициями и высокопрофессиональными коллективами. Необходимы развитие и совершенствование научных подходов в решении актуальных прикладных задач. Востребована модернизация образовательных программ, подразумевающая развитие их практико- и проектно-ориентированного, а также междисциплинарного характера. Приветствуется активное привлечение к сотрудничеству работодателей. Все это было бы невозможно без нашего тесного общения, которое позволяет создать единое научно-информационное пространство и сформировать системный подход к интеграции ученых, инженеров и промышленников.

Сопредседатель конференции,
президент Российской инженерной академии,

Гусев Борис Владимирович,

доктор технических наук, профессор, академик Российской инженерной академии, член-корреспондент РАН, заслуженный деятель науки РФ, лауреат Государственных премий СССР и РФ, 5-ти премий Правительства РФ в области науки и образования.

16+

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 4 (12), 2025

16+

ENGINEERING TECHNOLOGIES

SCIENTIFIC AND PRACTICAL JOURNAL

№ 4 (12), 2025

Главный редактор

Битюков Виталий Ксенофонтович – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры «Информационные и управляющие системы» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), bitukovWK1941@yandex.ru

Заместители главного редактора

Карманова Ольга Викторовна – главный редактор рубрики «Химические технологии, науки о материалах», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии органических соединений и переработки полимеров» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), karolga@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2226-6582

Тихомиров Сергей Германович – главный редактор рубрики «Информационные технологии и телекоммуникации», доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные и управляющие системы» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), tikhomirov_57@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8192-0049

Научно-редакционный совет:

Гусев Борис Владимирович – председатель научно-редакционного совета, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, член-корреспондент Российской академии наук, президент Российской инженерной академии (г. Москва, Россия), info-rae@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2718-9539

Алтайулы Сагымбек, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология пищевых и перерабатывающих производств» Казахского Агротехнического университета им. Сакена Сейфуллина, академик Академии сельскохозяйственных наук Республики Казахстан (г. Астана, Казахстан)

Борейко Наталья Павловна, доктор технических наук, советник директора ФГУП «Научно-исследовательский институт синтетического каучука им. С.В. Лебедева» (г. Санкт-Петербург, Россия), boreicko.natalya@yandex. ru

Люсова Людмила Ромуальдовна, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Химия и технология переработки эластомеров имени Ф.Ф. Кошелева» Российского технологического университета МИРЭА (г. Москва. Россия), lyusova@mirea.ru

Матвейкин Валерий Григорьевич, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Информационные процессы и управление» Тамбовского государственного технического университета (г. Тамбов, Россия), ipu_tstu@mail.ru

Мешалкин Валерий Павлович, академик РАН, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Логистика и экономическая информатика» Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева, (г. Москва, Россия), meshalkin.v.p@muctr.ru

Прокопчук Николай Романович, доктор химических наук, профессор, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, профессор кафедры «Полимерные композиционные материалы», Белорусского государственного технологического университета (г. Минск, Беларусь), nrprok@gmail.com

Редакционная коллегия:

Рубрика «Информационные технологии и телекоммуникации»

Битюков Владимир Ксенофонтович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Радиоволновые процессы в технологии» Российского технологического университета МИРЭА, (г. Москва, Россия)

Благовещенская Маргарита Михайловна, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки, зав. кафедрой «Автоматизированные системы управления биотехнологическими процессами» Московского государственного университета пищевых производств (г. Москва, Россия), mmb@mgupp.ru

Бурлуцкая Мария Шаукатовна, доктор физико-математических наук, доцент, декан математического факультета, зав. кафедрой «Математического моделирования» Воронежского государственного университета (г. Воронеж, Россия), deanery@math.vsu.ru

Василенко Виталий Николаевич, доктор технических наук, профессор, проректор по учебной работе, заведующий кафедрой «Машины и аппараты пищевых производств» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), ucheba@vsuet.ru, https://orcid.org/0000-0002-1547-9814

Дворецкий Станислав Иванович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки, профессор кафедры «Технология и оборудование пищевых и химических производств» Тамбовского государственного технического университета (г. Тамбов, Россия), bio-topt@yandex.ru

Зиятдинов Надир Низамович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системотехника» Казанского национального исследовательского технологического университета (г. Казань, Россия), ZiyatdinovNN@corp.knrtu.ru

Карпович Дмитрий Семенович, кандидат технических наук, доцент зав. кафедрой «Автоматизация производственных процессов и электротехника» Белорусского государственного технологического университета (г. Минск, Беларусь)

Колодежнов Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Общепрофессиональных дисциплин» Военно-воздушной академии имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (г. Воронеж, Россия)

Колыбанов Кирилл Юрьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационные технологии» Российского технологического университета МИРЭА, (г. Москва, Россия)

Кущев Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, полковник, начальник кафедры «Автоматизация систем управления и информационная безопасность» Военно-воздушной академии имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (г. Воронеж, Россия)

Лабутин Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Техническая кибернетика и автоматика» Ивановского химико-технологического университета (г. Иваново, Россия), lan@isuct.ru

Левданский Александр Эдуардович, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Процессы и аппараты химических производств» Белорусского государственного технологического университета (г. Минск, Беларусь), alex_levdansky@mail.ru

Ли Юэен, доктор технических наук, доцент Шаньдунского университета архитектуры и технологии (г. Цзинань, Китай), 386093354@qq.com

Матвеев Михаил Григорьевич, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Информационных технологий управления» Воронежского государственного университета (г.Воронеж, Россия), mgmatveev@yandex.ru

Мищенко Сергей Владимирович, заслуженный деятель науки, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Мехатроника и технологические измерения» Тамбовского государственного технического университета (г. Тамбов, Россия), msv@tstu.ru

Муромцев Дмитрий Юрьевич, проректор по научной работе, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» Тамбовского государственного технического университета (г. Тамбов, Россия), nauka@tstu.ru

Остриков Александр Николаевич, заслуженный деятель науки, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), kaf-pahpp@vsuet.ru, https://orcid.org/0000-0002-2335-0017

Подвальный Семен Леонидович, заслуженный деятель науки, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизированные и вычислительные системы» Воронежского государственного технического университета (г. Воронеж, Россия), spodvalny@yandex.ru

Провоторов Вячеслав Васильевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Уравнения в частных производных и теория вероятности» Воронежского государственного университета (г. Воронеж, Россия)

Семенов Михаил Евгеньевич, доктор физико - математических наук, профессор, профессор Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил "Военно-воздушной академии им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина" (г. Воронеж, Россия), mkl150@mail.ru

Скрыпников Алексей Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационная безопасность» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), dekuits@vsuet.ru, https://orcid.org/0000-0003-1073-9151

Тростянский Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Физика и химия» Военно-воздушной академии имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (г. Воронеж, Россия)

Урбанович Павел Павлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационные системы и технологии» Белорусского государственного технологического университета (г. Минск, Беларусь), p.urbanovich@belstu.by

Хаустов Игорь Анатольевич, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Информационные и управляющие системы» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), kaf-ius@vsuet.ru, https://orcid.org/0000-0002-8897-5763

Хвостов Анатолий Анатольевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная математика и механика» Воронежского государственного технического университета (г. Воронеж, Россия), khvtol1974@yandex.ru

Чертов Евгений Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования РФ, советник при ректорате, заведующий кафедрой «Техническая механики» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), post@vsuet.ru

Рубрика «Химические технологии, науки о материалах»

Ваниев Марат Абдурахманович, доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой «Химия и технология переработки эластомеров» Волгоградского государственного технического университета (г. Волгоград, Россия), vaniev@vstu.ru

Дворецкий Дмитрий Станиславович, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Технология и оборудование пищевых и химических производств» Тамбовского государственного технического университета (г. Тамбов, Россия), bio-topt@yandex.ru

Дормекшин Олег Борисович, доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе, заведующий кафедрой «Технология неорганических веществ и общая химическая технология» Белорусского государственного технологического университета (г. Минск, Беларусь), dormeshkin@yandex.ru

Иванов Леонид Алексеевич, кандидат технических наук, первый вице-президент, ученый секретарь Российской инженерной академии (г. Москва, Россия), L.a.ivanov@mail.ru

Кучменко Татьяна Анатольевна, доктор химических наук, профессор, профессор РАН, зав. кафедрой «Физическая и аналитическая химия» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), tak1907@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7812-9195

Меньшутина Наталья Васильевна, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Химический и фармацевтический инжиниринг» Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева (г. Москва, Россия), menshutina.n.v@muctr.ru

Мокшина Надежда Яковлевна, доктор химических наук, доцент, профессор кафедры «Физика и химия» Военно-воздушной академии имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (г. Воронеж, Россия), moksnad@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8409-024X

Пугачева Инна Николаевна, доктор технических наук доцент, профессор, и.о. заведующего кафедрой «Промышленной экологии и техносферной безопасности», декан факультета экологии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологии (г. Воронеж, Россия), fak-eht@vsuet.ru, https://orcid.org/0000-0001-7812-9195

Рудаков Олег Борисович, доктор химических наук, профессор, зав. кафедрой «Химия и химическая технология материалов» Воронежского государственного технического университета (г. Воронеж, Россия), rudakov@vgasu.vrn.ru

Соколова Марина Дмитриевна, доктор технических наук, директор Института проблем нефти и газа СО РАН (ИПНГ СО РАН), обособленного подразделения ФГБУН Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр СО РАН» (Республика Саха (Якутия), Россия), marsokol@mail.ru

Суханов Павел Тихонович, доктор химических наук, профессор, советник при ректоре по научно-методической деятельности, профессор кафедры «Физическая и аналитическая химия» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), pts@vsuet.ru, https://orcid.org/0000-0002-2588-9286

Цзяньцян Юй, доктор технических наук, профессор лаборатории химии и материалов чистой энергии Университета Циндао (г. Циндао, Китай), jianqyu@qdu.edu.cn

Челноков Виталий Вячеславович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Логистика и экономическая информатика» Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева, (г. Москва, Россия), chelnokov.v.v@muctr.ru

Официальный сайт журнала «Инженерные технологии»: https://vsuet.ru/science/journal-engtech
Ответственный секретарь: Носова Е. А. (эл. почта: engtech@vsuet.ru)
Учредитель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций: Регистрационный номер ПИ № ФС77-83079 от 07 апреля 2022 г.

Адрес университета, редакции, издательства и отдела полиграфии ФГБОУ ВО «ВГУИТ»
394036, Воронеж, пр-кт Революции, д.19, ауд.445
Контактный тел.+7 (920) 228-20-11
E-mail: **engtech@vsuet.ru**

Подписано в печать 29.12.2025.
Выход в свет: 30.12.2025.
Формат 70x100 1/8
Усл. печ. л. 16,5. Тираж 100 экз. Заказ №
Цена - свободная

© ФГБОУ ВО «Воронеж. гос. ун-т инж. технол.», 2025

Editor-in-Chief
Bityukov Vitaly Ksenofontovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Professor of the Department of Information and Control Systems of the Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), bitukovWK1941@yandex.ru

Deputy Editors-in-Chief
Karmanova Olga Viktorovna – Editor-in-chief of the heading "Chemical Technologies, Materials Sciences", Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Technologies of Organic Compounds and Polymer Processing" Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), karolga@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2226-6582
Tikhomirov Sergey Germanovich – Editor-in-chief of the section "Information Technologies and Telecommunications", Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department "Information and Control Systems" of the Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), tikhomirov_57@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8192-0049

Scientific and Editorial Board:
Gusev Boris Vladimirovich - Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, President of the Russian Academy of Engineering (Moscow, Russia), info-rae@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2718-9539
Altayuly Sagymbek, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of "Technology of food and processing industries" of the Kazakh Agrotechnical University. Sakena Seifullina, Academician of the Academy of Agricultural Sciences of the Republic of Kazakhstan (Astana, Kazakhstan)
Boreyko Natalia Pavlovna, Doctor of Technical Sciences, Advisor to the Director of the S.V. Lebedev Scientific Research Institute of Synthetic Rubber (St. Petersburg, Russia), boreicko.natalya@yandex. ru
Lyusova Lyudmila Romualdovna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Chemistry and Technology processing of elastomers named after F.F. Koshelev" Russian Technological University MIREA (Moscow. Russia), lyusova@mirea.ru
Matveikin Valery Grigorievich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information Processes and Management, Tambov State Technical University (Tambov, Russia), ipu_tstu@mail.ru
Meshalkin Valery Pavlovich, Academician of the Russian Academy of Sciences, Honored Scientist of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Logistics and Economic Informatics of the D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology (Moscow, Russia), meshalkin.v.p@muctr.ru
Prokopchuk Nikolay Romanovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor of the Department of Polymer Composite Materials, Belarusian State Technological University (Minsk, Belarus), nrprok@gmail.com

Editorial Board:
Heading "Information technology and telecommunications"
Bityukov Vladimir Ksenofontovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department "Radio Wave Processes in Technology" of the Russian Technological University MIREA, (Moscow, Russia)
Blagoveshchenskaya Margarita Mikhailovna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist, Head of the Department "Automated Control Systems for Biotechnological Processes" of the Moscow State University of Food Production (Moscow, Russia), mmb@mgupp.ru
Burlutskaya Maria Shaukatovna, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Mathematics, Head of the Department of Mathematical Modeling at Voronezh State University (Voronezh, Russia), deanery@math.vsu.ru
Vasilenko Vitaliy Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Academic Affairs, Head of the Department "Machines and Devices of Food Production" of the Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), ucheba@vsuet.ru, https://orcid.org/0000-0002-1547-9814
Dvoretsky Stanislav Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist, Professor of the Department of Technology and Equipment of Food and Chemical Industries of Tambov State Technical University (Tambov, Russia), bio-topt@yandex.ru
Ziyatdinov Nadir Nizamovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of "System Engineering" Kazan National Research Technological University (Kazan, Russia), ZiyatdinovNN@corp.knrtu.ru
Karpovich Dmitry Semenovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automation of Industrial Processes and Electrical Engineering of the Belarusian State Technological University (Minsk, Belarus)
Kolodezhnov Vladimir Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of "General Professional Disciplines" of the Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin (Voronezh, Russia)
Kolybanov Kirill Yuryevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information Technology of the Russian Technological University MIREA, (Moscow, Russia)
Kushchev Sergey Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Colonel, Head of the Department "Automation of Systems management and Information Security" of the Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin (Voronezh, Russia)
Labutin Alexander Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technical Cybernetics and Automation" of Ivanovo University of Chemical Technology (Ivanovo, Russia), lan@isuct.ru
Levdansky Alexander Eduardovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Processes and Devices of Chemical Production" of the Belarusian State Technological University (Minsk, Belarus), alex_levdansky@mail.ru
Li Yueyen, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Shandong University of Architecture and Technology (Jinan, China), 386093354@qq.com
Matveev Mikhail Grigoryevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Management Information Technologies at Voronezh State University (Voronezh, Russia), mgmatveev@yandex.ru
Mishchenko Sergey Vladimirovich, Honored Scientist, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechatronics and Technological Measurements of Tambov State Technical University (Tambov, Russia), msv@tstu.ru

Muromtsev Dmitry Yuryevich, Vice-Rector for Scientific Work, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department "Design of Radioelectronic and Microprocessor Systems" of Tambov State Technical University (Tambov, Russia), nauka@tstu.ru

Ostrikov Alexander Nikolaevich, Honored Scientist, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Technology of Fats, Processes and Devices of Chemical and Food Production" of the Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), kaf-pahpp@vsuet.ru, https://orcid.org/0000-0002-2335-0017

Podvalny Semyon Leonidovich, Honored Scientist, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automated and Computing Systems at Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia), spodvalny@yandex.ru

Provotorov Vyacheslav Vasilyevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Partial Differential Equations and Probability Theory at Voronezh State University (Voronezh, Russia)

Semenov Mikhail Evgenievich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Military Air Academy named after Prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin" (Voronezh, Russia), mkl150@mail.ru

Skrypnikov Alexey Vasilyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information Security at Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), dekuits@vsuet.ru, https://orcid.org/0000-0003-1073-9151

Trostyansky Sergey Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Physics and Chemistry of the Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy (Voronezh, Russia)

Urbanovich Pavel Pavlovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information Systems and Technologies of the Belarusian State Technological University (Minsk, Belarus), p.urbanovich@belstu.by

Khaustov Igor Anatolyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information and Control Systems, Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), kaf-ius@vsuet.ru, https://orcid.org/0000-0002-8897-5763

Khvostov Anatoly Anatolyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Applied Mathematics and Mechanics of Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia), khvtol1974@yandex.ru

Chertov Evgeny Dmitrievich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Advisor to the Rector, Head of the Department of Technical Mechanics of the Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), post@vsuet.ru

Heading " Chemical technologies, materials sciences"

Vaniev Marat Abdurakhmanovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Chemistry and Technology of Elastomer Processing at Volgograd State Technical University (Volgograd, Russia), vaniev@vstu.ru

Dvoretsky Dmitry Stanislavovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Technology and Equipment of Food and Chemical Industries" of Tambov State Technical University (Tambov, Russia), bio-topt@yandex.ru

Dormekshin Oleg Borisovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Scientific Work, Head of the Department "Technology of Inorganic Substances and General Chemical Technology" of the Belarusian State Technological University (Minsk, Belarus), dormeshkin@yandex.ru

Ivanov Leonid Alexeyevich, Candidate of Technical Sciences, First Vice President, Scientific Secretary of the Russian Academy of Engineering (Moscow, Russia), L.a.ivanov@mail.ru

Kuchmenko Tatyana Anatolyevna, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Physical and Analytical Chemistry of the Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), tak1907@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7812-9195

Menshutina Natalia Vasilyevna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Chemical and Pharmaceutical Engineering of the D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology (Moscow, Russia), menshutina.n.v@muctr.ru

Mokshina Nadezhda Yakovlevna, Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Physics and Chemistry of the Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy (Voronezh, Russia), moksnad@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8409-024X

Pugacheva Inna Nikolaevna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Acting Head of the Department of Industrial Ecology and Technosphere Safety, Dean of the Faculty of Ecology and Chemical Technology, Voronezh State University of Engineering Technology (Voronezh, Russia), fak-eht@vsuet.ru, https://orcid.org/0000-0001-7812-9195

Rudakov Oleg Borisovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Department of Chemistry and Chemical Technology materials of the Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia), rudakov@vgasu.vrn.ru

Sokolova Marina Dmitrievna, Doctor of Technical Sciences, Director of the Institute of Oil and Gas Problems SB RAS (IPNG SB RAS), a separate division of the Federal State Budgetary Educational Institution of the Federal Research Center "Yakut Scientific Center SB RAS" (Republic of Sakha (Yakutia), Russia), marsokol@mail.ru

Sukhanov Pavel Tikhonovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Advisor to the Rector for Scientific and Methodological Activities, Professor of the Department of Physical and Analytical Chemistry of the Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), pts@vsuet.ru, https://orcid.org/0000-0002-2588-9286

Jianqiang Yu, Doctor of Technical Sciences, Professor, Laboratory of Chemistry and Clean Energy Materials, Qingdao University (Qingdao, China), jianqyu@qdu.edu.cn

Chelnokov Vitaly Vyacheslavovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Logistics and Economic Informatics, D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, (Moscow, Russia), chelnokov.v.v@muctr.ru

The official website of the Engineering Technologies magazine: https://vsuet.ru/science/journal-engtech
Executive Secretary: Nosova E. A. (e-mail: engtech@vsuet.ru)

Founder: Voronezh State University of Engineering Technologies

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technologies and Mass Communications: Registration number PI No. FS77-83079 dated April 07, 2022.

The address of the University, the editorial office, the publishing house and the printing department of VSUIT:
394036, Voronezh, Revolution Ave., 19, room 445
Contact tel.+7 (920) 228-20-11
E-mail: **engtech@vsuet.ru**

Signed to the press on 29.12.2025.
The publication: 30.12.2025.
Format 70 x 100 1/8
Usl. pech. l. 16,5. Edition of 100 copies. Order No.
Price - free

© FSBEI HE
«Voronezh State University of Engineering and Technology», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Информационные технологии и телекоммуникации

АРХИТЕКТУРА И РЕАЛИЗАЦИЯ P2P-СИСТЕМЫ ВИДЕОСВЯЗИ НА БАЗЕ WEBRTC *Толстова И. С., Фомин А. Ю., Шорина К. В.* 17

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СКЛАДСКИМИ ПРОЦЕССАМИ: АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД И МЕТОДЫ АВТОМАТИЗАЦИИ *Баркалов В. В., Ена Д. Г., Коробова Л. А.* 24

ИНТЕГРАЦИЯ ТОПЛИВНЫХ КАРТ В СИСТЕМУ МОНИТОРИНГА *Некрасова Г. П., Корчагин М. В.* 30

ВНЕДРЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРОЦЕСС ОКАЗАНИЯ ГОСУДАРСТВЕННЫХ УСЛУГ *Прохоренко А. В., Стукало О. Г.* 36

АНАЛИЗ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ КОРПОРАТИВНОГО ОБЛАЧНОГО ХРАНИЛИЩА *Дрыгалев А. А., Коробова Л. А., Толстова И. С.* 43

Химические технологии, науки о материалах

КОНТРОЛЬ СОДЕРЖАНИЯ НИКЕЛЯ В ВОДНЫХ СИСТЕМАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ УСТОЙЧИВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОЧИСТКИ *Турп Г. А., Турп С. М., Оздемир С., Алосманов Р.* 51

ДАТЧИК ТОКСИЧНЫХ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ТРОЙНОГО КОМПОЗИТА *Васильева А. Д., Зарубина А. О., Колесникова Т. С., Уфлянд И. Е.* 61

ПОЛУЧЕНИЕ И ВЛИЯНИЕ ГИДРОЛИЗАТОВ ПРИРОДНЫХ ФЛАВОНОИДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ *Болотов В. М., Комарова Е. В., Саввин П. Н., Студеникина Л. Н.* 73

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ 1,1-ДИМЕТИЛГИДРАЗИНА В РАСТИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТАХ *Маслова Н. В., Сатуров А. С., Суханов П. Т.* 79

РЕИНЖИНИРИНГ ПРОЦЕССОВ ГЛУБОКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТОЛУОЛА *Князев М. Ю.* 87

ЖИДКОФАЗНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ СОЗДАНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИ СОВЕРШЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА НАНОКОМПОЗИТОВ *Корчагин В. И., Протасов А. В., Лимов А. И., Санникова Н. Ю., Федоров Д. Ю.* 94

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КЕРАМИКИ ВК94-1 С ДОБАВКОЙ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ *Соколин А. А., Макаров Н. А.* 104

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООКИСЛЕНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОДУКТОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КАРБОНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОДНОГО ПЕКА *Ковалев Р. Ю., Никитин А. П.* 111

ХИМИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА *Пугачева И. Н.* 119

ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ «ПРОБЛЕМЫ И ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ» (ПИРХТ-2025) *Карманова О. В.* 122

CONTENTS

Information technology and telecommunications

ARCHITECTURE AND IMPLEMENTATION OF A P2P VIDEO COMMUNICATION SYSTEM BASED ON WEBRTC *Tolstova I. S., Fomin A. Yu., Shorina K. V.* 17

INTELLIGENT WAREHOUSE PROCESS MANAGEMENT SYSTEM: AN ANALYTICAL APPROACH AND AUTOMATION METHODS *Barkalov V. V., Ena D. G., Korobova L. A.* 24

INTEGRATION OF FUEL CARDS INTO THE MONITORING SYSTEM *Nekrasova G. P., Korchagin M. V.* 30

IMPLEMENTATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE PROVISION OF PUBLIC SERVICES *Prokhorenko A. V., Stukalo O. G.* 36

ANALYSIS OF SOLUTIONS FOR IMPORT SUBSTITUTION CORPORATE CLOUD STORAGE *Drygalev A. A., Korobova L. A., Tolstova I. S.* 43

Chemical technologies, materials sciences

NICKEL CONTAMINATION CONTROL IN AQUEOUS SYSTEMS THROUGH SUSTAINABLE REMOVAL TECHNIQUES *Turp G. A., Turp S. M., Özdemir S., Alosmanov R.* 51

A TOXIC VOLATILE ORGANIC COMPOUND SENSOR BASED ON A TERNARY COMPOSITE *Vasilyeva. A. D., Zarubina A. O., Kolesnikova T. S., Uflyand I. E.* 61

OBTAINING AND INFLUENCING HYDROLYSATES OF NATURAL FLAVONOID COMPOUNDS ON THE PROPERTIES OF POLYMERIC MATERIALS *Bolotov V. M., Komarova E. V., Savvin P. N., Studenikina L. N.* 73

DETERMINATION THE MASS CONCENTRATION OF 1,1-DIMETHYLHYDRAZINE IN PLANT OBJECTS *MaslovaN. V., Saturov A. S., Sukhanov P. T.* 79

REENGINEERING OF TOLUENE DEEP CONVERSION PROCESSES *Knyazev M. Yu.* 87

LIQUID-PHASE TECHNOLOGIES IN THE CREATION OF ECO-FRIENDLY PRODUCTION OF NANOCOMPOSITES *Korchagin V. I., Protasov A. V., Limov A. I., Sannikova N. Yu., Fedorov D. Yu.* 94

RESEARCH OF THE PROPERTIES OF VK94-1 CERAMICS WITH ZIRCONIUM DIOXIDE ADDITIVE *Sokolin A. A., Makarov N. A.* 104

EFFECT OF THERMO-OXIDATION ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF LOW-TEMPERATURE CARBONIZATION PRODUCTS FROM ELECTRODE PITCH *Kovalev R. Yu., Nikitin A. P.* 111

THE CHEMICAL INDUSTRY IN THE CONTEXT OF TECHNOLOGICAL SOVEREIGNTY *Pugacheva I. N.* 119

ALL-RUSSIAN CONFERENCE WITH INTERNATIONAL PARTICIPATION "PROBLEMS AND INNOVATIVE SOLUTIONS IN CHEMICAL ENGINEERING" (PIRKHT-2025) *Karmanova O. V.* 122

Научная статья

УДК 004.451.83

АРХИТЕКТУРА И РЕАЛИЗАЦИЯ P2P-СИСТЕМЫ ВИДЕОСВЯЗИ НА БАЗЕ WEBRTC

Ирина Сергеевна Толстова✉ [1] irin2102ka@mail.ru
Александр Юрьевич Фомин [1] al3ck.f044in@yandex.ru
Ксения Викторовна Шорина [1] shorina.2004@yandex.ru

[1]Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. В условиях роста спроса на удалённые коммуникации особую актуальность приобретают решения, позволяющие организовать стабильную видеосвязь без значительных затрат на инфраструктуру. Статья посвящена разработке веб-приложения для видеоконференций с использованием децентрализованной P2P-архитектуры. В основе системы лежит технология WebRTC, обеспечивающая прямую передачу медиапотоков между участниками, что минимизирует нагрузку на серверные ресурсы. Клиентская часть реализована на React с TypeScript, серверная на Node.js с использованием Socket.IO для обмена сигнальными данными. Реализованы основные функции: видеосвязь между несколькими участниками, текстовый чат с историей сообщений, управление медиаустройствами. Особое внимание уделено вопросам безопасности через применение HTTPS и генерацию уникальных идентификаторов комнат (UUID). Проведённое тестирование подтвердило работоспособность системы в группах до 6 участников с задержкой не более 300 мс. Результаты демонстрируют возможность создания экономически эффективной альтернативы коммерческим платформам видеоконференций.

Ключевые слова: видеоконференции, WebRTC, P2P-архитектура, децентрализация, React, Socket.IO, реальное время, веб-приложение.

Для цитирования: Толстова И. С., Фомин А. Ю., Шорина К. В. Архитектура и реализация P2P-системы видеосвязи на базе WebRTC // Инженерные технологии. 2025. № 4 (12). С. 17-23.

Original article

ARCHITECTURE AND IMPLEMENTATION OF A P2P VIDEO COMMUNICATION SYSTEM BASED ON WEBRTC

Irina S. Tolstova✉ [1] irin2102ka@mail.ru
Alexander Yu. Fomin [1] al3ck.f044in@yandex.ru
Ksenia V. Shorina [1] shorina.2004@yandex.ru

[1]Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue, 19, Voronezh, 394036, Russia

Abstract. With the growing demand for remote communications, solutions that allow stable video communication without significant infrastructure costs are becoming particularly relevant. The article is devoted to the development of a web application for video conferences using a decentralized P2P architecture. The system is based on WebRTC technology, which provides direct transmission of media streams between participants, which minimizes the load on server resources. The client part is implemented on React with TypeScript, the server part is implemented on Node.js using Socket.IO for signal data exchange. The main functions are implemented: video communication between several participants, text chat with message history, media device management. Special attention is paid to security issues through the use of HTTPS and the generation of unique room identifiers (UUIDs). The conducted testing confirmed the operability of the system in groups of up to 6 participants with a delay of no more than 300 ms. The results demonstrate the possibility of creating a cost-effective alternative to commercial video conferencing platforms.

Keywords: videoconferencing, WebRTC, P2P architecture, decentralization, React, Socket.IO, real-time, web application.

For citation: Tolstova I. S., Fomin A. Yu., Shorina K. V. Architecture and implementation of a P2P video communication system based on WebRTC. Ingenernye tehnologii = Engineering technologies. 2025; (4 (12)): 17-23. (In Russ.).

Введение

Стремительная цифровая трансформация рабочего процесса и переход этого процесса к гибридному типу привели к соразмерному увеличению потребности в надежных средствах удаленных коммуникаций [1-2]. Такие, уже существующие, коммерческие платформы как Zoom и Google Meet располагают достаточно широким функционалом, но зачастую их использование приводит к значительным финансовым затратам. Современные средства видеосвязи в основном основаны на централизованных архитектурах, где передача данных осуществляется через серверы-посредники.

© 2025. Толстова И. С. и др. / Tolstova I. S. et al.

Такой подход упрощает администрирование, но порождает ряд существенных проблем, такие как высокая зависимость от инфраструктуры поставщика услуг, риски нарушения конфиденциальности, потеря данных и снижения производительности при увеличении нагрузки на сервер [3]. В условиях стремительного роста количества удалённых рабочих мест, онлайн-обучения и распределённых команд необходимость в децентрализованных, устойчивых к сбоям и масштабируемых коммуникационных решениях становится особенно значимой.

Альтернативой таким системам выступают решения, построенные на WebRTC (Web Real-Time Communication), позволяющей устанавливать прямые P2P (peer-to-peer) соединения между браузерами пользователей [4]. Эта технология образует связь непосредственно между пользователями, что исключает необходимость промежуточных серверов для передачи аудио- и видеопотоков и снижает затраты на инфраструктуру и минимизирует задержки [5]. Также использование данной технологии обеспечивает высокое качество передачи аудио и видео, а также безопасность взаимодействия за счёт встроенных механизмов шифрования.

Применение P2P-архитектуры позволяет отказаться от централизованных серверов для маршрутизации трафика, что снижает эксплуатационные расходы и повышает устойчивость системы к отказам. Такой подход особенно актуален для сценариев, где требуется автономная работа сети, например, в корпоративных средах с повышенными требованиями к безопасности, в образовательных и исследовательских учреждениях, а также в ситуациях ограниченного доступа к централизованным ресурсам.

Тема реализации видеоконференций на основе WebRTC и P2P-архитектур в настоящее время активно развивается, однако практическая реализация P2P-видеоконференций сталкивается с рядом инженерных и исследовательских проблем.

В работе [6] проанализированы архитектурные варианты систем видеоконференцсвязи: P2P (mesh), использование медиасерверов типа SFU/MCU и гибридные схемы. Автор описывает типичные проблемы полного меша ($n \cdot (n-1)$ потоков), указывает на компромиссы между приватностью и управляемостью, рассматривает практические приёмы оптимизации (выбор кодеков, снижение нагрузки на клиент).

Работа [7] служит техническим справочником по протоколам и рассматривает практические сценарии установления P2P-соединений и типовые ошибки при реализации сигнального сервера.

Авторы работы [8] предлагают концептуальную подсистему видеоконференций, ориентированную на уменьшение роли центральных серверов (бессерверный подход), с акцентом на защищённость и приватность.

Целью работы является разработка децентрализованной системы видеоконференций, сочетающей современные веб-технологии и экономическую эффективность. Для достижения цели решены следующие задачи:

- Проектирование P2P-архитектуры с сервером-координатором для обмена сигнальными данными.
- Реализация адаптивного клиентского интерфейса на React [9] и TypeScript.
- Разработка отказоустойчивой серверной части на Node.js [10].
- Интеграция механизмов безопасности для защиты передаваемых данных.

Практическая значимость разработки заключается в создании технологической платформы, способной обеспечить безопасное и эффективное взаимодействие пользователей без зависимости от сторонних сервисов. Децентрализованный характер такой платформы обеспечивает масштабируемость, отказоустойчивость и независимость от географического положения пользователей, что делает её универсальным инструментом для современных задач цифровой коммуникации.

Научная новизна исследования заключается в разработке архитектурных и алгоритмических принципов построения P2P-систем видеоконференций с использованием WebRTC, учитывающих особенности распределения сетевых нагрузок, маршрутизации потоков данных и обеспечения качества связи при изменении сетевых условий. Особое внимание уделяется вопросам оптимизации установления соединений, балансировки ресурсов и повышению эффективности передачи мультимедийных потоков в условиях непостоянных каналов связи. В отличие от традиционных решений, данная концепция ориентирована на создание самоорганизующейся, адаптивной сети взаимодействия без единого центра управления.

Материал и методы исследования

В основе исследования лежит практический подход к разработке программного обеспечения. Проектирование системы выполнялось с учетом принципов децентрализованной архитектуры.

Технологический стек был выбран исходя из требований к производительности и совместимости:

Клиентская часть: Фреймворк React с языком TypeScript для построения динамического пользовательского интерфейса со строгой типизацией. Для стилизации использованы CSS Modules, обеспечивающие изоляцию стилей.

Серверная часть: Платформа Node.js [11] с фреймворком Express для обработки HTTP-запросов и библиотекой Socket.IO для организации двусторонней связи в реальном времени по протоколу WebSocket [12].

Протоколы связи: WebRTC для установления P2P-соединений и передачи медиапотоков. HTTPS для шифрования всего трафика между клиентом и сервером.

Методы тестирования включали следующие этапы: функциональное тестирование создания комнат, подключения участников, работы аудио/видео и чата; проверку устойчивости соединения при сетевых сбоях; тестирование производительности и адаптивности интерфейса на различных устройствах и в разных браузерах.

Для деплоя использовались облачные платформы: клиентская часть размещена на Vercel, серверная на Render.

Результаты исследования и обсуждения

Разработанная система построена на принципах децентрализованной архитектуры, отличительной чертой которой является прямая передача медиапотоков между участниками (P2P), которая минует центральный сервер. Это решение позволяет минимизировать нагрузку на серверную инфраструктуру, а также снизить задержки при передаче аудио и видео, что конечно же важно для комфортного взаимодействия участников в реальном времени. Архитектурное решение основано на клиент-серверной модели: сервер выступает исключительно в роли координатора, обрабатывая события подключения и отключения пользователей, в то время как основная нагрузка по передаче медиаданных распределяется между клиентскими устройствами. Серверная часть осуществляет критически важный обмен служебными данными – SDP-описаниями и ICE-кандидатами, – без которых установление прямых P2P-соединений невозможно (рисунок 1). SDP-описания содержат информацию о поддерживаемых кодеках, разрешении видео и других параметрах медиапотоков, в то время как ICE-кандидаты представляют возможные сетевые пути для установления соединения через NAT и файерволы. Для обеспечения безопасности и изоляции сеансов связи идентификация виртуальных комнат осуществляется с помощью уникальных идентификаторов, генерируемых по алгоритму UUID v4, что почти полностью исключает коллизии и несанкционированный доступ. Каждая комната представляет собой изолированное пространство, в котором все участники могут обмениваться медиапотоками без риска вмешательства извне. Такой подход не только повышает безопасность системы, но и обеспечивает ее масштабируемость, поскольку каждая новая комната функционирует независимо от других, а сервер обрабатывает только сигнальные сообщения, объем которых несоразмерно меньше объема передаваемых медиаданных.

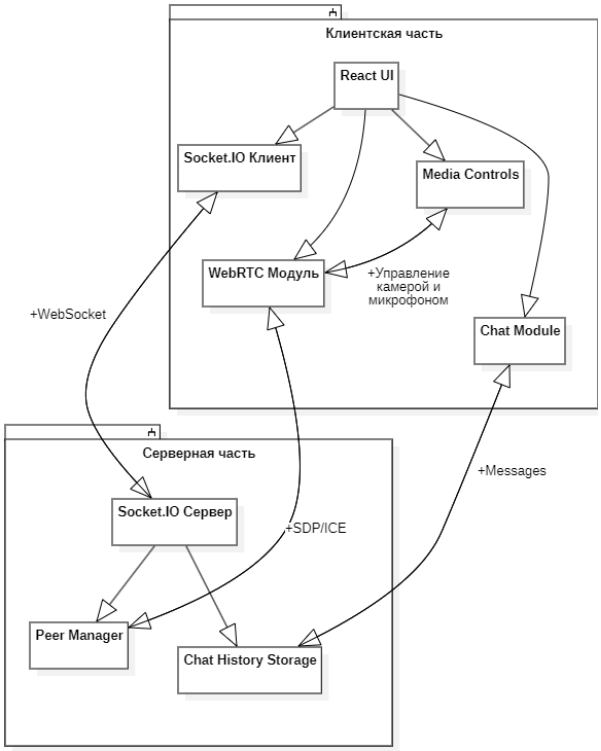


Рисунок 1. Схема клиент-серверного взаимодействия в системе

Figure 1. The scheme of client-server interaction in the system

Клиентская часть приложения реализована с использованием фреймворка React, благодаря чему его структура носит модульный характер, т.е он состоит из функциональных компонентов. Для управления сложным состоянием, связанным с WebRTC-соединениями и медиапотоками, был разработан кастомный хук useWebRTC, который инкапсулирует логику инициализации медиаустройств, создания экземпляров RTCPeerConnection, обработки ICE-кандидатов и управления видеопотоками. Пользовательский интерфейс системы включает три основных страницы: главную (Main), страницу комнаты (Room) и страницу 404 (NotFound404). На странице комнаты реализована адаптивная видеопанель, которая

динамически изменяет расположение и размер видеоэлементов в зависимости от количества участников с помощью алгоритма calculateLayout, что обеспечивает оптимальное визуальное восприятие как на десктопных устройствах, так и на мобильных платформах.

Таблица 1. Сравнительная эффективность традиционных и P2P-решений

Table 1. Comparative effectiveness of Traditional and P2P solutions

Критерий / Criterion	Централизованная архитектура / Centralized architecture	Разработанная P2P-система / Developed P2P system
Нагрузка на сервер / Server Load	Высокая	Минимальная (только сигнальные данные)
Задержка передачи / Transmission Latency	Средняя (100-500 мс)	Низкая (менее 300 мс)
Затраты на инфраструктуру / Infrastructure Costs	Высокие	Низкие
Масштабируемость / Scalability	Требует мощных серверов	Легко масштабируется за счет P2P

Серверная часть реализована на Node.js, а также использует фреймворк Express для обработки статических запросов и библиотеку Socket.IO для управления событиями в реальном времени. Для организации виртуальных пространств взаимодействия применяется встроенный в Socket.IO функционал rooms, служащий для эффективного группирования пользователей. При подключении нового участника сервер выполняет валидацию идентификатора комнаты и осуществляет широковещательное уведомление существующих участников о появлении нового пира, инициируя тем самым процесс обмена SDP-оферами и ICE-кандидатами. Дополнительно в системе реализован текстовый чат с возможностью хранения истории до 100 сообщений в оперативной памяти сервера, где при превышении установленного лимита происходит автоматическое удаление самых старых сообщений для оптимизации использования ресурсов памяти, при этом вся история чата постоянно синхронизируется между всеми участниками комнаты.

Процесс установления P2P-соединения между участниками представляет собой поэтапную цепочку действий, начинающуюся с создания SDP-офера первым участником, содержащего описание поддерживаемых кодеков и параметров медиапотока его устройства и браузера. Данная офера транслируется через сигнальный сервер второму участнику, который на ее основе формирует SDP-ответ, передаваемый обратно через серверную инфраструктуру. Немаловажным этапом является обмен ICE-кандидатами, а именно сетевыми адресами, позволяющими установить соединение, преодолевая ограничения NAT и файерволов. Финальной стадией процесса становится установление прямого P2P-соединения, после чего медиапотоки начинают циркулировать напрямую между участниками, минуя промежуточные серверные узлы (рисунок 2).

Вопросы безопасности и производительности занимают центральное место в архитектуре разработанной системы. Для обеспечения конфиденциальности передаваемых данных все коммуникации между клиентом и сервером осуществляются по защищенному протоколу HTTPS. Дополнительным уровнем безопасности служат уже вышеупомянутые идентификаторы комнат, генерируемые по UUIDv4. Важно отметить, что сами медиапотоки в рамках технологии WebRTC защищаются встроенными механизмами шифрования с использованием протоколов DTLS и SRTP, обеспечивающими конфиденциальность и целостность передаваемого аудио- и видеоконтента.

С точки зрения производительности система оптимизирована за счет децентрализованной передачи медиаданных, что позволяет распределить нагрузку между участниками сессии и минимизировать требования к серверной инфраструктуре. Проведенное нагрузочное тестирование подтвердило стабильную работу системы в группах до 6-8 участников с сохранением приемлемого качества связи. Однако дальнейшее масштабирование системы и увеличение количества одновременных пользователей может потребовать внедрения архитектуры SFU (Selective Forwarding Unit).

Разработанная система подтверждает возможность создания полнофункционального инструмента для видеоконференций с использованием открытых веб-стандартов. Ключевым преимуществом является значительное снижение операционных затрат благодаря P2P-архитектуре, что делает решение особенно привлекательным для малого и среднего бизнеса, образовательных учреждений и стартапов.

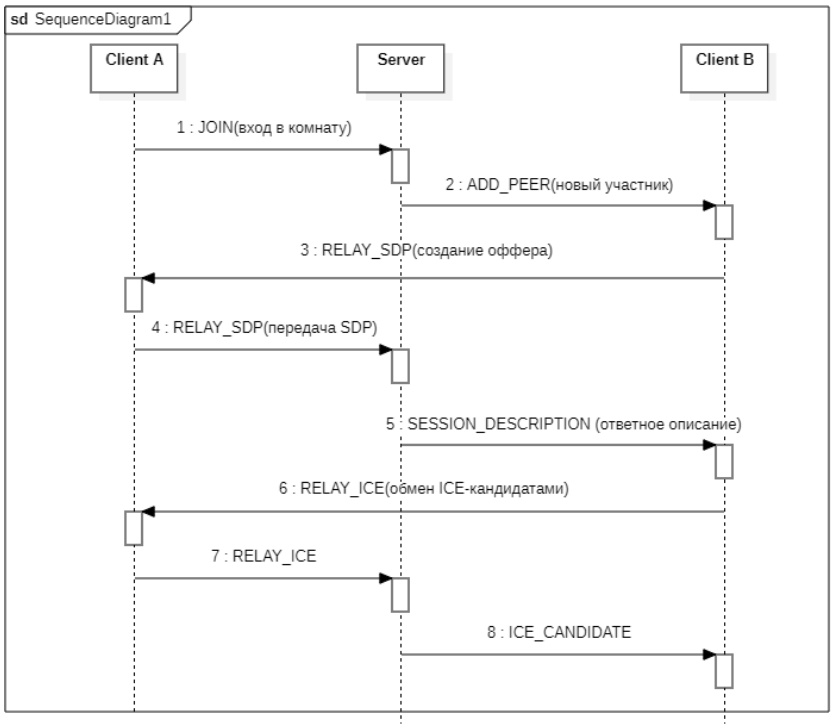


Рисунок 2. Диаграмма последовательности установки WebRTC соединения

Figure 2. Diagram of the sequence of establishing a WebRTC connection

Основное ограничение текущей реализации связано с самой природой P2P-сетей: при большом количестве участников (более 6-8) пропускная способность канала каждого пользователя может стать своеобразным горлышком бутылки, а установка соединений "peer-to-peer" усложняет управление. Решением этой проблемы является переход к гибридной или SFU-архитектуре.

Перспективы развития системы включают:

• внедрение TURN-сервера для обеспечения соединения между участниками, находящимися за симметричным NAT;

• добавление функции демонстрации экрана с использованием API getDisplayMedia;

• интеграцию с системами аутентификации (OAuth 2.0, JWT) для разграничения доступа;

• реализацию записи конференций и их хранения в облачном хранилище.

Проведенная работа демонстрирует, что современные веб-технологии позволяют создавать конкурентоспособные коммуникационные решения, не уступающие по базовому функционалу коммерческим аналогам, но превосходящие их по экономической эффективности и гибкости.

Заключение

В ходе работы успешно разработана и протестирована децентрализованная система видеоконференций. Доказано, что связка технологий WebRTC, React и Node.js позволяет создать производительное и надежное решение для организации видеосвязи в реальном времени. Основные преимущества системы — минимальная нагрузка на сервер, низкая задержка передачи данных и экономическая эффективность.

Реализованный прототип обладает всеми минимальными функциями, необходимыми для проведения онлайн-встреч: многопользовательская видеосвязь, текстовый чат, управление медиаустройствами. Применение современных практик разработки (TypeScript, кастомные хуки, модульная архитектура) обеспечивает поддержку и возможность дальнейшего расширения функционала.

Таким образом, результаты работы подтверждают перспективность использования децентрализованных P2P-архитектур для создания коммуникационных платформ, что открывает новые возможности для развития инструментов удаленного взаимодействия в различных сферах деятельности.

Литература

1. Chin H, Marasini DP, Lee D. Digital transformation trends in service industries. Serv Bus. 2023;17(1):11–36. doi: 10.1007/s11628-022-00516-6. Epub 2022 Dec 20. PMCID: PMC9763787.

2. Цифровизация внутрикорпоративных коммуникаций / И. А. Зубцов, П. В. Дерюгин, Д. Ю. Панарин [и др.] // Стратегия и тактика управления предприятием в переходной экономике : сборник материалов XX ежегодного открытого конкурса научно-исследовательских работ студентов и молодых ученых в области экономики и управления, Волгоград, 01–30 апреля 2020 года. Том Выпуск 40. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2020. – С. 42-44.

3. Вишнякова, А. Н. Методы защиты облачных серверов / А. Н. Вишнякова // Материалы 79-й студенческой научной конференции : сборник статей, Брянск, 18–22 марта 2024 года. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2024. – С. 649-651.

4. WebRTC: Протоколы связи в реальном времени и API-интерфейсы // Рекомендации W3C. – 2021. – URL: https://www.w3.org/TR/webrtc / (дата обращения: 30.10.2025).

5. Барлықбай, Н. Внутренняя и внешняя архитектура webrtc / Н. Барлықбай, М. Даулетбек, С. Маманова // Интернаука. – 2025. – № 21-1(385). – С. 43-46.

6. Статников, А. С. Аспекты реализации систем конференц-связи на основе технологии webrtc / А. С. Статников, Д. А. Фролов, И. Д. Торжевский // Решетневские чтения : Материалы XXVI Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. В 2-х частях, Красноярск, 09–11 ноября 2022 года / Под общей редакцией Ю.Ю. Логинова. Том Часть 2. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2022. – С. 360-362.

7. Хохряков, Д. С. Исследование протоколов webrtc / Д. С. Хохряков, А. В. Тарутин // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. – 2021. – Т. 1. – С. 47-51.

8. Ненашев, А. В. Подсистема видеоконференций защищенного бессерверного интернета / А. В. Ненашев, А. Ю. Толстенко // Математические методы в технологиях и технике. – 2022. –№7. – С. 37-51.

9. Чепурной, М. П. Сравнительный анализ фреймворков для фронтенд-разработки / М. П. Чепурной, А. С. Дяченко // Международный студенческий научный вестник. – 2025. – № 1. – С. 12.

10. Борсук, Н. А. Современные тенденции в веб-разработке: анализ фреймворков и библиотек / Н. А. Борсук, С. А. Преминина, Ф. В. Капитанов // Инновации в науке и технике: глобальные вызовы и возможности : Сборник статей II Международной научно-практической конференции, Москва, 12 февраля 2024 года. – Москва: Издательство ЦДПО «Цифровая академия», 2024. – С. 60-69.

11. Букирева, Л. А. Исследование характеристик CMS на платформе Node.js / Л. А. Букирева // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО : XLVII научная и учебно-методическая конференция Университета ИТМО по тематикам: экономика; менеджмент, инноватика, Санкт-Петербург, 30 января 2018 года. Том 7. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2018. – С. 75-78.

12. Karam, S. Using Socket.io Approach for Many-to-Many Bi-Directional Video Conferencing / S. Karam, B. Abdulrahman // AL-Rafidain Journal of Computer Sciences and Mathematics. – 2022. – Vol. 16, No. 1. – P. 81-86.

References

1. Chin H, Marasini DP, Lee D. Digital transformation trends in service industries. Serv Bus. 2023;17(1):11–36. doi: 10.1007/s11628-022-00516-6. Epub 2022 Dec 20. PMCID: PMC9763787.

2. Digitalization of internal corporate communications / I. A. Zubtsov, P. V. Deryugin, D. Yu. Panarin [et al.] // Strategy and tactics of enterprise management in a transition economy: collection of materials from the XX annual open competition of research works of students and young scientists in the field of economics and management, Volgograd, April 1–30, 2020. Volume Issue 40. – Volgograd: Volgograd State Technical University, 2020. – Pp. 42–44.

3. Vishnyakova, A. N. Methods of protecting cloud servers / A. N. Vishnyakova // Proceedings of the 79th student scientific conference: collection of articles, Bryansk, March 18–22, 2024. – Bryansk: Bryansk State Technical University, 2024. – P. 649–651.

4. WebRTC: Real-time communication protocols and APIs // W3C Recommendations. – 2021. – URL: https://www.w3.org/TR/webrtc / (date of access: 10/30/2025).

5. Barlykbay, N. Internal and external architecture of webrtc / N. Barlykbay, M. Dauletbek, S. Mamanova // Internauka. – 2025. – No. 21-1(385). – pp. 43-46.

6. Statnikov, A. S. Aspects of the implementation of conference call systems based on webrtc technology / A. S. Statnikov, D. A. Frolov, I. D. Torzhevsky // Reshetnev Readings: Proceedings of the XXVI International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of the General Designer of Rocket and Space Systems, Academician M.F. Reshetnev. In 2 parts, Krasnoyarsk, November 9–11, 2022 / General

editor Yu.Yu. Volume Part 2. – Krasnoyarsk: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev", 2022. – P. 360–362.

7. Khokhryakov, D. S. Research of webrtc protocols / D. S. Khokhryakov, A. V. Tarutin // Innovative technologies: theory, tools, practice. - 2021. - Vol. 1. - Pp. 47-51.

8. Nenashev, A. V. Videoconferencing subsystem of a secure serverless Internet / A. V. Nenashev, A. Yu. Tolstenko // Mathematical methods in technology and engineering. - 2022. - No. 7. - P. 37-51.

9. Chepurnoy, M. P. Comparative analysis of frameworks for front-end development / M. P. Chepurnoy, A. S. Dyachenko // International Student Scientific Bulletin. - 2025. - No.1. - P.12.

10. Borsuk, N. A. Modern trends in web development: analysis of frameworks and libraries / N. A. Borsuk, S. A. Preminina, F. V. Kapitanov // Innovations in science and technology: global challenges and opportunities: Collection of articles from the II International scientific and practical conference, Moscow, February 12, 2024. - Moscow: Publishing house of the Center for Advanced Professional Education "Digital Academy", 2024. - P. 60-69.

11. Bukireva, L. A. Study of CMS characteristics on the Node.js platform / L. A. Bukireva // Almanac of scientific works of young scientists of ITMO University: XLVII scientific and educational-methodical conference of ITMO University on the topics: economics; management, innovation, St. Petersburg, January 30 – February 2, 2018. Vol. 7. – St. Petersburg: ITMO University, 2018. – P. 75-78.

12. Karam, S. Using Socket.io Approach for Many-to-Many Bi-Directional Video Conferencing / S. Karam, B. Abdulrahman // AL-Rafidain Journal of Computer Sciences and Mathematics. – 2022. – Vol. 16, No. 1. – P. 81-86.

Сведения об авторах

ФИО	*Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)*
Толстова Ирина Сергеевна	ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", старший преподаватель кафедры Информационных технологий, моделирования и управления, Irin2102ka@mail.ru SPIN-код 8116-7338 ORCID 0000-0002-2804-3067 Researcher ID A-5974-2014 Scopus Autor ID 57194008059
Фомин Александр Юрьевич	ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", обучающийся направления подготовки 09.04.03 Прикладная информатика, al3ck.f044in@yandex.ru
Шорина Ксения Викторовна	ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", обучающийся направления подготовки 09.04.03 Прикладная информатика, shorina.2004@yandex.ru

Authors information

Last name, first name, patronymic	*Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)*
Tolstova Irina Sergeevna	Voronezh State University of Engineering Technologies, Senior Lecturer, Department of Information Technology, Modeling and Control, Irin2102ka@mail.ru SPIN-code 8116-7338 ORCID 0000-0002-2804-3067 Researcher ID A-5974-2014 Scopus Autor ID 57194008059
Fomin Alexander Yuryevich	Voronezh State University of Engineering Technologies, student of the training program 09.04.03 Applied Informatics, al3ck.f044in@yandex.ru
Shorina Ksenia Viktorovna	Voronezh State University of Engineering Technologies, student of the training program 09.04.03 Applied Informatics, shorina.2004@yandex.ru

статья поступила в редакцию	одобрена после рецензирования	принята к публикации
03.11.2025	14.11.2025	27.11.2025

the article was submitted	approved after reviewing	accepted for publication
03.11.2025	14.11.2025	27.11.2025

Научная статья

УДК 004.8

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СКЛАДСКИМИ ПРОЦЕССАМИ: АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД И МЕТОДЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

Вадим Вячеславович Баркалов [1] m7a7e7s7t7r7o7@ya.ru
Даниэль Грамосович Ена [1] workenadaniel@yandex.ru
Людмила Анатольевна Коробова✉ [2] Lyudmila_korobova@mail.ru

[1]Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-кт Революции, д. 19, г. Воронеж, 394036, Россия
[2]ООО «Компания «Технопарк - В», наб. Авиастроителей, д. 4А, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. В условиях роста объемов товарооборота и усложнения логистических цепочек складская инфраструктура становится критически важным элементом производственно-распределительных систем. Традиционные подходы к управлению складом, основанные преимущественно на ретроспективном учёте и периодических инвентаризациях, демонстрируют ограниченную эффективность при высокой динамике операций и расширении номенклатуры. Настоящая работа посвящена разработке и анализу интеллектуальной системы управления складскими процессами, ориентированной на объединение учетных, аналитических и прогнозных функций в рамках единой цифровой платформы. Целью исследования является обоснование применения аналитических методов и элементов машинного прогнозирования для повышения прозрачности и управляемости складских операций. В рамках поставленной цели рассматриваются задачи построения многоуровневой архитектуры системы, организации непрерывного контроля остатков, реализации механизмов прогнозирования расходования товаров и разработки адаптивной модели оповещений. Особое внимание уделяется вопросам интеграции с существующими корпоративными системами и обеспечению устойчивости вычислительных процессов при изменении нагрузки. В статье описан подход, при котором фактические операционные данные дополняются результатами модельных расчетов, что позволяет выявлять отклонения на ранних стадиях и поддерживать принятие управленческих решений вблизи реального времени. Использование статистических методов прогнозирования, в частности линейной регрессии, предоставляет возможность оценивать ожидаемую динамику складских остатков без существенного усложнения вычислительного контура. Полученные результаты подтверждают практическую применимость предложенного решения и его потенциал для повышения эффективности логистических процессов на предприятиях различного масштаба.

Ключевые слова: интеллектуальный склад, складская логистика, управление запасами, аналитические системы, машинное прогнозирование, микросервисная архитектура, контроль остатков, уведомления, цифровая трансформация.

Для цитирования: Баркалов В. В., Ена Д. Г., Коробова Л. А. Интеллектуальная система управления складскими процессами: аналитический подход и методы автоматизации // Инженерные технологии. 2025. № 4 (12). С. 24-29.

Original article

INTELLIGENT WAREHOUSE PROCESS MANAGEMENT SYSTEM: AN ANALYTICAL APPROACH AND AUTOMATION METHODS

Vadim V. Barkalov [1] m7a7e7s7t7r7o7@ya.ru
Daniel G. Ena [1] workenadaniel@yandex.ru
Lyudmila A. Korobova✉ [2] Lyudmila_korobova@mail.ru

[1]Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue, 19, Voronezh, 394036, Russia
[2]Technopark-V Company LLC, 4A Aviastroiteley Embankment, Voronezh, 394036, Russia

Abstract. With increasing turnover and increasingly complex supply chains, warehouse infrastructure is becoming a critical element of production and distribution systems. Traditional approaches to warehouse management, based primarily on retrospective accounting and periodic inventories, demonstrate limited effectiveness in the face of highly dynamic operations and expanding product ranges. This paper focuses on the development and analysis of an intelligent warehouse management system designed to integrate accounting, analytical, and forecasting functions within a single digital platform. The aim of the study is to substantiate the use of analytical methods and elements of machine forecasting to improve the transparency and manageability of warehouse operations. This objective includes constructing a multi-level system architecture, organizing continuous inventory control, implementing mechanisms for forecasting product consumption, and developing an adaptive alert model. Particular attention is paid to integration with existing corporate systems and ensuring the stability of computing processes under changing loads. This article describes an approach that supplements actual operational data with model calculations, enabling early detection of deviations and supporting near-real-time management decisions. The use of statistical forecasting methods, particularly linear regression, allows for the assessment of expected inventory dynamics without significantly complicating the computational process. The results

© 2025. Баркалов В. В. и др. / Barkalov V. V. et al.

confirm the practical applicability of the proposed solution and its potential for improving the efficiency of logistics processes at enterprises of various sizes.

Keywords: intelligent warehouse, warehouse logistics, inventory management, analytics systems, machine forecasting, microservice architecture, inventory control, notifications, digital transformation.

For citation: Barkalov V. V., Ena D. G., Korobova L. A. Intelligent warehouse process management system: an analytical approach and automation methods. Ingenernye tehnologii = Engineering technologies. 2025; (4 (12)): 24-29. (In Russ.).

Введение

Современная складская логистика постепенно смещается от традиционного учёта к интеллектуальным инструментам анализа и прогнозирования. Рост товаропотоков, усложнение ассортимента, ускорение операционных циклов и постоянное давление на себестоимость формируют потребность в системах, способных не только фиксировать остатки, но и выявлять фактические закономерности, обеспечивать ранние предупреждения о рисках и поддерживать принятие решений [1, 2]. Новая волна цифровизации предприятий усиливает внимание к архитектурам, которые объединяют данные, модельные методы и автоматизированные проверки в единый операционный контур.

Цель настоящей статьи — представить разработанную систему «умный склад» как инструмент повышения эффективности складских процессов за счёт применения аналитических методов и машинного прогнозирования. Задачи исследования включают описание ключевых компонентов системы, оценку функций автоматического инвентаризационного контроля, анализ механизмов прогнозирования расходования запасов и обоснование практической полезности внедрения такого комплекса в производственно-логистическую среду.

Основная часть

Разработка опирается на принцип многослойной цифровой архитектуры, где первичные данные проходят очистку, приведение к единым форматам и последующую аналитическую обработку. Представленный подход обеспечивает единое пространство, в котором сочетаются оперативные показатели и модельные прогнозы [3]. Особое внимание уделено непрерывности поступления информации, поскольку качество аналитической части прямо зависит от полноты и корректности учетных процессов.

Система гарантирует стабильную работу как в условиях крупного ассортимента, так и при значительных флуктуациях товарных потоков. В рамках платформы предусмотрена гибкая структуризация номенклатуры, что позволяет задавать как простые, так и иерархические модели товарных групп без утраты производительности.

Ключевым элементом является подсистема интеллектуального контроля остатков [4]. Она фиксирует фактические позиции, корректирует аномальные значения и формирует целостный срез состояния склада. Для устранения расхождений используется комбинация прямых данных, поступающих от системы учёта, и дополнительных проверок, работающих по триггерам. Такой механизм создаёт возможность раннего обнаружения отклонений, которые в традиционных WMS часто проявляются только в момент проведения больших инвентаризаций.

Система способна инициировать выборочные проверки при выявлении характеристик, отличающихся от ожидаемых значений. Это позволяет минимизировать накопление ошибок и поддерживать доступность актуальной информации даже при высокой интенсивности складских операций. На рисунке 1 показаны основные элементы системы «умный склад» и взаимодействие между ними с учетом параметра времени t_i.

Интеллектуальная часть разработки основана на применении статистических и машинных методов для оценки динамики товарного оборота [5]. В отличие от стандартных инструментов отчётности, решение предоставляет прогнозы скорости расходования и момент возможного исчерпания запасов.

Для товарных позиций с устойчивой и частой историей применяется модель простой линейной регрессии [1, 2]. Данная модель позволяет выявить основную тенденцию (тренд) в данных и экстраполировать ее на будущее.

Общий вид модели линейной регрессии представляется следующей формулой:

$$\hat{q}(t) = \beta_0 + \beta_1 \cdot t,$$

где β_0 – значение функции при t=0 (количество остатков на складе в момент начала рассмотрения процесса), β_1 – скорость изменения остатков, t – время наблюдения.

Модель ищет такую прямую, которая лучше всего проходит среди всех точек, делается это через минимизацию:

$$\sum_i (q_i - \beta_0 - \beta_1 \cdot t_i)^2 \to \min,$$

где q_i - остатки товара в i-й момент времени t_i.

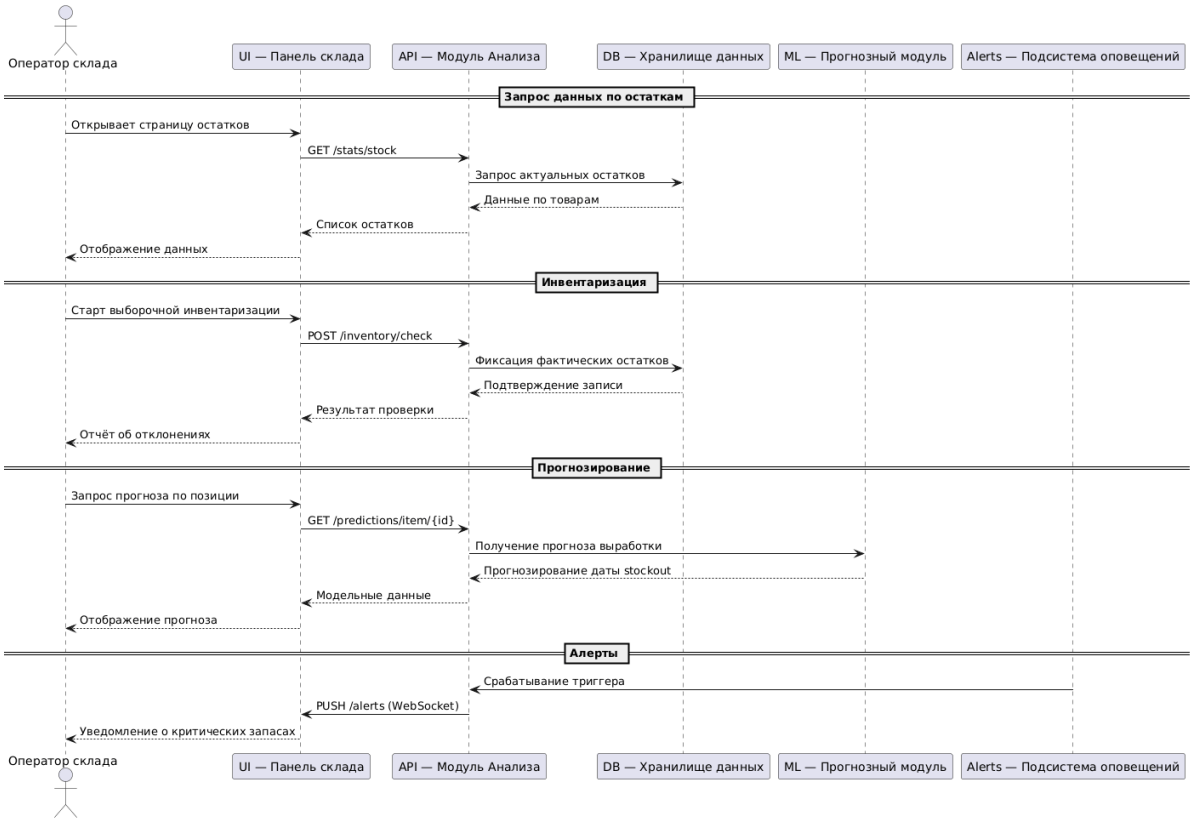


Рисунок 1. Диаграмма последовательности

Figure 1. Sequence diagram

Прогнозирование осуществляется в непрерывном режиме, что даёт возможность оперативно реагировать на изменения и предотвращать ситуации, ведущие к дефициту или нерациональному накоплению запасов.

Для практического применения аналитических данных необходим своевременный механизм оповещений [6]. В системе реализована многоуровневая модель алертов, охватывающая широкий спектр ситуаций: критический уровень остатков, резкие скачки спроса, нарушение ожидаемой динамики, несоответствие поступлений структурным ожиданиям, рисунок 2.

Каждый триггер опирается на сочетание фактических данных и прогнозных оценок. Такой подход обеспечивает более точную диагностику потенциальных рисков, снижая количество ложных срабатываний и повышая информативность уведомлений. Подсистема позволяет настраивать приоритеты и охватывает как стратегические показатели, так и узкие операционные случаи.

Решение реализовано в виде микросервисной архитектуры, что обеспечивает модульность, масштабируемость и устойчивость к изменениям в рабочих нагрузках [7]. Ключевые сервисы отвечают за статистику, прогнозы, отчёты, внешние интеграции и оперативные алерты. Такой подход упрощает расширение функциональности за счёт добавления новых моделей или специализированных вычислительных модулей.

Интеграция возможна через REST-интерфейсы, что позволяет подключать систему к любым корпоративным WMS или ERP. Особым преимуществом является возможность автоматического обучения моделей без остановки рабочего контура. Это создаёт условия для стабильного развития аналитической части без вмешательства в операционный поток данных.

Применение интеллектуальной системы управления складом обеспечивает ряд значимых практических эффектов:

1) снижение вероятности дефицита и перегрузки складских зон за счёт прогнозирования расходования запасов;

2) уменьшение трудоёмкости инвентаризаций благодаря постоянному контролю корректности данных;

3) оптимизация закупочной политики и уровня страховых запасов;

4) повышение точности планирования за счёт совмещения фактических и прогнозных данных;

5) улучшение наблюдаемости процессов и повышение качества управленческих решений.

На предприятиях с высокой интенсивностью товарооборота подобные функции формируют основу для перехода к более гибким моделям управления запасами.

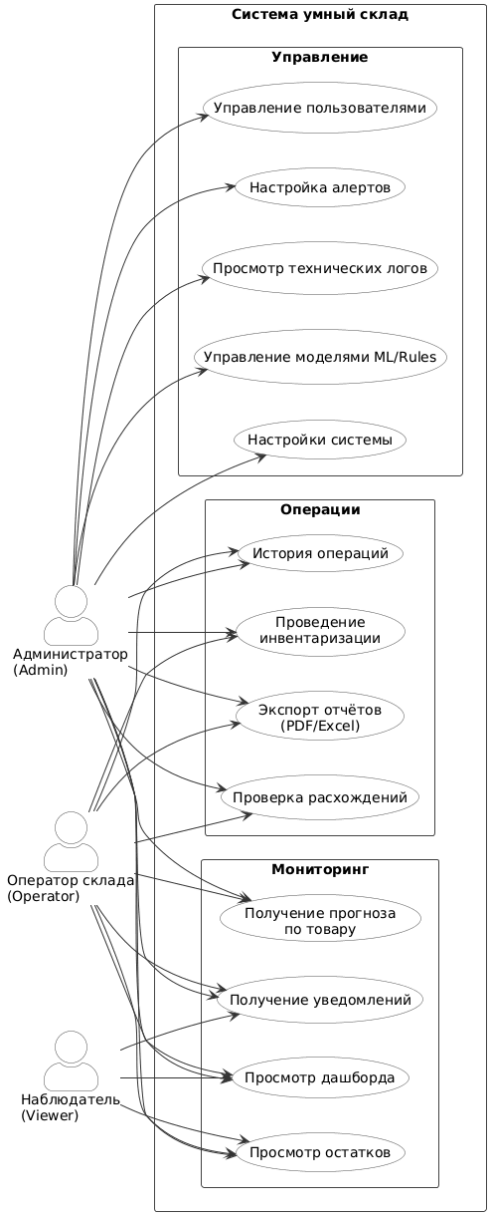


Рисунок 2. Диаграмма вариантов использования

Figure 2. Use case diagram

Заключение

Комплекс «умный склад» представляет собой сочетание учётных, аналитических и прогнозных инструментов, способных обеспечить более глубокое понимание состояния складских процессов. Новизна разработки заключается в объединении оперативной информации с интеллектуальными методами анализа, позволяющими создать самокорректирующуюся систему поддержки решений.

Представленный подход приближает складскую логику к современным принципам адаптивного управления, где решения опираются не только на ретроспективные данные, но и на оценку вероятных событий. Это формирует основу для дальнейшего совершенствования логистической инфраструктуры и расширения функциональных возможностей за счёт внедрения новых моделей и интеграционных решений.

Разработанная интеллектуальная система управления складскими процессами демонстрирует возможность перехода от пассивного учёта к аналитически обоснованной модели контроля и прогнозирования. Интеграция оперативных данных с расчетными оценками позволяет сформировать более целостное представление о состоянии склада и повысить устойчивость управления при высокой вариативности товарных потоков. Представленный подход ориентирован не только на фиксацию текущих показателей, но и на выявление скрытых тенденций, которые в традиционных системах остаются вне поля внимания до момента возникновения критических отклонений.

Использование прогнозных моделей в сочетании с механизмами автоматических проверок обеспечивает снижение накопления учетных ошибок и сокращение зависимости от трудоемких инвентаризационных процедур. Реализация многоуровневой системы оповещений повышает оперативность реакции на потенциальные риски и способствует более рациональному распределению ресурсов. Микросервисная архитектура решения создает условия для поэтапного расширения функциональности и адаптации к требованиям конкретных предприятий без нарушения функционирования основного операционного контура.

Практическая значимость разработки заключается в возможности ее внедрения в существующую логистическую инфраструктуру с минимальными изменениями со стороны базовых учетных систем. Полученные результаты позволяют рассматривать интеллектуальные складские платформы как основу для дальнейшего развития цифровых инструментов управления запасами и формирования более гибких и устойчивых логистических моделей в условиях современной экономики.

Литература

1. Экономико-математическая модель решения логистических задач бизнес-процессов в технологических системах / Л. А. Коробова, Е. Н. Ковалева, Е. А. Саввина [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2021. – Т. 83, № 3(89). – С. 226-232.

2. Математическое обеспечение информационно-управляющей системы для хранения продукции с ограниченным сроком хранения / Д. В. Арапов, Н. Ю. Юдина, В. А. Курицын, Л. А. Коробова // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17, № 1. – С. 7-18.

3. Лисовский, А.Л. Применение нейросетевых технологий для разработки систем управления // Стратегические решения и риск-менеджмент. — 2020. — Т. 11, № 4. — С. 378–389. — Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-neyrosetevyh-tehnologiy-dlya-razrabotki-sistem-upravleniya (дата обращения: 13.11.2024).

4. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс. — 2-е изд. — Москва: Вильямс, 2006. — 1104 с.

5. Евстратова, Е.И. Применение нейросетевого анализа в процессах управления персоналом // Молодой ученый. — 2018. — № 35 (221). — С. 31–33.

6. Азарнова, Т.В. Повышение эффективности методов управления развитием персонала на основе нейросетевых моделей и нечетких экспертных технологий / Т. В. Азарнова, В. В. Степин, И. Н. Щепина // Вестник ВГУ. Серия: Экономика и управление. — 2014. — № 3. — С. 31–38. — Режим доступа: https://journals.vsu.ru/econ/article/view/9777 (дата обращения: 13.11.2024).

7. Литвиненко, Л.В. Моделирование процесса нагрузки API специализированного программного обеспечения в ограниченной среде / Л. В. Литвиненко, Л. А. Коробова // Инженерные технологии. – 2025. – № 3(11). – С. 64-70.

References

1. Economic and mathematical model for solving logistics problems of business processes in technological systems / L. A. Korobova, E. N. Kovaleva, E. A. Savvina [et al.] // Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. - 2021. - Vol. 83, No. 3 (89). - Pp. 226-232.

2. Mathematical support for an information management system for storing products with a limited shelf life / D. V. Arapov, N. Yu. Yu. Yudina, V. A. Kuritsyn, L. A. Korobova // Modeling of systems and processes. - 2024. - Vol. 17, No. 1. - Pp. 7-18.

3. Lisovsky, A.L. Application of neural network technologies for the development of control systems // Strategic decisions and risk management. - 2020. - Vol. 11, No. 4. - Pp. 378-389. - Access mode: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-neyrosetevyh-tehnologiy-dlya-razrabotki-sistem-upravleniya (date of access: 13.11.2024).

4. Khaikin, S. Neural networks: a complete course. - 2nd ed. - Moscow: Williams, 2006. - 1104 p.

5. Evstratova, E.I. Application of neural network analysis in personnel management processes // Young scientist. - 2018. - No. 35 (221). - Pp. 31-33.

6. Azarnova, T.V. Improving the Efficiency of Personnel Development Management Methods Based on Neural Network Models and Fuzzy Expert Technologies / T. V. Azarnova, V. V. Stepin, I. N. Shchepina // VSU Bulletin. Series: Economics and Management. - 2014. - No. 3. - Pp. 31-38. - Access mode: https://journals.vsu.ru/econ/article/view/9777 (accessed: 13.11.2024).

7. Litvinenko, L. V. Modeling the API load process of specialized software in a limited environment / L. V. Litvinenko, L. A. Korobova // Engineering Technologies. - 2025. - No. 3 (11). - Pp. 64-70.

Сведения об авторах

ФИО	*Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)*
Баркалов Вадим Вячеславович	магистрант, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", магистр кафедры Информационных технологий, моделирования и управления, m7a7e7s7t7r7o7@ya.ru ORCID 0009-0000-7904-7626
Ена Даниэль Грамосович	магистрант, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", магистр кафедры Информационных технологий, моделирования и управления, workenadaniel@yandex.ru ORCID 0009-0005-6957-3258
Коробова Людмила Анатольевна	кандидат технических наук, доцент, ООО «Компания «Технопарк-В», инженер-программист, Lyudmila_korobova@mail.ru SPIN-код 1098-6488 ORCID 0000-0003-1349-732X Author ID 351658

Authors information

Last name, first name, patronymic	*Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)*
Barkalov Vadim Vyacheslavovich	master's student, Voronezh state university of engineering technologies, master's student of the department of Information technology, modeling and management, m7a7e7s7t7r7o7@ya.ru ORCID 0009-0000-7904-7626
Ena Daniel Gramosovich	master's student, Voronezh state university of engineering technologies, master's student of the department of Information technology, modeling and management, workenadaniel@yandex.ru ORCID 0009-0005-6957-3258
Korobova Lyudmila Anatolyevna	candidate of technical sciences, associate professor, Technopark-V Company LLC, software engineer, Lyudmila_korobova@mail.ru SPIN-code 1098-6488 ORCID 0000-0003-1349-732X Author ID 351658

статья поступила в редакцию	одобрена после рецензирования	принята к публикации
08.09.2025	01.10.2025	05.12.2025

the article was submitted	approved after reviewing	accepted for publication
08.09.2025	01.10.2025	05.12.2025

Научная статья

УДК 004.9

ИНТЕГРАЦИЯ ТОПЛИВНЫХ КАРТ В СИСТЕМУ МОНИТОРИНГА

Галина Павловна Некрасова [1] galinanekrasova629@yandex.ru
Михаил Владимирович Корчагин ✉ [1] korchaginmv@rambler.ru

[1]Воронежский государственный университет инженерных технологий, проспект Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. В данной статье обсуждается проблема оптимизации учета и контроля расхода топлива на предприятиях, использующих транспортные средства. Предлагается решение в виде интеграции данных с топливных карт в систему мониторинга транспорта. Целью исследования является повышение эффективности управления топливными ресурсами, снижение человеческого фактора. В работе обосновывается необходимость объединения данных о заправках с топливных карт с данными, получаемыми от бортового оборудования системы мониторинга (GPS/ГЛОНАСС трекеров, датчиков уровня топлива). Предлагается архитектура интегрированной системы. Представлены результаты экспериментального внедрения предложенной системы. Продемонстрировано значительное улучшение точности учета топлива, сокращение расхождений между фактическим и учётным расходом, а также повышение прозрачности операций с топливом. Сделан вывод о целесообразности и экономической эффективности интеграции топливных карт в систему мониторинга транспорта.

Ключевые слова: топливные карты, система мониторинга, GPS/Глонасс, расход топлива, оптимизация, контроль, интеграция, транспорт, управление ресурсами.

Для цитирования: Некрасова Г. П., Корчагин М. В. Интеграция топливных карт в систему мониторинга // Инженерные технологии. 2025. № 4 (12). С. 30-35.

Original article

INTEGRATION OF FUEL CARDS INTO THE MONITORING SYSTEM

Galina P. Nekrasova [1] galinanekrasova629@yandex.ru
Mikhail V. Korchagin ✉ [1] korchaginmv@rambler.ru

[1]Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue, 19, Voronezh, 394036, Russia

Abstract. This article discusses the problem of optimizing fuel consumption accounting and control at enterprises using vehicles. A solution is proposed in the form of integrating data from fuel cards into a transport monitoring system. The purpose of the study is to improve the efficiency of fuel resource management and reduce the human factor. The paper substantiates the need to combine data on refueling from fuel cards with data obtained from the on-board equipment of the monitoring system (GPS/GLONASS trackers, fuel level sensors). The architecture of the integrated system is proposed. The results of the experimental implementation of the proposed system are presented. A significant improvement in the accuracy of fuel accounting, a reduction in discrepancies between actual and accounting consumption, and an increase in the transparency of fuel transactions are demonstrated. A conclusion is made on the feasibility and cost-effectiveness of integrating fuel cards into the transport monitoring system.

Keywords: fuel cards, monitoring system, GPS/GLONASS, fuel consumption, optimization, control, integration, transport, resource management.

For citation: Nekrasova G. P., Korchagin M. V. Integration of fuel cards into the monitoring system. Ingenernye tehnologii = Engineering technologies. 2025; (4 (12)): 30-35. (In Russ.).

Введение

В условиях растущей потребности в ресурсосбережении и повышении эффективности и контроля затрат на топливо, горючее является одним из основных и наиболее значительных затрат для компаний, управляющих автопарком. Рентабельное управление расходами на топливо имеет решающее значение для производительности и конкурентоспособности бизнеса. Стандартные методы контроля часто являются трудоемкими, подвержены влиянию человеческого фактора и не позволяют в полной мере отслеживать и оптимизировать потребление топлива [1].

В последние годы системы мониторинга автотранспорта, интегрированные с большинством производителей датчиков, GPS/Глонасс оборудованием и операторов заправочных карт, стали мощным инструментом для управления автопарком [2]. Система мониторинга показывает подробную информацию о местоположении транспортных средств, маршрутах, скорости, расходе топлива и других ключевых показателях. Система также позволяет сравнить объем списанного по картам топлива с реально

© 2025. Некрасова Г. П., Корчагин М. В. / Nekrasova G. P., Korchagin M. V.

израсходованным объемом топлива. Исключает возможность передачи карты третьим лицам.

Однако, чтобы полностью реализовать потенциал этих систем и обеспечить комплексный контроль над затратами на топливо, необходима интеграция с данными о заправках, предоставляемыми топливными картами [3, 4].

Материалы и методы исследования

Процесс интеграции топливного кабинета в данном случае включает следующие этапы.

1. Планирование и определение требований.
2. Настройка и разработка.
3. Тестирование.
4. Внедрение и развертывание.
5. Поддержка и обслуживание.

Рассмотрим каждый этап более подробно.

Этап 1. Планирование и определение требований.

Проводится определение целей интеграции. В данном случае снижение затрат, улучшение контроля, автоматизация отчетности [1, 2]. Выбор поставщика топливных карт и системы мониторинга (рисунок 1).

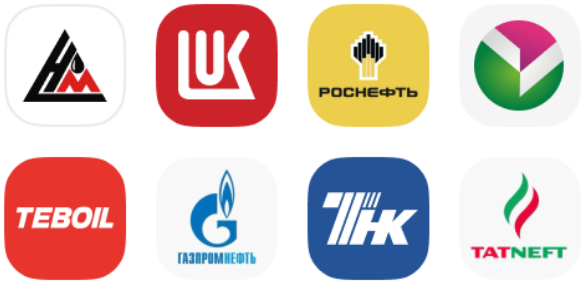


Рисунок 1. Виды топливных кабинетов

Figure 1. Types of fuel cabinets

Обе системы должны поддерживать API или другие методы интеграции. Определение необходимых данных, то есть, какие данные о заправках необходимо передавать в систему мониторинга: дата, время, местоположение, количество топлива, цена и т.д.

Этап 2. Настройка и разработка.

Целью этапа является настройка доступа к API поставщика топливных карт, получение ключей доступа и учетных данных, настройка системы мониторинга для приема данных [3], определение полей данных и правил обработки, разработка механизмов обработки ошибок и повторных попыток, обеспечение надежной передачи данных (рисунок 2).

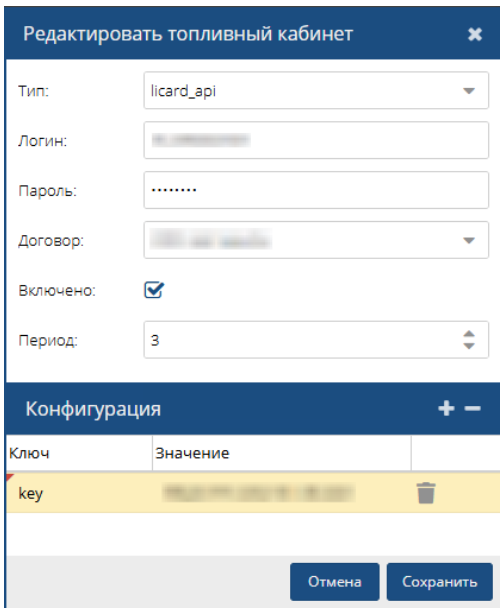


Рисунок 2. Настройка топливного кабинета в системе мониторинга

Figure 2. Setting up a fuel cabinet in the monitoring system

Этап 3. Тестирование.

На данном этапе необходимо провести тестирование передачи данных в различных сценариях, проверка соответствия данных требованиям [4, 5].

Промежуточные итого интеграции топливного кабинета были следующие:

—проверена корректность передачи данных о заправках;

—убедились, что данные, отображаемые в системе мониторинга, соответствуют данным, полученным от поставщика топливных карт (рисунок 3).

Этап 4. Внедрение и развертывание.

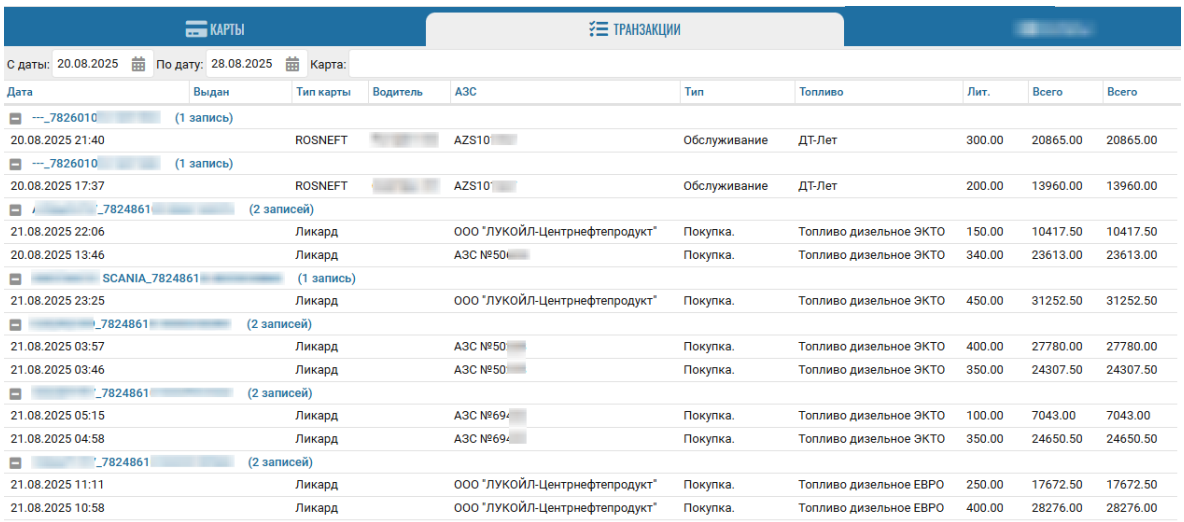
Был рассмотрен вариант подключения на примере приложения soapUI, запущенного на Windows сервере [6]. Данный пример является ознакомительным и не содержит универсальных настроек для разрабатываемого клиентского приложения.

Для начала использования предоставленного API нужно было выполнить следующие действия:

1. С помощью команды telnet убедились, что с машины, с которой будет осуществляться подключение, есть доступ на нужный адрес и порт поставщика API [7].
2. Установили soapUI версии 5.6.0 или 5.6.1.
3. В конфигурационном файле c:\Program Files\SmartBear\SoapUI-5.1.2\bin\ SoapUI-5.1.2.vmoptions добавили следующие параметры:

   -Djava.net.preferIPv4Stack=true

4. Выполнили следующие настройки в конфигурации ssl подключения в soapUI [7-9] (рисунок 4).



Дата	Выдан	Тип карты	Водитель	АЗС	Тип	Топливо	Лит.	Всего	Всего
---_7826010	(1 запись)								
20.08.2025 21:40		ROSNEFT		AZS10	Обслуживание	ДТ-Лет	300.00	20865.00	20865.00
---_7826010	(1 запись)								
20.08.2025 17:37		ROSNEFT		AZS10	Обслуживание	ДТ-Лет	200.00	13960.00	13960.00
_7824861	(2 записей)								
21.08.2025 22:06		Ликард		ООО "ЛУКОЙЛ-Центрнефтепродукт"	Покупка.	Топливо дизельное ЭКТО	150.00	10417.50	10417.50
20.08.2025 13:46		Ликард		АЗС №50	Покупка.	Топливо дизельное ЭКТО	340.00	23613.00	23613.00
SCANIA_7824861	(1 запись)								
21.08.2025 23:25		Ликард		ООО "ЛУКОЙЛ-Центрнефтепродукт"	Покупка.	Топливо дизельное ЭКТО	450.00	31252.50	31252.50
_7824861	(2 записей)								
21.08.2025 03:57		Ликард		АЗС №50	Покупка.	Топливо дизельное ЭКТО	400.00	27780.00	27780.00
21.08.2025 03:46		Ликард		АЗС №50	Покупка.	Топливо дизельное ЭКТО	350.00	24307.50	24307.50
_7824861	(2 записей)								
21.08.2025 05:15		Ликард		АЗС №694	Покупка.	Топливо дизельное ЭКТО	100.00	7043.00	7043.00
21.08.2025 04:58		Ликард		АЗС №694	Покупка.	Топливо дизельное ЭКТО	350.00	24650.50	24650.50
_7824861	(2 записей)								
21.08.2025 11:11		Ликард		ООО "ЛУКОЙЛ-Центрнефтепродукт"	Покупка.	Топливо дизельное ЕВРО	250.00	17672.50	17672.50
21.08.2025 10:58		Ликард		ООО "ЛУКОЙЛ-Центрнефтепродукт"	Покупка.	Топливо дизельное ЕВРО	400.00	28276.00	28276.00

Рисунок 3. Форма проведения транзакций по топливным картам в системе мониторинга

Figure 3. Form for conducting transactions on fuel cards in the monitoring system

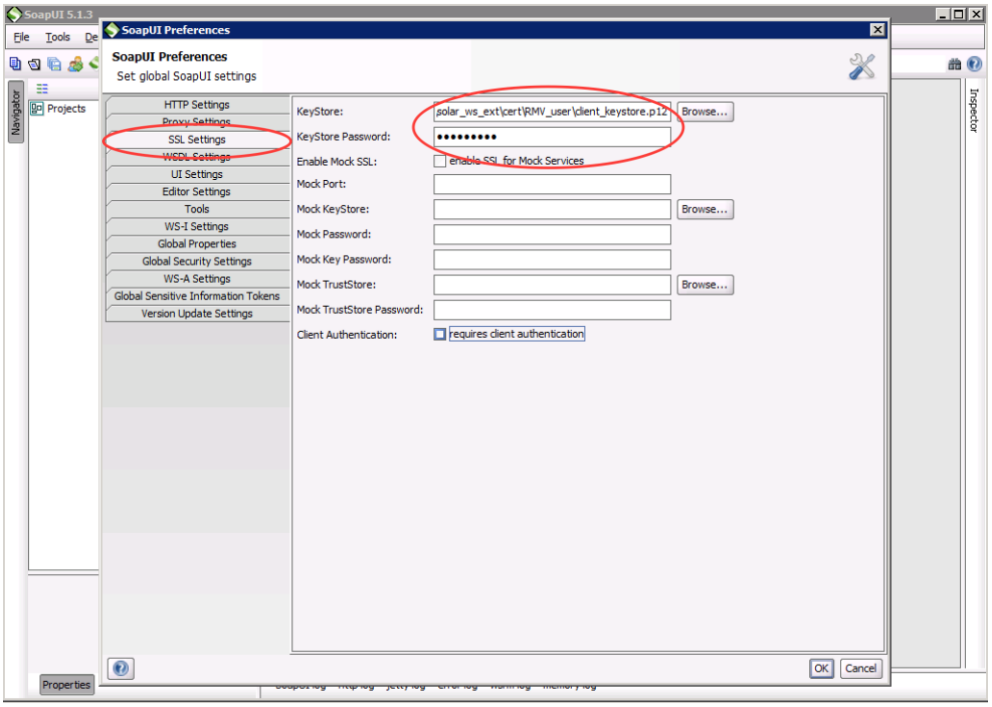


Рисунок 4. Настройка в конфигурации SSL

Figure 4. Setting in SSL configuration

В качестве Keystore указан путь до хранилища клиентского сертификата в формате p12, выданного поставщиком API. В качестве Keystore Password указан пароль от соответствующего хранилища клиентского сертификата, выданного поставщиком API [7 - 9].

1. Создан новый REST проект [7] (рисунок 5).

В качестве URL указан путь до любого из сервисов. Например, https://API_SERVER_IP:443/solar-bridge-ext/ext/json-services/getTransactionsTypes, где API_SERVER_IP – ip – адрес сервера поставщика API, getTransactionsTypes – имя соответствующего сервиса [4, 5, 7].

2. Изменен тип запроса на POST (рисунок 6).

3. Заданы параметры сервиса в соответствии со спецификацией и выполнен сервис (рисунок 7).

4. Сверились с ожидаемыми результатами выполнения сервиса.

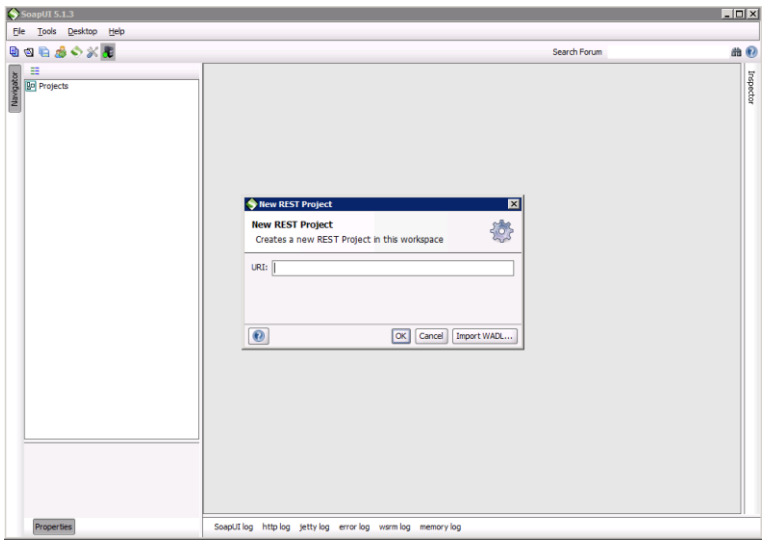


Рисунок 5. REST проект

Figure 5. REST project

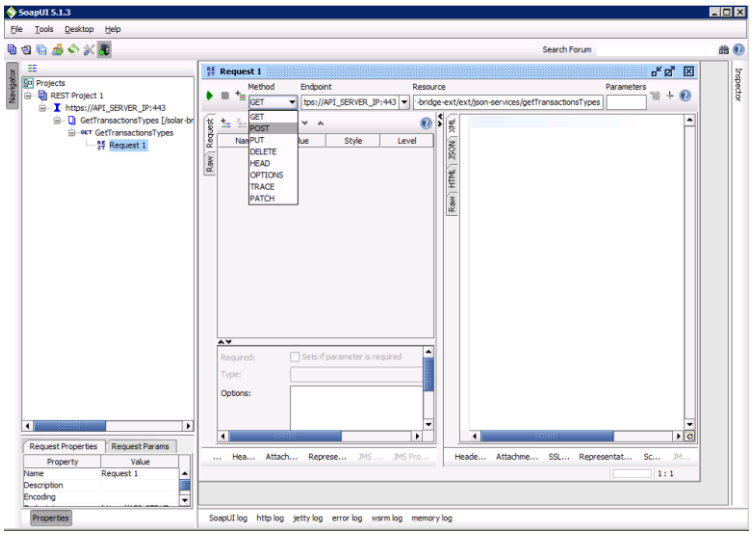


Рисунок 6. Изменение запроса

Figure 6. Changing the query

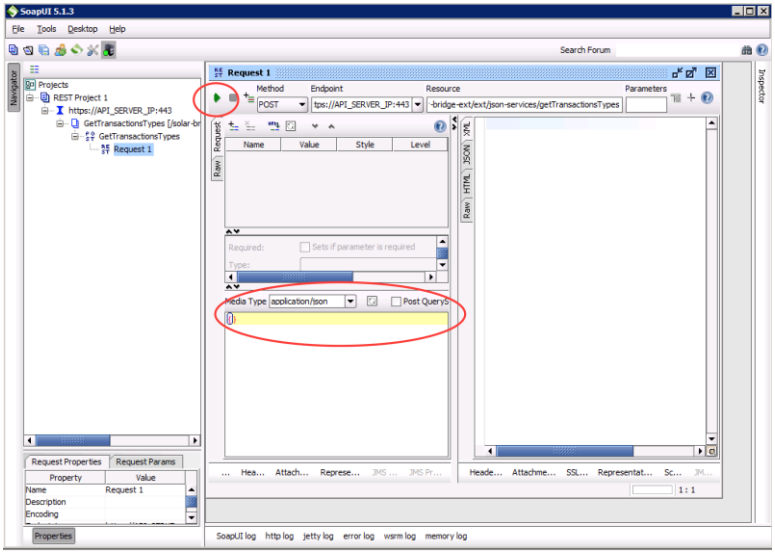


Рисунок 7. Параметры сервиса

Figure 7. Service parameters

Этап 5. Поддержка и обслуживание.

Этап мониторинга работы интеграции, отслеживание ошибок и устранение проблем, обновление системы, в случае изменений в API поставщика топливных карт или системы мониторинга.

Заключение

В данной работе представлена интеграция топливных карт в систему мониторинга. Подробное описание интеграции и получение результатов может быть полезно для других инженеров, работающих над подобными задачами [3, 5]. Дальнейшие исследования будут направлены на автоматизацию процесса.

Литература

1. Гладких, Т. В. Программный инструментарий решения актуальных задач учета и управления / Т. В. Гладких, Л. А. Коробова, М. Н. Ивлиев. – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2022. – 70 с.

2. Сергеев, А. И. Системы промышленной автоматизации: учебное пособие / А. И. Сергеев, А. М. Черноусова, А. С. Русяев, В. В. Тугов. — Оренбург: ОГУ, 2017. — 106 с.

3. Юрченко, А. С. Интеграция конфигурации 1С с мессенджерами / А. С. Юрченко, И. С. Толстова, Л. А. Коробова // Студенческие научные исследования: сборник статей V Международной научно-практической конференции, Пенза: "Наука и Просвещение", 2021. – С. 35-38.

4. Мартынов, Р. В. Интеграция 1С с системой RFID / Р. В. Мартынов, Л. А. Коробова, И. А. Матыцина // Математическое моделирование процессов и систем: Материалы XIII Международной молодежной научно-практической конференции, Стерлитамак, 16–18 ноября 2023 года. – Стерлитамак: Уфимский университет науки и технологий, 2023. – С. 500-512.

5. Хныкин, Д. Е. Методология и результаты применения обратного инжиниринга / Д. Е. Хныкин, Л. А. Коробова // Инженерные технологии. – 2025. – № 1(9). – С. 30-35.

6. Сидоров, А.П., Козлов, В.С. Архитектурные подходы к разработке REST API для микросервисных систем / А.П. Сидоров, В.С. Козлов // Информационные технологии и вычислительные системы. - 2023. - № 4. - С. 67-75.

7. https://www.soapui.org/downloads/soapui/soapui-os-older-versions/

8. Ричардсон, Л., Руби, С. RESTful Web API / Л. Ричардсон, С. Руби; пер. с англ. И.И. Иванов. - М.: ДМК Пресс, 2015. - 416 с.

9. Емельянов, Е.В., Куприянов, А.В. Web-сервисы и интеграция приложений: учебное пособие / Е.В. Емельянов, А.В. Куприянов. — СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. — 148 с.

References

1. Gladkikh, T. V. Software tools for solving current accounting and management problems / T. V. Gladkikh, L. A. Korobova, M. N. Ivliev. - Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies, 2022. - 70 p.

2. Sergeev, A. I. Industrial automation systems: a tutorial / A. I. Sergeev, A. M. Chernousova, A. S. Rusyaev, V. V. Tugov. - Orenburg: OSU, 2017. - 106 p.

3. Yurchenko, A. S. Integration of 1C configuration with instant messengers / A. S. Yurchenko, I. S. Tolstova, L. A. Korobova // Student research: collection of articles from the V International Scientific and Practical Conference, Penza: "Science and Education", 2021. - P. 35-38.

4. Martynov, R. V. Integration of 1C with the RFID system / R. V. Martynov, L. A. Korobova, I. A. Matytsina // Mathematical modeling of processes and systems: Proceedings of the XIII International Youth Scientific and Practical Conference, Sterlitamak, November 16-18, 2023. - Sterlitamak: Ufa University of Science and Technology, 2023. - Pp. 500-512.

5. Khnykin, D. E. Methodology and results of applying reverse engineering / D. E. Khnykin, L. A. Korobova // Engineering technologies. - 2025. - No. 1 (9). - Pp. 30-35.

6. Sidorov, A. P., Kozlov, V. S. Architectural approaches to developing REST API for microservice systems / A.P. Sidorov, V.S. Kozlov // Information technologies and computing systems. - 2023. - No. 4. - P. 67-75.

7. https://www.soapui.org/downloads/soapui/soapui-os-older-versions/

8. Richardson, L., Ruby, S. RESTful Web API / L. Richardson, S. Ruby; trans. from English I.I. Ivanov. - M .: DMK Press, 2015. - 416 p.

9. Emelianov, E.V., Kupriyanov, A.V. Web services and application integration: a tutorial / E.V. Emelianov, A.V. Kupriyanov. - SPb: SPbSU ITMO, 2007. - 148 p.

Сведения об авторах

ФИО	*Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)*
Некрасова Галина Павловна	магистрант, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", магистр кафедры Информационных технологий, моделирования и управления, galinanekrasova629@gmail.com
Корчагин Михаил Владимирович	кандидат технических наук, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", кафедра Информационных технологий, моделирования и управления, korchaginmv@rambler.ru ORCID 0009-0009-0950-9069 Author ID 581191

Authors information

Last name, first name, patronymic	*Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)*
Nekrasova Galina Pavlovna	master's student, Voronezh state university of engineering technologies, master's student of the department of Information technology, modeling and management, galinanekrasova629@gmail.com
Korchagin Mikhail Vladimirovich	PhD, Voronezh State University of Engineering Technologies, department of Information technology, modeling and management, korchaginmv@rambler.ru ORCID 0009-0009-0950-9069 Author ID 581191

статья поступила в редакцию	одобрена после рецензирования	принята к публикации
20.10.2025	05.11.2025	27.11.2025

the article was submitted	approved after reviewing	accepted for publication
20.10.2025	05.11.2025	27.11.2025

Научная статья

УДК 004.8:351

ВНЕДРЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРОЦЕСС ОКАЗАНИЯ ГОСУДАРСТВЕННЫХ УСЛУГ

Андрей Владиславович Прохоренко ✉ [1] Andryey@inbox.ru
Оксана Георгиевна Стукало [1] stukalo_oksana@mail.ru

[1]Воронежский государственный университет инженерных технологий, проспект Революции, д. 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. В последние годы государственные органы России активно внедряют инструменты искусственного интеллекта, расширяя спектр цифровых решений в своей деятельности. Наблюдается устойчивый рост проектов, связанных с роботизацией бизнес-процессов, автоматизированной обработкой документов и обращений, а также использованием чат-ботов. Каждый удачный пример применения технологий усиливает интерес госсектора к интеллектуальным системам. Стремясь повысить оперативность работы с запросами граждан и улучшить качество информирования, органы власти всё чаще обращаются к виртуальным ассистентам. В результате число практических внедрений ежегодно существенно увеличивается, что подтверждает актуальность исследования вопросов применения AI в сфере предоставления государственных услуг.

Ключевые слова: искусственный интеллект, государственные услуги, государственные органы, чат-бот, Госуслуги, цифровой помощник, нейросеть.

Для цитирования: Прохоренко А. В., Стукало О. Г. Внедрение искусственного интеллекта в процесс оказания государственных услуг // Инженерные технологии. 2025. № 4 (12). С. 36-42.

Original article

IMPLEMENTATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE PROVISION OF PUBLIC SERVICES

Andrey V. Prokhorenko ✉ [1] Andryey@inbox.ru
Oksana G. Stukalo [1] stukalo_oksana@mail.ru

[1] Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue, 19, Voronezh, 394036, Russia

Abstract. In recent years, Russian public authorities have been actively adopting artificial intelligence tools and expanding the use of digital solutions in their operations. There is a steady increase in projects involving robotic process automation, automated processing of documents and citizen inquiries, as well as the implementation of chatbots. Each successful case strengthens the public sector's interest in intelligent technologies. Aiming to improve the efficiency of handling requests and enhance the quality of public communication, government institutions increasingly turn to virtual assistants. Consequently, the number of real implementations is growing significantly every year, confirming the relevance of studying the integration of AI into the system of public service delivery.

Keywords: artificial intelligence, public services, government bodies, chatbot, public services portal, digital assistant, neural network.

For citation: Prokhorenko A. V., Stukalo O. G. Implementation of artificial intelligence in the provision of public services. Ingenernye tehnologii = Engineering technologies. 2025; (4 (12)): 36-42. (In Russ.).

Введение

Государственные органы ежегодно утверждают программу цифровой трансформации и отчитываются о её выполнении каждый квартал. К 2030 году правительство планирует получить значимые результаты цифровизации, основываясь на использовании искусственного интеллекта. Для этого запускаются программы субсидий и льготных ставок кредитования для прорывных проектов. Государство становится цифровой платформой для более удобного получения государственных услуг гражданами и организациями. Опросы показывают, что жители города Москвы видят больше преимуществ, чем недостатков в использовании ИИ и считают, что он может ускорить выполнение рутинных задач или заменить человека в опасных работах (рисунок 1) [1].

Эксперты отмечают, что отправной датой активного развития AI-технологий в государственном секторе стало 10 октября 2019 года — день, когда Президентом РФ была утверждена Национальная стратегия развития искусственного интеллекта до 2030 года. Основной задачей этого документа определено формирование повышенного спроса на решения, основанные на технологиях искусственного интеллекта. При этом в Стратегии подчёркивается, что пользователями таких продуктов должны выступать не только граждане и бизнес, но и государственные структуры (рисунок 2) [2].

© 2025. Прохоренко А. В., Стукало О. Г. / Prokhorenko A. V., Stukalo O. G.

Рисунок 1. Результаты опроса жителей о развитии технологий искусственного интеллекта в Москве, 2024 г.

Figure 1. Results of a survey of residents on the development of artificial intelligence technologies in Moscow, 2024

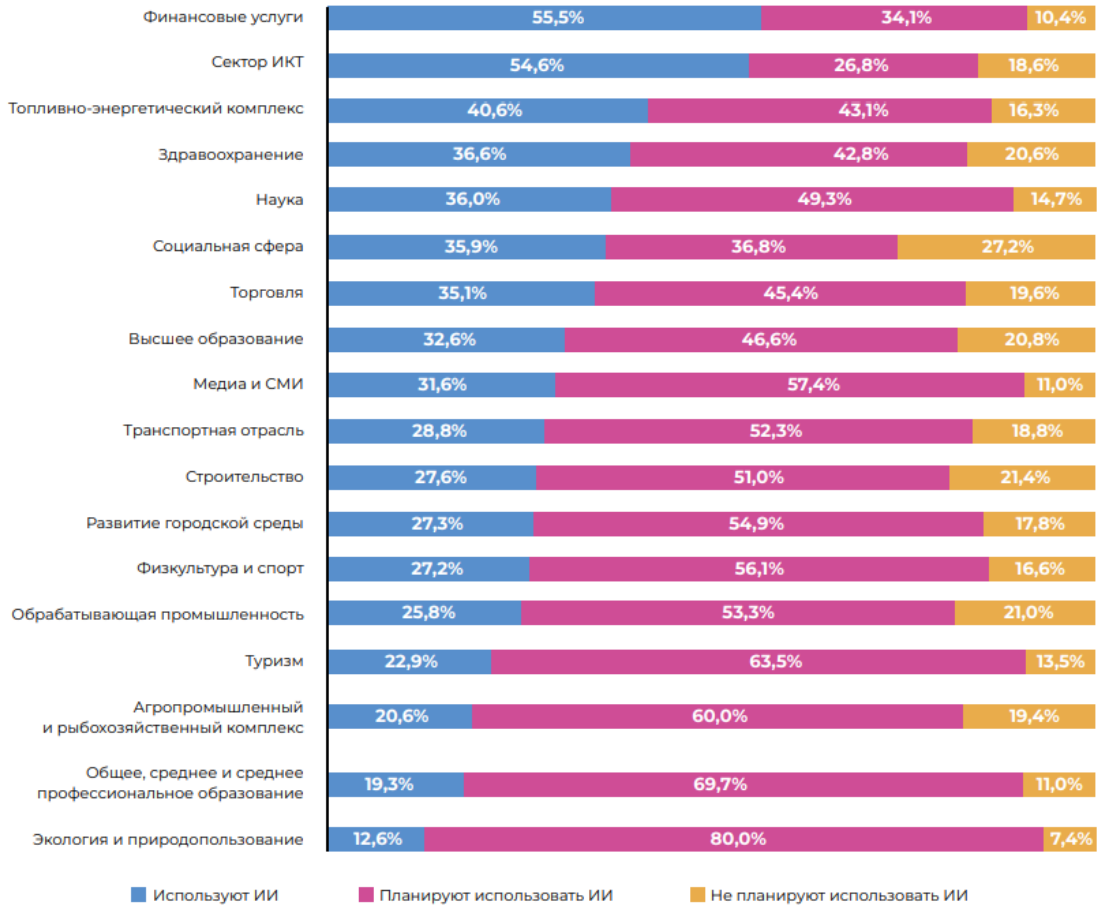


Рисунок 2. Статистика применения искусственного интеллекта организациями в 2023 году в ключевых областях своей деятельности [3]

Figure 2. Statistics on the use of artificial intelligence by organizations in 2023 in key areas of their activities [3]

В 2020 году в России запущен федеральный проект "Искусственный интеллект" для развития рынка ИИ в рамках национального проекта «Цифровая экономика». В 2021 году более 430 разработчиков ИИ-решений и open-source-библиотек получили поддержку и участвовали в программах акселерации [4].

В 2022 году правительство РФ создало Центр развития искусственного интеллекта, который занимается внедрением технологий ИИ в госсектор и экономику. Национальному центру развития ИИ при правительстве поставлена задача отбора решений для бизнеса, науки и государства, а также экспертиза документов и сопровождение внедрения ИИ. В различных министерствах создаются экспертные группы для работы с ИИ, а Департамент финансов Москвы первым в России внедрил автоматизированную систему проверки платежных документов с использованием ИИ, что повысило эффективность работы финансовых структур. по проекту «Цифровое государственное управление» выделено 8 млрд.руб. на создание HR-платформы для госслужащих к 2025 году. В 2025 году особое внимание будет уделено улучшению взаимодействия с гражданами через цифровые каналы, в том числе через чат-ботов и виртуальных помощников на базе ИИ (рисунок 3) [5].

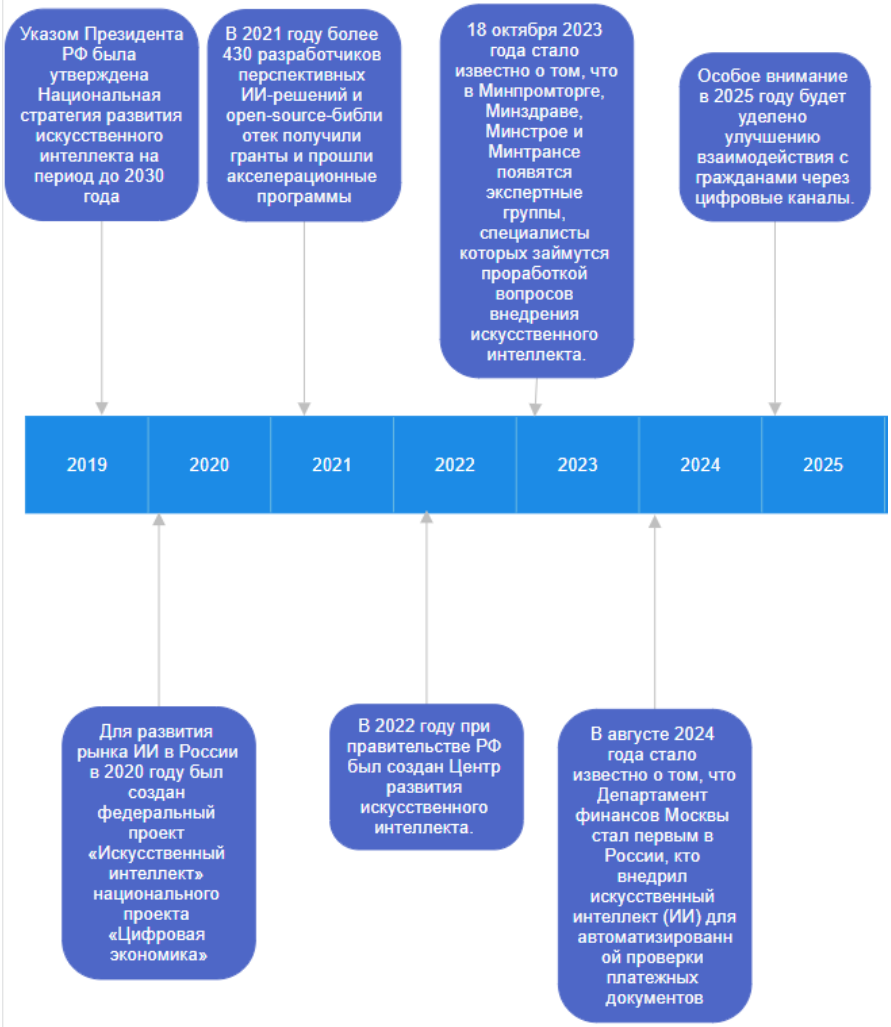


Рисунок 3. Динамика внедрения искусственного интеллекта в государственном секторе

Figure 3. Dynamics of artificial intelligence implementation in the public sector

До недавнего времени проекты по искусственному интеллекту были связаны с тестированием гипотез, результаты которого могли быть негативными или теоретическими. Однако с появлением концепции "цифрового помощника" проекты перешли к практическому внедрению технологий ИИ с измеримыми результатами. Благодаря этому, уже сегодня можно получить работающие решения для автоматизации трудоемких бизнес-процессов и перехода к единой цифровой платформе.

Цифровой помощник – это программа, которая использует ИИ, машинное обучение и обработку естественного языка для выполнения задач пользователя на различных

устройствах, таких как смартфоны, компьютеры и умные колонки.

Голосовой команда, и получать соответствующие ответы или действия. цифровые помощники используют голосовые команды для выполнения задач, анализируют запросы, улучшают понимание пользователя и предоставляют персонализированные ответы. Технологии машинного обучения помогают им «учиться» на опыте взаимодействия с пользователем [6].

Единая служба 122 – пример системы искусственного интеллекта, помогающей заболевшим коронавирусом. Автоматические ответы предоставляются в большинстве случаев, но в экстренных ситуациях система переводит на операторов колл-центра. Это голосовые виртуальные консультанты, работающие в 60 регионах России.

Главной задачей современной государственной деятельности является повышение степени автоматизации обработки документов и данных, используемых в информационных системах ведомств и при проведении проверочных мероприятий. Применение ведомственных систем распознавания, классификации и анализа обращений и документов на основе технологий искусственного интеллекта становится очередным этапом развития этой сферы.

В отличие от традиционных RPA-инструментов, цифровые ассистенты представляют собой более сложные решения, способные интерпретировать содержание документов на уровне смысловых единиц, что недоступно обычным алгоритмам.

Использование цифрового помощника позволяет существенно упростить и ускорить процедуры, например, регистрацию прав на недвижимость, за счёт автоматизации проверок и снижения доли ручной работы. Это сокращает сроки оказания государственных услуг и минимизирует возможные задержки для граждан.

Таблица 1. Сравнительная таблица RPA-решений и цифрового помощника

Table 1. Comparison table of RPA solutions and digital assistant

Параметр / Parameter	RPA	Цифровой помощник / Digital assistant
Функциональность / Functionality	Автоматизация рутинных задач	Решение сложных задач, NLP
Сложность / Complexity	Низкая	Высокая
Требования к данным / Data Requirements	Структурированные данные	Любые типы данных
Возможности обучения / Training Capabilities	Ограниченные	Высокие (AI, ML)
Эффективность / Efficiency	Высокая для простых задач	Высока для сложных задач

В 2024 году на портале «Госуслуги» появился цифровой помощник Макс, который отвечает на вопросы пользователей подобно чатботу ChatGPT. Он помогает пользователям пользоваться сервисом, выбирать нужные услуги, проверять наличие штрафов и записываться на прием к врачу. За время работы Макс обработал 450 млн. запросов. В 2025 году его функционал будет расширен с помощью российской языковой модели, работающей по принципу YandexGPT или GigaChat, что позволит ему общаться с людьми на их родном языке [7]. На рисунке 4 изображена архитектура Цифрового помощника на портале «Госуслуги» [8].

Нейросетевая система формирует пошаговые инструкции в соответствии с индивидуальными запросами пользователя. При подготовке ответа алгоритм опирается на сведения, содержащиеся в описаниях услуг портала, а также стремится учитывать ситуацию пользователя, что делает взаимодействие более приближённым к живому диалогу.

Работа «Макса» строится на базе знаний Госуслуг: поисковый модуль выбирает наиболее релевантные данные, после чего нейросеть формирует итоговый ответ, используя найденные материалы. Искусственный интеллект способен как извлекать отдельные элементы информации, так и объединять несколько разрозненных фрагментов в единое содержание.

В работу нейросети изначально заложены специальные настройки — промпты. Они предписывают системе предоставлять только проверенные, точные сведения, избегать вымышленных данных и сохранять уважительный тон в общении с пользователем [9].

В январе 2025 года более миллиона пользователей протестировали обновленную версию цифрового ассистента "Макс" с российским генеративным искусственным интеллектом. Почти 70% из них остались пользоваться новым режимом (рисунок 5).

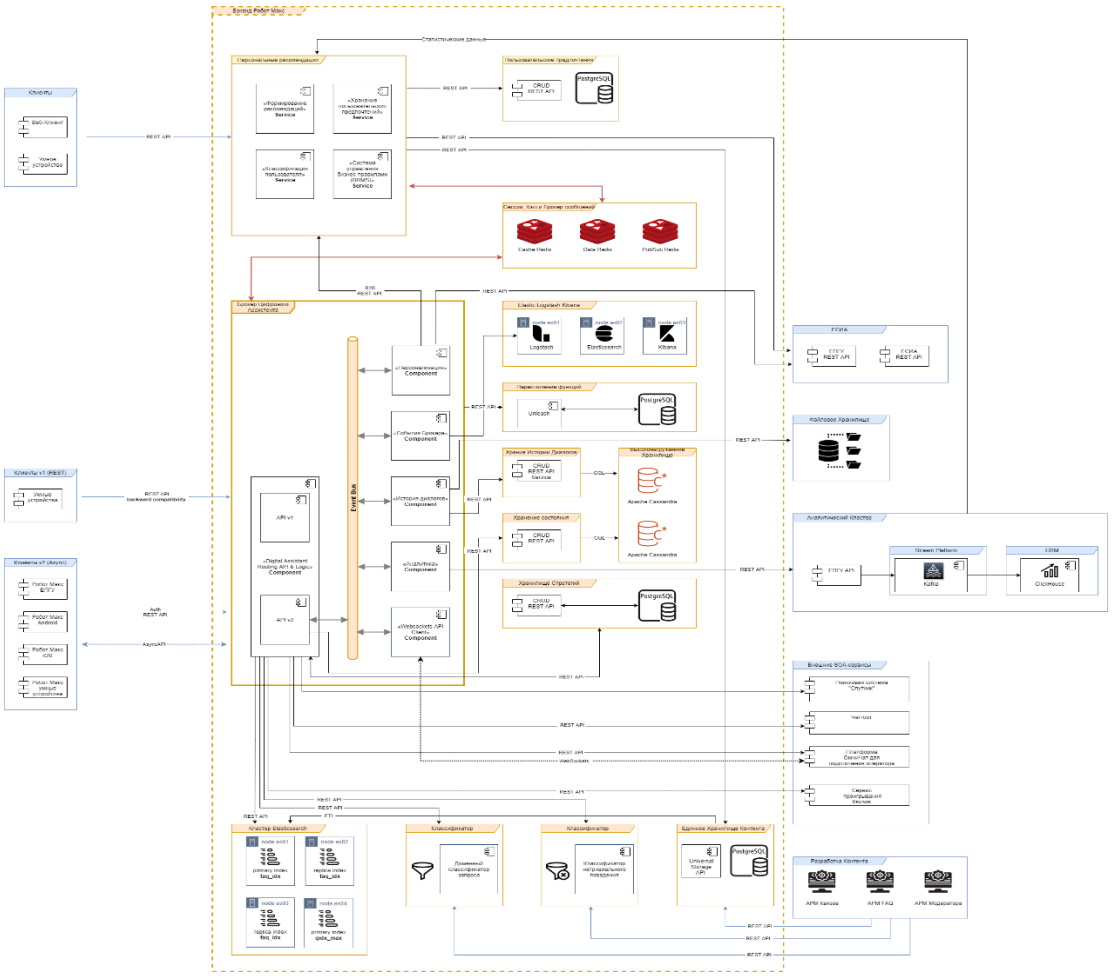


Рисунок 4. Архитектура Цифрового помощника на портале «Госуслуги»

Figure 4. Architecture of the Digital Assistant on the State Services portal

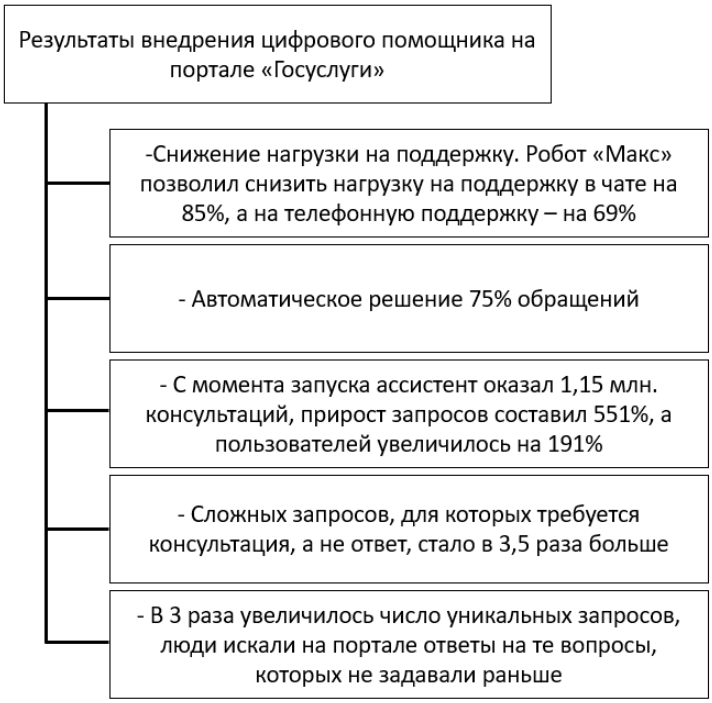


Рисунок 5. Результаты внедрения цифрового помощника на портале «Госуслуги»

Figure 5. Results of the implementation of a digital assistant on the State Services portal

Росреестр запустил проект "Умный кадастр", используя нейросети для обнаружения неиспользуемой недвижимости. Результаты показали возможность возвращения 2,8 Га земельных участков в оборот и увеличение поступлений в бюджет на 211 миллионов рублей за год. Количество выявленных объектов увеличилось в 2,5 раза [10].

Заключение

Внедрение искусственного интеллекта в государственные услуги способствует развитию инноваций и повышению конкурентоспособности страны на мировой арене. Использование AI в управлении помогает государствам быстрее адаптироваться к изменениям, внедрять передовые технологии и ускорять экономический рост.

Литература

1. Развитие Технологий ИИ в Москве. URL: https://moscowanalytics.ru/index/research/226 (дата обращения 11.02.2025)

2. Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_335184/ (дата обращения: 11.02.2025).

3. Индекс интеллектуальной зрелости отраслей экономики, секторов социальной сферы и системы государственного управления Российской Федерации, НЦРИИ при Правительстве РФ. URL: https://ai.gov.ru/knowledgebase/?section=2 (дата обращения: 19.02.2025).

4. Внедрение искусственного интеллекта: как государство поддерживает отрасль.URL: https://www.rbc.ru/technology_and_media/21/11/2022/6373b9d99a7947fa230d041d (дата обращения: 19.02.2025).

5. Искусственный интеллект в государственном управлении. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Искусственный_интеллект_в_государственном_управлении#2022:_.D0.98.D0.98_.D0.BF.D1.80.D0.B8.D0.B7.D0.B2.D0.B0.D0.BD_.D0.BD.D0.B0_.D0.B3.D0.BE.D1.81.D1.81.D0.BB.D1.83.D0.B6.D0.B1.D1.83 (дата обращения: 19.02.2025).

6. Что такое цифровой помощник. URL: https://umnico.com/ru/blog/digital-assistant-bot/ (дата обращения: 11.02.2025).

7. Искусственный интеллект будет консультировать на «Госуслугах». URL: https://siriusmag.ru/articles/2122-iskusstvennij-intellekt-budet-konsultirovat-na-gosuslugah/ (дата обращения: 11.02.2025).

8. Привет, я робот Макс! Как устроен цифровой ассистент Госуслуг. URL: https://habr.com/ru/companies/rtlabs/articles/587034/ (дата обращения: 19.02.2025).

9. Цифровой помощник Госуслуг обрел искусственный интеллект. URL: https://adindex.ru/news/digital/2024/12/12/328541.phtml (дата обращения: 11.02.2025).

10. Как внедрить ИИ в работу госведомства: 5 шагов навстречу цифровым помощникам. URL: https://beorg.ru/blog/kak-vnedrit-ii-v-gosupravlenie-5-shagov-chast-1/ (дата обращения: 11.02.2025).

References

1. AI Technology Development in Moscow. URL: https://moscowanalytics.ru/index/research/226 (accessed: 11.02.2025)

2. National Strategy for the Development of Artificial Intelligence for the Period until 2030. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_335184/ (accessed: 11.02.2025)

3. Intellectual Maturity Index of Economic Sectors, Social Spheres and the Public Administration System of the Russian Federation, National Center for the Development of AI under the Government of the Russian Federation. URL: https://ai.gov.ru/knowledgebase/?section=2 (accessed: 19.02.2025)

4. AI Implementation: How the State Supports the Industry. URL: https://www.rbc.ru/technology_and_media/21/11/2022/6373b9d99a7947fa230d041d (accessed: 19.02.2025)

5. Artificial Intelligence in Public Administration. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Article:Artificial_intelligence_in_public_administration (accessed: 19.02.2025)

6. What is a Digital Assistant. URL: https://umnico.com/ru/blog/digital-assistant-bot/ (accessed: 11.02.2025)

7. Artificial Intelligence to Provide Consultations on the 'Gosuslugi' Portal. URL: https://siriusmag.ru/articles/2122-iskusstvennij-intellekt-budet-konsultirovat-na-gosuslugah/ (accessed: 11.02.2025)

8. Hello, I'm Robot Max! How the Gosuslugi Digital Assistant Works. URL: https://habr.com/ru/companies/rtlabs/articles/587034/ (accessed: 19.02.2025)
9. Gosuslugi Digital Assistant Gains Artificial Intelligence. URL: https://adindex.ru/news/digital/2024/12/12/328541.phtml (accessed: 11.02.2025)
10. How to Implement AI in a Government Agency: 5 Steps Towards Digital Assistants. URL: https://beorg.ru/blog/kak-vnedrit-ii-v-gosupravlenie-5-shagov-chast-1/ (accessed: 11.02.2025)

Сведения об авторах

ФИО	*Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)*
Прохоренко Андрей Владиславович	магистрант, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", магистр кафедры Корпоративных информационных систем и программирования, Andryey@inbox.ru
Стукало Оксана Георгиевна	Доктор экономических наук, доцент, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", заведующий кафедрой Корпоративных информационных систем и программирования, stukalo_oksana@mail.ru SPIN-код 1234-3473 Scopus Autor ID 57207193229

Authors information

Last name, first name, patronymic	*Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)*
Prokhorenko Andrey Vladislavovich	master's student, Voronezh State University of Engineering Technologies, master's student of the department of Corporate information systems and programming, Andryey@inbox.ru
Stukalo Oksana Georgievna	doctor of economic sciences, associate professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, head of the department of Corporate information systems and programming, stukalo_oksana@mail.ru SPIN-code 1234-3473 Scopus Autor ID 57207193229

статья поступила в редакцию	одобрена после рецензирования	принята к публикации
22.10.2025	06.11.2025	28.11.2025

the article was submitted	approved after reviewing	accepted for publication
22.10.2025	06.11.2025	28.11.2025

Научная статья

УДК 004.8

АНАЛИЗ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ КОРПОРАТИВНОГО ОБЛАЧНОГО ХРАНИЛИЩА

Андрей Алексеевич Дрыгалев [1] drygalevaa@yandex.ru
Людмила Анатольевна Коробова ✉ [1] Lyudmila_korobova@mail.ru
Ирина Сергеевна Толстова [1] irin2102ka@mail.ru

[1]Воронежский государственный университет инженерных технологий, проспект Революции, д. 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы импортозамещения корпоративных IT-решений. Проведен обзор самохостируемых платформ с открытым исходным кодом (Nextcloud, Seafile), российских облачных сервисов (Яндекс 360, Mail.Ru Облако для бизнеса), а также международные решения Microsoft 365. Ключевыми критериями для сравнения выступают безопасность, соответствие требованиям ФЗ-152, масштабируемость, функционал для совместной работы, простота администрирования и стоимость владения. Особое внимание уделяется применимости решений в высокорегулируемых и наукоемких отраслях, таких как пищевая промышленность, химическая отрасль и биотехнологии. Для этих сфер критически важны безопасное хранение конфиденциальных данных (рецептуры, технологические карты, результаты исследований, патенты, данные клинических испытаний и др.), строгий контроль доступа и неукоснительное соблюдение законодательства. Самохостируемые решения (Nextcloud, Seafile) предоставляют полный контроль над инфраструктурой, позволяют хранить данные на территории РФ и обеспечивают высокую производительность при работе с большими файлами, например, с архивами технической документации или видео с производственных линий. Российские облачные сервисы предлагают быстрый старт и соответствие ФЗ-152, что может быть удобно для небольших производств или сетей общественного питания, не требующих сложного функционала редактирования. Выбор оптимального решения зависит от конкретных задач компании, требований к безопасности и бюджета.

Ключевые слова: ИТ-инфраструктура, импортозамещение, облачное хранилище, цифровая среда, пищевая промышленность, химическая промышленность, информационная безопасность

Для цитирования: Дрыгалев А. А., Коробова Л. А., Толстова И. С. Анализ решений для импортозамещения корпоративного облачного хранилища // Инженерные технологии. 2025. № 4 (12). С. 43-50.

Original article

ANALYSIS OF SOLUTIONS FOR IMPORT SUBSTITUTION CORPORATE CLOUD STORAGE

Andrey A. Drygalev [1] drygalevaa@yandex.ru
Lyudmila A. Korobova ✉ [1] Lyudmila_korobova@mail.ru
Irina S. Tolstova [1] irin2102ka@mail.ru

[1] Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue, 19, Voronezh, 394036, Russia

Abstract. The article considers the issues of import substitution of corporate IT solutions. An overview of self-hosted open source platforms (Nextcloud, Seafile), Russian cloud services (Yandex 360, Mail.Ru Cloud for Business), and international Microsoft 365 solutions is provided. The key criteria for comparison are security, compliance with the requirements of Federal Law 152, scalability, functionality for collaboration, ease of administration, and cost of ownership. Particular attention is paid to the applicability of solutions in highly regulated and knowledge-intensive industries, such as the food industry, chemical industry, and biotechnology. For these areas, secure storage of confidential data (recipes, process maps, research results, patents, clinical trial data, etc.), strict access control, and strict compliance with the law are critical. Self-hosted solutions (Nextcloud, Seafile) provide full control over the infrastructure, allow storing data in the Russian Federation and ensure high performance when working with large files, such as archives of technical documentation or videos from production lines. Russian cloud services offer a quick start and compliance with Federal Law 152, which can be convenient for small production facilities or catering networks that do not require complex editing functionality. The choice of the optimal solution depends on the specific tasks of the company, security requirements and budget.

Keywords: IT infrastructure, import substitution, cloud storage, digital environment, food industry, chemical industry, information security

For citation: Drygalev A. A., Korobova L. A., Tolstova I. S. Analysis of solutions for import substitution corporate cloud storage. Ingenernye tehnologii = Engineering technologies. 2025; (4 (12)): 43-50. (In Russ.).

© 2025. Дрыгалев А. А. и др. / Drygalev A. A. et al.

Введение

В условиях стремительной цифровизации и усиления требований к информационной безопасности все большее число российских компаний сталкивается с необходимостью импортозамещения корпоративных IT-решений. Одним из ключевых направлений является замена зарубежных облачных платформ для хранения и совместной работы, таких как Microsoft 365 и Google Workspace, на альтернативы, соответствующие требованиям локализации данных и обеспечения технологического суверенитета [1]. Актуальность этого процесса обусловлена не только геополитическими изменениями, но и растущими требованиями законодательства, в первую очередь Федерального закона №152-ФЗ о персональных данных [2]. В данной статье рассматриваются наиболее востребованные решения для организации файлового обмена и совместной работы: отечественные облачные сервисы Яндекс 360 и Mail.Ru Облако для бизнеса, а также самохостируемые платформы с открытым исходным кодом — Nextcloud и Seafile. Проводится их сравнительный анализ по ключевым критериям: безопасность, масштабируемость, функционал совместной работы, простота администрирования и стоимость владения, что позволяет определить оптимальный выбор для компаний различного профиля и размера [3, 4].

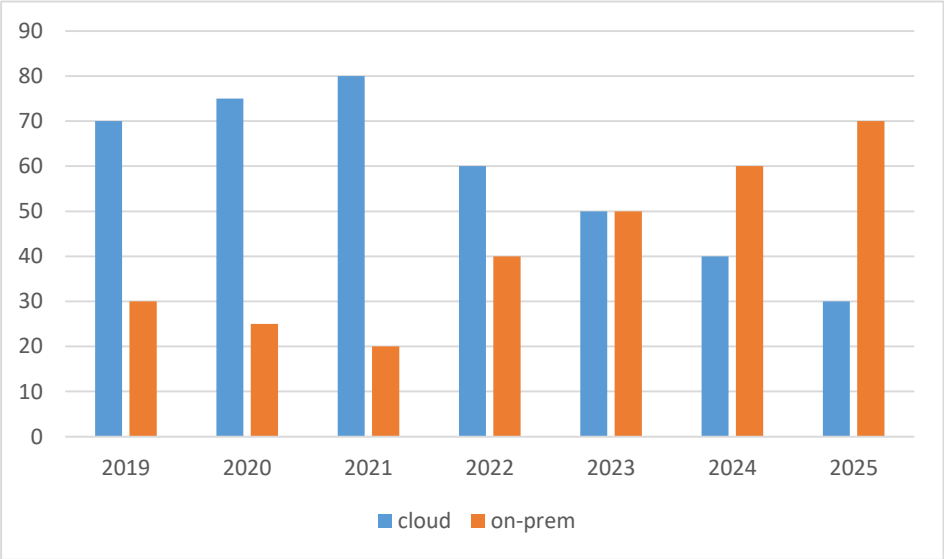


Рисунок 1. Соотношение использования облачных и on-prem решений за 6 лет

Figure 1. Ratio of cloud and on-prem solutions usage over 6 years

Анализ и сравнение современных платформ для корпоративного хранения и совместной работы

Для российских компаний выбор решения для хранения, синхронизации файлов и совместной работы — критически важная задача [4, 5]. В условиях импортозамещения и роста требований к информационной безопасности особое значение приобретают безопасность, соответствие законодательству, масштабируемость и экономическая эффективность [3, 5].

Ключевые критерии выбора.

1. Безопасность и соответствие регуляторам — данные должны храниться на территории РФ (ФЗ-152) [2], обеспечиваться шифрование и аудит доступа.

2. Масштабируемость и производительность — решение должно поддерживать рост числа пользователей и работать с большими файлами.

3. Функционал совместной работы — онлайн-редактирование документов, чаты, видеоконференции, управление задачами.

4. Простота администрирования — интеграция с AD/LDAP, централизованное управление пользователями и правами.

5. Стоимость владения — включает затраты на внедрение, лицензии, серверы и поддержку.

6. Качество технической поддержки — наличие русскоязычной поддержки и SLA.

Решения вроде Nextcloud [6, 7] и Seafile (self-hosted) [8 - 10] обеспечивают полный контроль над данными, высокую безопасность и соответствие ФЗ-152, но требуют технического сопровождения. Nextcloud выделяется расширяемостью и поддержкой онлайн-офисов (OnlyOffice, Collabora), а Seafile — высокой

производительностью при работе с большими файлами.

Отечественные облачные платформы — Яндекс 360 и Mail.Ru Облако для бизнеса — просты в использовании, хранят данные в России и подходят для компаний, ценящих простоту и локализацию. Однако их функционал ограничен: нет полноценного онлайн-редактирования, слабая интеграция и скромные возможности совместной работы.

Комплексная оценка по ключевым критериям позволяет выбрать оптимальное решение: от self-hosted систем для максимального контроля до облачных сервисов для быстрого старта. Выбор зависит от специфики бизнеса, объема данных, требований к безопасности и бюджета.

NextCloud

Nextcloud — это самохостируемая платформа с открытым исходным кодом для хранения, синхронизации и совместной работы, аналогичная Google Drive или Dropbox, но с возможностью развертывания на собственном сервере. Это делает её привлекательной альтернативой как коммерческим облачным сервисам, так и ownCloud, особенно в условиях импортозамещения и повышенных требований к безопасности данных [6].

Платформа предоставляет широкий функционал: хранение и синхронизацию файлов, контроль версий, доступ через веб-интерфейс и мобильные приложения, а также встроенные инструменты для управления календарями, задачами, контактами и заметками. Поддержка технологий WebDAV, LDAP, OAuth2, OpenID Connect и двухфакторной аутентификации обеспечивает высокий уровень безопасности и интеграции с корпоративной инфраструктурой. Данные шифруются как при передаче, так и при хранении, включая опцию end-to-end шифрования.

Особое преимущество Nextcloud — расширяемость. Через встроенный магазин приложений можно добавить функции видеочатов (Nextcloud Talk), онлайн-редактирования документов (интеграция с OnlyOffice и Collabora Online), управления проектами, закладками, новостями и другими сервисами. Также поддерживается интеграция с внешними облачными хранилищами, такими как Google Drive, Dropbox и Amazon S3.

Nextcloud позволяет гибко управлять правами доступа на уровне пользователей и групп, настраивать общий доступ через ссылки с ограничениями по сроку и правам (просмотр, редактирование, скачивание). Это делает её удобной как для физических лиц, желающих контролировать свои данные, так и для организаций, которым важно обеспечить безопасный и централизованный обмен информацией, включая работу в режиме реального времени [7].

Благодаря бесплатной версии и возможности полного контроля над инфраструктурой, Nextcloud — это экономичное и гибкое решение для компаний, стремящихся к цифровой независимости и соответствию требованиям, таким как ФЗ-152 о персональных данных.

Seafile

Seafile — это кроссплатформенное программное обеспечение с открытым исходным кодом для организации файлового обмена и синхронизации, предназначенное для развертывания на собственном сервере (on-premise). Платформа позволяет централизованно хранить файлы, синхронизировать их между устройствами пользователей и получать доступ через веб-интерфейс, мобильные приложения и десктопные клиенты. По функционалу Seafile схож с Dropbox и Google Drive, однако ключевое отличие заключается в том, что это решение для создания частного облака, где вся инфраструктура и данные находятся под полным контролем организации. Это особенно важно для компаний, которым запрещено использовать публичные облачные сервисы из-за требований к конфиденциальности и локализации данных [8].

Seafile отличается высокой производительностью, особенно при работе с большими файлами — видео, архивами, CAD-чертежами и медицинскими изображениями. Платформа поддерживает версионность файлов, что позволяет отслеживать изменения и восстанавливать предыдущие версии. Управление доступом осуществляется на уровне пользователей и групп с возможностью настройки детальных прав и ведением журналов действий. Для интеграции с корпоративной инфраструктурой доступна поддержка LDAP, Active Directory и SSO. Данные шифруются на уровне сервера, обеспечивая дополнительный уровень безопасности. Также реализованы API для интеграции с другими системами, веб-интерфейс и мобильные приложения для iOS и Android [9].

Seafile лучше подойдет в организациях, где на первом месте стоит высокая скорость передачи больших файлов, необходим строгий контроль доступа и данные размещаются внутри компании. Поэтому это решение подойдет как для IT-компаний, так и для других учреждений, где работают с большими объемами информации.

К преимуществам продукта можно отнести высокую скорость синхронизации файлов, тонкую настройку прав доступа и масшта-

бируемость. Однако Seafile уступает другим продуктам по другим аспектам: нет возможности онлайн редактирования файлов, имеются сложности с развертыванием ПО. Однако несмотря на все вышеперечисленное, Seafile – это надежное решение для компаний, для которых важен контроль и безопасность [10].

Microsoft 365

Microsoft 365 — это облачная платформа от компании Microsoft, объединяющая офисные приложения, электронную почту, облачное хранилище, средства видеосвязи и инструменты для совместной работы. Изначально запущенная в 2011 году как Office 365, платформа эволюционировала в полноценную экосистему, включающую Word, Excel, PowerPoint, Outlook, OneDrive, SharePoint и Teams. Решение распространяется по подписке и подходит для компаний любого масштаба — от малого бизнеса до крупных предприятий, а также для образовательных и некоммерческих организаций [12].

Ключевые особенности Microsoft 365 — облачное развертывание без необходимости размещения собственного сервера, полная интеграция с Windows и Active Directory, а также централизованное управление доступом через Azure Active Directory. Платформа поддерживает двухфакторную аутентификацию (MFA), единый вход (SSO), шифрование данных и комплексную защиту с помощью Microsoft Defender for Office 365 и DLP (Data Loss Prevention). Эти особенности делают Microsoft 365 одним из главных продуктов для организаций, для которых важна безопасность и удобность работы.

Microsoft 365 предлагает все для удобной совместной работы: онлайн редактирование файлов, звонки и конференции в Teams, синхронизацию файлов в OneDrive, единовременное управление как с ПК, так и со сматфона.

Одним из главных преимуществ является простота внедрения, интуитивный интерфейс, высокая степень надежности сетевой инфраструктуры. Однако у платформы есть и значимые недостатки: высокая стоимость лицензий для крупных компаний, ограниченные возможности для контроля над данными.

Microsoft 365 особенно эффективен в организациях, уже использующих продукты Microsoft, где важна быстрая настройка и полная совместимость с существующей IT-инфраструктурой. Вместе с тем, из-за хранения данных за пределами России, решение может не соответствовать требованиям ФЗ-152 о локализации персональных данных, что делает его менее подходящим для госструктур и компаний с высокими требованиями к суверенитету данных [13].

Яндекс 360 для бизнеса

Яндекс 360 для бизнеса — это российская облачная платформа, объединяющая корпоративную почту, облачное хранилище, календарь, чат и базовые инструменты для работы с документами. Запущенная в 2021 году, она позиционируется как альтернатива Microsoft 365 и Google Workspace, ориентированная в первую очередь на российские компании, которым важно соответствие требованиям законодательства, в частности ФЗ-152 о локализации персональных данных. Все данные хранятся на серверах в России, что делает решение привлекательным для организаций, стремящихся к цифровому суверенитету и снижению зависимости от иностранных сервисов [14].

Платформа включает ключевые сервисы: корпоративную почту с поддержкой домена, облачное хранилище (до 15 ГБ на пользователя), календарь, мессенджер для общения внутри компании и инструменты для просмотра и совместного доступа к документам. Интерфейс прост и интуитивно понятен, особенно для пользователей, уже знакомых с сервисами Яндекса. Поддержка LDAP позволяет интегрировать Яндекс 360 в существующую IT-инфраструктуру, а коммерческая поддержка на русском языке обеспечивает оперативную помощь при возникновении вопросов.

Яндекс 360 подходит для малого и среднего бизнеса, компаний, уже использующих Яндекс.Почту, и организаций, которым важна простота внедрения и эксплуатации. Решение удобно для быстрого старта, не требует сложной настройки и предоставляет готовый набор инструментов для повседневной работы [15].

К основным преимуществам относятся хранение данных на территории РФ, простота использования и доступная техническая поддержка. Однако у платформы есть и ограничения: отсутствует полноценный онлайн-офис для редактирования документов — пользователи могут просматривать и комментировать файлы, но полноценное редактирование недоступно. Функционал совместной работы и управления проектами значительно скромнее, чем у мировых аналогов, а возможности настройки и интеграции ограничены. Это делает Яндекс 360 менее подходящим для крупных компаний с высокими требованиями к совместной работе и автоматизации бизнес-процессов. Тем не менее, для многих российских организаций он остаётся удобным и законодательно безопасным решением.

Mail.Ru Облако для бизнеса

Mail.Ru Облако для бизнеса — это облачное решение от компании Mail.Ru Group,

предназначенное для хранения, синхронизации и совместного доступа к файлам в корпоративной среде. Платформа является бизнес-версией популярного сервиса «Облако» и ориентирована в первую очередь на российские компании, которым важно простое и доступное решение для организации удалённой и совместной работы [16].

Решение предоставляет базовые функции: облачное хранилище с возможностью синхронизации между устройствами, встроенный чат и управление контактами, а также поддержку мобильных приложений для iOS и Android. Важным преимуществом является хранение данных на серверах в России, что позволяет компаниям соответствовать требованиям Федерального закона №152-ФЗ о персональных данных. Поддержка LDAP обеспечивает интеграцию с существующей IT-инфраструктурой, упрощая управление пользователями.

Mail.Ru Облако для бизнеса подходит для организаций, которым требуется простой инструмент для обмена файлами, особенно если они уже используют почтовые сервисы Mail.Ru. Также платформа привлекательна для компаний с ограниченным бюджетом, поскольку предлагает доступные тарифы и не требует сложного администрирования [16].

К основным достоинствам относятся простота использования, интуитивно понятный интерфейс, русскоязычная техническая поддержка и локализация данных. Однако функционал платформы ограничен по сравнению с более развитыми аналогами: отсутствует полноценный онлайн-офис для редактирования документов (доступен только просмотр), действуют ограничения на размер загружаемых файлов (до 5 ГБ), а возможности совместной работы минимальны.

Таким образом, Mail.Ru Облако для бизнеса — это удобное и бюджетное решение для небольших и средних компаний, которым важны простота внедрения, работа с российскими сервисами и хранение данных на территории РФ, но не требуется сложная инфраструктура для совместного редактирования и управления проектами.

В таблице представлено сравнение вышеперечисленных решений по основным критериям, которые важны для бизнеса.

Таблица 1. Сравнение различных решений

Table 1. Comparison of different solutions

ПО - решение/Software - solution / Критерии оценки/ Evaluation criteria	Nextcloud/ Nextcloud	Microsoft 365/ Microsoft 365	Яндекс 360/ Yandex 360	Mail.Ru Облако/ Mail.Ru Cloud	Seafile/ Seafile
Самохостинг (on-premise)	Да	Нет	Нет	Нет	Да
Поддержка LDAP/AD	Да	Да	Да	Ограниченная	Да
Шифрование данных	Да (включая end-to-end)	Да	Только на сервере	Только на сервере	Да (серверное)
Офисные приложения (редактирование документов)	Только с OnlyOffice/Collabora	Word, Excel и др.	Только просмотр	Только просмотр	Нет (можно интегрировать)
Мобильные приложения	Да	Да	Да	Да	Да
Работа с большими файлами	Да	Да	До 15 ГБ	До 5 ГБ	Да
Коммерческая поддержка	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
Цена (на 500 пользователей)	Бесплатная версия; Enterprise ~$1000+/год	~$7000–10000/год	~$2500–4000/год	~$2000–3500/год	~$3000–5000/год
Простота администрирования	3/5	5/5	4/5	5/5	4/5

Выбор решения для хранения файлов, их синхронизации и совместной работы — очень важное и ответственное решение, особенно для малых и средних компаний, штат которых составляет 50–500 человек.

Критерии выбора корпоративного решения

1. Способ размещения системы: облачный или on-premise.

Облачные сервисы (такие как Microsoft 365, Google Workspace, Яндекс 360) быстро

подключаются, не требуют своих серверов и всегда автоматически обновляются. Но с ними теряется полный контроль над данными, а если данные находятся за границей, это может нарушать закон о персональных данных (ФЗ-152). On-prem решения (вроде Nextcloud, Seafile) позволяют держать данные в России, полностью управлять системой и соблюдать законы. Но за ними придется следить самим, в том числе проводить обновления, создавать резервные копии.

Для организаций с высокими требованиями к безопасности предпочтительны локальные или гибридные решения.

2. Соответствие законодательству.

Хранение персональных данных на территории РФ — обязательное условие для многих компаний. Только on-premise и некоторые российские облачные сервисы (Яндекс 360, Mail.Ru Облако) гарантируют соблюдение ФЗ-152. Также важно наличие шифрования: от серверного до end-to-end (в Nextcloud). При работе с международными клиентами необходимо учитывать соответствие GDPR.

3. Управление пользователями и доступом.

Для эффективного контроля доступа критична интеграция с Active Directory/LDAP, поддержка ролевой модели (RBAC) и гибкие настройки прав. Возможность ограничивать доступ на уровне отдельных файлов (просмотр, редактирование, скачивание) повышает безопасность и управляемость.

4. Безопасность данных.

Система должна обеспечивать двухфакторную аутентификацию (2FA), защиту от брутфорса, аудит действий пользователей и автоматическое резервное копирование. Для чувствительных отраслей (финансы, госсектор, медицина) рекомендуются платформы с расширенной безопасностью — Nextcloud Enterprise, Seafile Pro.

5. Производительность и масштабируемость.

Seafile и Nextcloud оптимизированы для работы с большими файлами (видео, CAD), что важно для IT, инженеров и дизайнеров. Microsoft 365 и Google Workspace легко масштабируются на десятки тысяч пользователей, тогда как on-premise решения требуют грамотного подбора серверов, особенно при использовании онлайн-офисов (OnlyOffice, Collabora).

6. Совместная работа и офисные приложения.

Для активной коллаборации важны онлайн-редактирование документов в реальном времени, видеоконференции и чаты. Microsoft 365 и Google Workspace предлагают наиболее зрелые экосистемы. Nextcloud может приблизиться к ним при интеграции с OnlyOffice или Collabora. В российских облачных сервисах (Яндекс 360, Mail.Ru) функции редактирования ограничены — доступен только просмотр.

7. Пользовательский опыт и обучение.

Простой интерфейс, мобильные приложения с офлайн-доступом и качественная техническая поддержка ускоряют внедрение. Облачные платформы проще в освоении, тогда как self-hosted решения требуют обучения IT-персонала.

Вывод: Оптимальный выбор зависит от приоритетов компании. Для соответствия ФЗ-152 и полного контроля — Nextcloud или Seafile. Для готового, масштабируемого решения с развитой совместной работой — Microsoft 365 или Google Workspace. Для бюджетного и простого старта — Яндекс 360 или Mail.Ru Облако. Комплексная оценка по ключевым критериям позволяет выбрать решение, эффективно работающее в долгосрочной перспективе.

Заключение

Выбор платформы для хранения, синхронизации файлов и совместной работы — стратегическое решение, напрямую влияющее на эффективность, безопасность и соответствие законодательству. Как показал анализ, ни одно из рассмотренных решений не является универсальным. Microsoft 365 и Google Workspace предлагают наиболее зрелую экосистему для совместной работы, но не подходят компаниям, обязанным хранить данные на территории России. В этом контексте альтернативой становятся как российские облачные сервисы — Яндекс 360 и Mail.Ru Облако, простые в использовании и соответствующие ФЗ-152, так и самохостируемые решения — Nextcloud и Seafile, обеспечивающие максимальный контроль и гибкость. Nextcloud выделяется богатым функционалом и поддержкой онлайн-офисов, а Seafile — высокой производительностью при работе с большими файлами. Окончательный выбор зависит от приоритетов компании: для быстрого старта и простоты подойдут облачные сервисы, для максимальной безопасности и независимости — self-hosted решения. Комплексная оценка по всем критериям позволяет внедрить систему, эффективно работающую в долгосрочной перспективе.

Литература

1. Стратегия развития информационного общества РФ (2017–2030).

2. Федеральный закон № 152-ФЗ «О персональных данных».

3. Майка, А. Н. Исследование возможностей и преимуществ разработки программного обеспечения для интеллектуального анализа процессов в Российской Федерации / А. Н. Майка, Л. А. Коробова // Инженерные технологии. – 2024. – № 1(5). – С. 34-40. – EDN JRTKZS.

4. Черняева, С. Н. Анализ избыточности соотношений в задачах коллективного выбора / С. Н. Черняева, Л. А. Коробова // Инженерные технологии. – 2023. – № 4(4). – С. 29-35. – EDN NOHPYZ.

5. Токарев, Ю. Ю. Одна из особенностей перехода на отечественное программное обеспечение / Ю. Ю. Токарев, Л. А. Коробова // XXV студенческая научно-исследовательская конференция: Материалы Всероссийской научно-исследовательской конференции с международным участием, Воронеж. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр "Научная книга", 2024. – С. 66-72. – EDN REIKOT.

6. Постановления Правительства РФ о приоритете отечественного ПО (Nextcloud) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://nextcloud.com , свободный. – Загл. с экрана. (07.06.25)

7. Документация Nextcloud [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://github.com/nextcloud/documentation, свободный. – Загл. с экрана. (07.06.25)

8. Seafile [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.seafile.com, свободный. – Загл. с экрана. (07.06.25)

9. Документация Seafile [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://manual.seafile.com, свободный. – Загл. с экрана. (07.06.25)

10. GitHub репозиторий Seafile [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://github.com/haiwen/seafile, свободный. – Загл. с экрана. (07.06.25)

11. TechRadar: Обзор Seafile [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.techradar.com/reviews/seafile-review, свободный. – Загл. с экрана. (07.06.25)

12. Microsoft 365 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.microsoft.com/microsoft-365, свободный. – Загл. с экрана. (07.06.25)

13. Документация Microsoft Learn [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://learn.microsoft.com/en-us/microsoft-365, свободный. – Загл. с экрана. (07.06.25)

14. Яндекс 360 для бизнеса [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://connect.yandex.ru, свободный. – Загл. с экрана. (07.06.25)

15. Пресс-релиз о запуске Яндекс 360 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://company.yandex/blog/149897, свободный. – Загл. с экрана. (07.06.25)

16. Mail.Ru Облако для бизнеса [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://corp.mail.ru, свободный. – Загл. с экрана. (07.06.25)

References

1. Strategy for the Development of the Information Society of the Russian Federation (2017–2030).

2. Federal Law No. 152-FZ "On Personal Data".

3. Maika, A. N. Study of the Possibilities and Advantages of Developing Software for Intelligent Process Analysis in the Russian Federation / A. N. Maika, L. A. Korobova // Engineering Technologies. - 2024. - No. 1 (5). - P. 34-40. - EDN JRTKZS.

4. Chernyaeva, S. N. Analysis of Redundancy of Ratios in Collective Choice Problems / S. N. Chernyaeva, L. A. Korobova // Engineering Technologies. - 2023. - No. 4 (4). - P. 29-35. - EDN NOHPYZ.

5. Tokarev, Yu. Yu. One of the Features of the Transition to Domestic Software / Yu. Yu. Tokarev, L. A. Korobova // XXV Student Research Conference: Proceedings of the All-Russian Research Conference with International Participation, Voronezh. - Voronezh: Publishing and Printing Center "Scientific Book", 2024. - Pp. 66-72. - EDN REIKOT.

6. Resolutions of the Government of the Russian Federation on the priority of domestic software (Nextcloud) [Electronic resource]. - Access mode: https://nextcloud.com , free. - Title from the screen. (06/07/25)

7. Nextcloud Documentation [Electronic resource]. - Access mode: https://github.com/nextcloud/documentation, free. - Title from the screen. (06/07/25)

8. Seafile [Electronic resource]. – Access mode: https://www.seafile.com, free. – Title from the screen. (06/07/25)

9. Seafile Documentation [Electronic resource]. – Access mode: https://manual.seafile.com, free. – Title from the screen. (06/07/25)
10. Seafile GitHub Repository [Electronic resource]. – Access mode: https://github.com/haiwen/seafile, free. – Title from the screen. (06/07/25)
11. TechRadar: Seafile Review [Electronic resource]. – Access mode: https://www.techradar.com/reviews/seafile-review, free. – Title from the screen. (06/07/25)
12. Microsoft 365 [Electronic resource]. – Access mode: https://www.microsoft.com/microsoft-365, free. – Title from the screen. (06/07/25)
13. Microsoft Learn Documentation [Electronic resource]. – Access mode: https://learn.microsoft.com/en-us/microsoft-365, free. – Title from the screen. (06/07/25)
14. Yandex 360 for Business [Electronic resource]. – Access mode: https://connect.yandex.ru, free. – Title from the screen. (06/07/25)
15. Press release on the launch of Yandex 360 [Electronic resource]. – Access mode: https://company.yandex/blog/149897, free. – Title from the screen. (06/07/25)
16. Mail.Ru Cloud for Business [Electronic resource]. – Access mode: https://corp.mail.ru, free. – Title from the screen. (06/07/25)

Сведения об авторах

ФИО	*Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)*
Дрыгалев Андрей Алексеевич	магистрант, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", магистр кафедры Информационных технологий, моделирования и управления, drygalevaa@yandex.ru
Коробова Людмила Анатольевна	кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", доцент кафедры Информационных технологий, моделирования и управления, Lyudmila_korobova@mail.ru SPIN-код 1098-6488 ORCID 0000-0003-1349-732X
Толстова Ирина Сергеевна	ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", старший преподаватель кафедры Информационных технологий, моделирования и управления, Irin2102ka@mail.ru SPIN-код 8116-7338 ORCID 0000-0002-2804-3067 Researcher ID A-5974-2014 Scopus Autor ID 57194008059

Authors information

Last name, first name, patronymic	*Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)*
Drygalev Andrey Alekseevich	master's student, Voronezh state university of engineering technologies, master's student of the department of Information technology, modeling and management, drygalevaa@yandex.ru
Korobova Lyudmila Anatolyevna	PhD, associate professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, associate professor of the department of Information technology, modeling and management, Lyudmila_korobova@mail.ru SPIN-code 1098-6488 ORCID 0000-0003-1349-732X
Tolstova Irina Sergeevna	Voronezh State University of Engineering Technologies, Senior Lecturer, Department of Information Technology, Modeling and Control, Irin2102ka@mail.ru SPIN-code 8116-7338 ORCID 0000-0002-2804-3067 Researcher ID A-5974-2014 Scopus Autor ID 57194008059

статья поступила в редакцию	одобрена после рецензирования	принята к публикации
31.10.2025	12.11.2025	01.12.2025

the article was submitted	approved after reviewing	accepted for publication
31.10.2025	12.11.2025	01.12.2025

Original article

УДК 628.316

NICKEL CONTAMINATION CONTROL IN AQUEOUS SYSTEMS THROUGH SUSTAINABLE REMOVAL TECHNIQUES

Güldane Aslı Turp [1]
Sinan Mehmet Turp ✉ [2] smturp@beu.edu.tr
Saim Özdemir [1]
Rasim Alosmanov [3]

[1]Sakarya University, Sakarya, Turkey
[2]Bitlis Eren University, Bitlis, Turkey
[3]Baku State University, Baku, Azerbaijan

Abstract. Nickel contamination in aqueous systems poses serious environmental and health risks due to its persistence and bioaccumulation potential. This study investigates the use of biochar, a sustainable and low-cost adsorbent, for the removal of Ni(II) ions from water under varying operational parameters. Batch adsorption experiments were conducted to evaluate the effects of contact time (10–120 min), initial concentration (1–5 mg/L), and biochar dosage (0.5–5 g) on removal efficiency. Results demonstrated consistently high Ni(II) removal, ranging from 88% to 99.9%, with optimum performance achieved at 1 g biochar, 30–60 minutes of contact time, and an initial concentration of 3–5 mg/L. Increasing the dosage beyond 1 g did not significantly enhance efficiency, suggesting surface site saturation and possible particle agglomeration. The findings highlight biochar as an environmentally friendly and economically viable alternative for nickel removal, supporting sustainable water treatment strategies and circular resource management.

Keywords: Nickel removal, biochar, adsorption, aqueous systems, sustainable techniques, heavy metal pollution.

For citation: Turp G. A., Turp S. M., Özdemir S., Alosmanov R. Nickel contamination control in aqueous systems through sustainable removal techniques. Ingenernye tehnologii = Engineering technologies. 2025; (4 (12)): 51-60. (In Russ.).

Научная статья

КОНТРОЛЬ СОДЕРЖАНИЯ НИКЕЛЯ В ВОДНЫХ СИСТЕМАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ УСТОЙЧИВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОЧИСТКИ

Гюльдане Аслы Турп [1]
Синан Мехмет Турп ✉ [2] smturp@beu.edu.tr
Саим Оздемир [1]
Расим Алосманов [3]

[1]Университет Сакарья, Сакарья, Турция
[2]Университет Битлис Эрен, Битлис, Турция
[3]Бакинский государственный университет, Баку, Азербайджан

Аннотация. Загрязнение водных систем никелем представляет серьёзную угрозу для окружающей среды и здоровья человека из-за его стойкости и способности к биоаккумуляции. В данном исследовании изучается использование биоугля, экологичного и недорогого адсорбента, для удаления ионов Ni(II) из воды при различных рабочих параметрах. Были проведены эксперименты по периодической адсорбции для оценки влияния времени контакта (10–120 мин), начальной концентрации (1–5 мг/л) и дозировки биоугля (0,5–5 г) на эффективность удаления. Результаты продемонстрировали стабильно высокую степень удаления Ni(II) – от 88% до 99,9%, при этом оптимальная эффективность достигалась при использовании 1 г биоугля, времени контакта 30–60 минут и начальной концентрации 3–5 мг/л. Увеличение дозировки свыше 1 г не приводило к значительному повышению эффективности, что свидетельствует о насыщении поверхности и возможной агломерации частиц. Результаты показывают, что биоуголь является экологически чистой и экономически выгодной альтернативой для удаления никеля, поддерживающей стратегии устойчивой очистки воды и циклического управления ресурсами.

Ключевые слова: удаление никеля, биоуголь, адсорбция, водные системы, устойчивые методы, загрязнение тяжелыми металлами.

Для цитирования: Турп Г. А., Турп С. М., Оздемир С., Алосманов Р. Контроль содержания никеля в водных системах с применением устойчивых технологий очистки // Инженерные технологии. 2025. № 4 (12). С. 51-60.

© 2025. Турп Г. А. и др. / Turp G. A. et al.

1. Introduction

The nickel contamination challenge involves the pervasive presence of nickel (Ni) in various environmental compartments, particularly in water systems, where it leads to pollution and a range of negative health and environmental consequences. Nickel-containing materials are widely used in many industrial sectors; hence, nickel effluents can be discharged into the environment during investigation, production, processing, and usage. If released, nickel can accumulate in the environment, resulting into the toxic effects on living organisms. Such effects include the stimulation of malignant transformation of the normal cells, social neurodegeneration, inflammation, allergies, adverse effect on fetal development. Nickel-related toxicity can produce malignant tumors, organ damage, lung fibrosis, nasal cancer, and systemic toxicity. Therefore, the removal of nickel from wastewater is essential [9]. Conventional techniques such as chemical precipitation, ion-exchange, membrane filtration, and adsorption are widely applied for nickel removal. Nevertheless, all these methods generate massive amounts of sludge, causing the secondary environmental pollution or high disposal costs. High energy consumption, poor efficiency in low initial concentration, and solution pH sensitive are also the limitations. Bioremoval of nickel pollutants using microorganisms showing enhanced properties such as high resistance to Ni ions, capability of reduction to a less harmful state, and easy recovery is more feasible compared to conventional methods [5]. Therefore, there is a need to develop sustainable techniques for nickel removal to mitigate the environmental risks while balancing economic.

Ni(II) is a toxic metal; its long-term exposure causes serious effects on human health [7]. The environmental and health-related effects of nickel and nickel-containing materials polluting soil, water, air and food are widespread. Cow milk, kangaroo meat, mustard seeds, and other plants and animals were reported in Australia and other countries to be highly contaminated by nickel. Nickel from such sources is recognised as a potential health issue [2]. Nickel is one of the serious environmental pollutants and there are many processes for its removal [9]. Remediation technologies must be developed to remove nickel ions from polluted sources to prevent health issues associated with nickel contamination.

Nickel is an essential element, but at elevated concentrations, it poses a health risk to humans and is classified by the U.S. Environmental Protection Agency (EPA) as a priority pollutant, along with cadmium, chromium, lead, mercury, and silver. Nickel is toxic to aquatic life and can accumulate in the food chain. Anthropogenic discharges of nickel-containing wastewaters arise from mining, electroplating, and other industrial activities. Nickel removal methods include electrochemical techniques, chemical precipitation, ion exchange, membrane filtration, adsorption, bioremediation, and biosorption, but many of these processes generate secondary wastes, require prohibitive capital and running costs, suffer from low selectivity, depend on external electric power, or remain poorly understood. Effective nickel removal, especially from mining wastewaters, continues to be a significant challenge [9].

Sustainable removal technologies remove the nickel contaminant from the effluent while minimizing risks to human health, the environment, and future generations, and systems can be designed for the substantial removal of the 0.1–0.4 $g \cdot L^{-1}$ nickel concentrations typically found in mining wastewaters. A variety of characteristics — or metrics — can contribute to the sustainability value of a technology, including cost, energy requirement, auxiliary materials needs, byproduct generation, robustness, and public acceptance. Regulation also represents an important sustainability consideration, and technologies that meet regulatory limits are typically more desired. Systems that are capable of substantially lowering nickel concentrations while simultaneously satisfying these sustainability metrics rank among the most sustainable options available [5].

Nickel is a widely used metal, but its production and use pose health hazards and environmental pollution. Nickel plating, essential for engineering and decorative purposes, uses a Watts nickel solution with nickel sulfate. After plating, components are rinsed, generating nickel-containing wastewater. Treatment technologies like ion exchange, electro-winning, and reverse osmosis are often costly, highlighting the need for affordable solutions. To comply with the Environmental Protection Act, industries must effectively treat nickel effluents before discharge to protect the environment.

Several materials have been tried as adsorbents for the recovery of nickel from plating wastewater. Thermally treated clay materials and activated carbon from various sources have been tried for this purpose. A new adsorbent, barley straw, is reported in this investigation for the biosorption of nickel. The objective of this work is to study the possibility of nickel removal from synthetic nickel plating wastewaters by agricultural waste, barley straw. Experiments of nickel removal were carried out using different parameters such

as pH, contact time, sorbent dose and concentration of nickel in solution.

Barley straw, a by-product obtained from the cultivation of barley, is abundantly available in many parts of the world. Since barley straw is an inexpensive and abundantly available lignocellulosic biomass, it was used as an alternative biosorbent for the removal of nickel from aqueous solutions. It has been found to have a good potential as an effective biosorbent for the removal of nickel ions from both synthetic and industrial effluents. Rice husk, sugarcane pith, sawdust, coconut coir, corn cobs, wheat straw, tea leaves and spent tea leaves have been observed as suitable biosorbents for the removal of nickel from aqueous system.

Nickel is among the heavy metals of concern because of its high toxicity for living organisms and its particular relevance in the field of environmental protection [3]. As a consequence of its risk for public health and the environment, various methods of removing nickel ions from effluents have been tested: adsorption (using both inorganic and organic adsorbents), reverse osmosis, electrodialysis, membrane filtration, ion exchange, precipitation, bioremediation or biosorption, and many others. Among these techniques, precipitation (co-precipitation or adsorption–precipitation) is an attractive process for the removal of dissolved nickel ions from aqueous solutions due to its simplicity and low cost of operation. The mechanism mainly involved is the co-precipitation of nickel metal ions with insoluble precipitate [1]. The description of a dissolved contaminant in a column packed with reactive material can be achieved by applying the advection-dispersion equation. The sink in the transport equation is the quantity of dissolved contaminant removed from the aqueous phase and adsorbed on the solid particles. Therefore, it is important to separate the quantities of contaminant removed by adsorption and precipitation because the amount removed by the first mechanism can be incorporated in the solute-transport equation to describe the retardation factor governing the transport of reactive contaminants. Consequently, models that do so can also be incorporated in solute-transport codes, such as COMSOL Multiphysics, as alternatives to the widely used Langmuir or Freundlich isotherms.

2. Materials and Methods

Meeting the demand for cost-effective nickel removal from wastewater requires the use of inexpensive, abundant materials as sorbents and innovative removal techniques. Suitable low-cost natural and modified adsorbents include orange peel, palm bark, sawdust, rice husk, water hyacinth, and various clay composites. These adsorbents demonstrate effective nickel adsorption and low residual concentrations in treated water, suitable for large-scale applications. Bio-based materials like agricultural wastes and keratin also show promising kinetic and adsorption properties for efficient nickel removal. The sustainability of these materials is confirmed by their abundance and renewability, aligning with environmental goals. Additives such as zeolite-biochar enhance nickel removal due to their favorable properties. These composites focus on sustainable nickel removal, balancing economic and environmental costs as supported by comprehensive life-cycle assessments. Emerging nanomaterials like fungus-modified halloysite clay and nanosilica are being explored for large-scale implementation. Based on their adsorption capacity and sustainable availability, natural zeolite-biochar composites rank highly among alternatives for nickel removal, with zero-cost sorbents being essential for sustainable large-scale solutions [6, 9].

2.1. Low-Cost Natural and Modified Adsorbents

Nickel is classified as a dangerous environmental pollutant. Its presence in wastewater is pervasive, especially from electroplating and mining activities, yet state-of-the-art remediation techniques remain prohibitively expensive. Development of low-cost options is therefore a priority. Mineral–organic hybrid adsorbents combining a bacterial biofilm (Shewanella xiamenensis) and zeolite have been developed. Analysis by neutron activation, scanning electron microscopy (SEM), and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) confirm their composition. Mathematical model-fitting demonstrates that biosorption follows pseudo-second-order kinetics and the Langmuir isotherm, with a maximum capacity of 10.9 mg Ni(II) /g. Thermodynamic analysis indicates spontaneity and endothermality, as reflected in negative Gibbs free energy and positive enthalpy changes. Bench-scale tests with effluent containing 125 mg Ni(II)/L indicate that 72 % removal is achieved by straightforward 1:12 dilution at constant pH and dosage [7, 9].

Nickel is a hazardous environmental pollutant arising from mining, electroplating, and nickel production, leading to increased concentrations in mineral waters. Nickel effluents hinder wastewater treatment and pose risks to health and the environment. Treatment technologies are costly and complex. A mineral–organic hybrid adsorbent, comprising a Shewanella xiamenensis biofilm and zeolite, was tested for its ability to remove nickel ions. Characterization techniques such as neutron activation, SEM, and FTIR were used. Mathematical models described the data, indicating the

spontaneous and endothermic nature of biosorption. The study also examined the effects of pH and biosorbent dosage, finding that 125 mg/L of nickel could be reduced by 72% after a 12-fold dilution under consistent conditions, highlighting the hybrid biosorbent's efficacy for nickel removal from low-concentration industrial effluents.

Adsorbent (Biochar). A type of lignocellulosic biochar was utilized as the sorbent material in this study. The biochar was firstly oven-dried to ensure it was free of moisture, followed by a gentle grinding process to achieve a finer consistency. After grinding, the biochar was carefully sieved to obtain a uniform particle size of less than 1 mm, ensuring consistency in its application. Before employing the biochar for adsorption purposes, it was thoroughly rinsed with deionized water to eliminate any remaining fines and soluble impurities that could interfere with its performance. Finally, the biochar was dried at a controlled temperature of 105 °C for a duration of 12 hours to ensure optimal conditions for its subsequent use.

Chemicals Nickel stock solution (1000 mg L^{-1} as Ni^{2+}) was prepared from analytical-grade $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ using deionized water (18.2 MΩ cm). Working solutions were freshly diluted. pH was adjusted with 0.1–1.0 M HCl/NaOH.

Experimental design (batch mode)

All tests were conducted in capped Erlenmeyer flasks on an orbital shaker.

Initial Ni(II) concentration (C_0): 1, 3, and 5 mg L^{-1}.

Biochar dosage (m): 0.5, 1, and 5 g (per batch).

Contact time (t): 10, 30, 60, and 120 min.

Agitation: 120 rpm (isothermal room conditions, 25 ± 2 °C).

pH: adjusted at the start (recorded initial pH); no buffer was used to avoid complexation.

Volume (V): fixed for all runs; solid–liquid ratio kept consistent across tests.

Once the designated contact time had elapsed, the suspensions were swiftly separated using syringe filtration with a 0.45 μm filter or through high-speed centrifugation techniques; the resulting clear supernatant was then utilized for subsequent analytical procedures.

2.2. Analytical Determination

Dissolved Ni(II) concentrations were accurately quantified by means of ICP-OES, which is a widely used analytical technique. Instruments were rigorously calibrated on a daily basis utilizing meticulously prepared matrix-matched standards; furthermore, procedural blanks were thoroughly analyzed every 10 samples to effectively check for any potential contamination or drift in the readings. This meticulous approach ensures the precision and reliability of the results obtained from the analysis.

2.3. Calculations

Removal efficiency of Ni(II) ions increased rapidly within the first 30–60 minutes for all initial concentrations (1, 3, and 5 mg/L), followed by a plateau phase indicating adsorption equilibrium. The initial sharp rise is attributed to the abundant availability of active sites on biochar surfaces, whereas the stabilization after 60 minutes suggests saturation of the adsorption sites and diffusion limitation within the biochar pores (figure 1, figure 2).

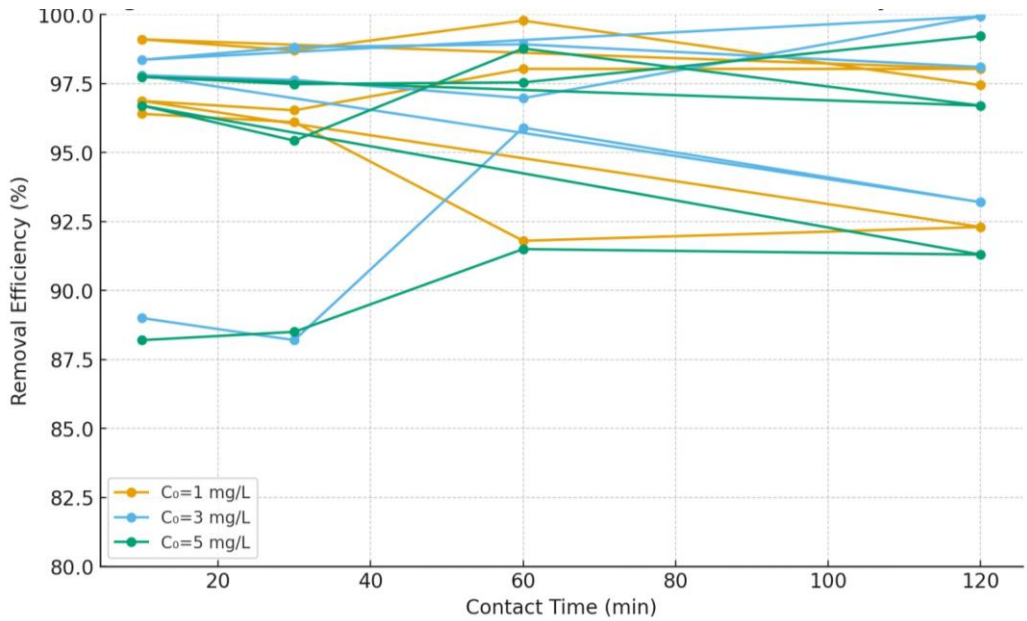


Figure 1. Effect of Contact Time on Ni(II) Removal Efficiency (Biochar)

Рисунок 1. Влияние времени контакта на эффективность удаления Ni(II) (биоуголь)

Similar results were obtained in previous studies using Bitlis pumice. According to kinetic and equilibrium studies, the adsorption of Ni(II) ions onto Bitlis pumice achieved 99% removal at pH 7 within a contact time of 120 min, following the Langmuir isotherm and pseudo-second-order kinetic model (R^2 = 0.99) [8].

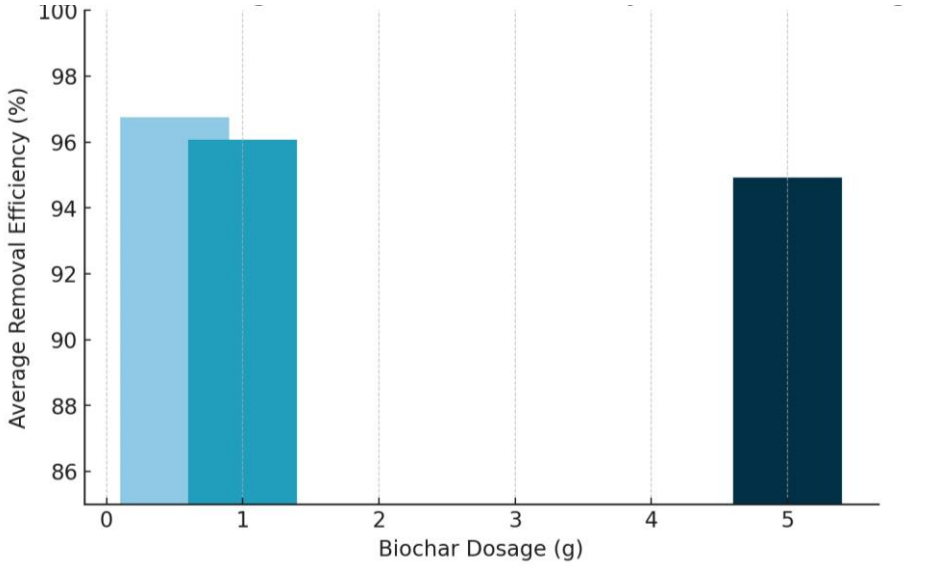


Figure 2. Ni(II)Removal efficiency vs. biochar dosage for each C_0 (t = 60 min)

Рисунок 2. Эффективность удаления Ni(II) в зависимости от дозировки биоугля для каждого C_0 (t = 60 мин)

Heatmap representation of Ni(II) removal efficiency as a function of contact time and initial concentration. The results confirm that biochar maintains consistently high removal efficiency (>94%) across all conditions, with peak performance observed at 3 mg/L initial concentration and 60-120 minutes contact time. This robust adsorption performance highlights the potential of biochar for sustainable nickel remediation in aqueous systems (figure 3).

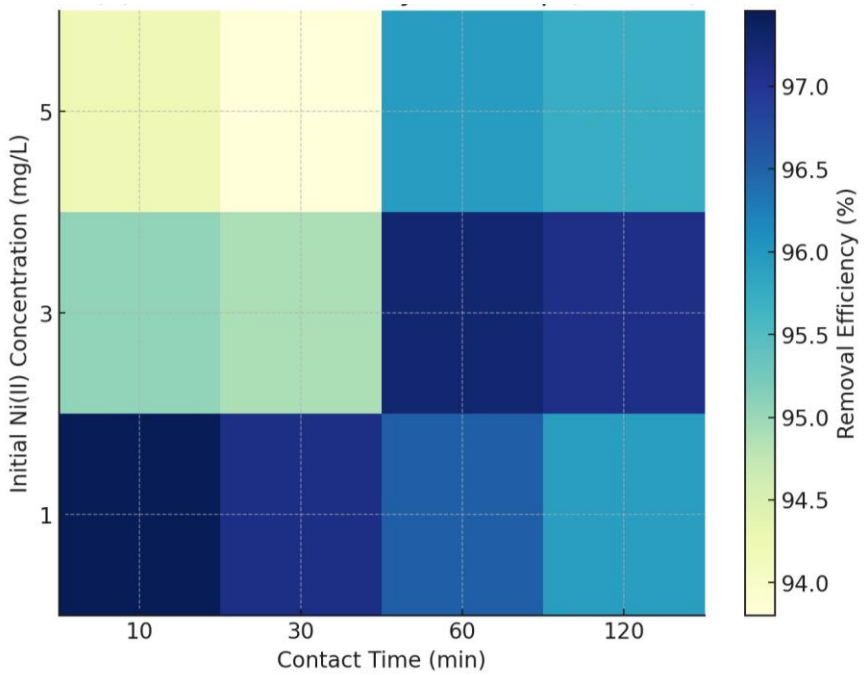


Figure 3. Ni(II) Removal efficiency heat map (biochar)

Рисунок 3. Тепловая карта эффективности удаления Ni(II) (биоуголь)

The choice of parameter values does not significantly affect the selectivity of a material for nickel. A comparison of processes associated with different levels of added value shows a lower investment cost for the precipitation of nickel rather than valorization. Precipitation is also less complex compared to the other processes.

Mathematical modeling of the sorption of nickel on materials recovered from wetland areas or samples from lakes and fish-farming ponds, including the estimation of corresponding isotherm equations, is under study. Scaling studies are being conducted on the precipitation of nickel. The selection of promising materials for precipitation and sorption is being pursued, together with the development of associated parameters. Sorption on benthic and pelagic matrices is also under investigation, including the building of relevant models.

3. Results and Discussion

3.1. Overall Removal Performance

Biochar consistently exhibited remarkable and impressive Ni(II) removal efficiency under all tested conditions, confirming its exceptionally strong adsorption potential. The removal efficiencies ranged significantly from 88% to an impressive 99.9%, depending on the varied factors such as contact time, initial concentration, and adsorbent dosage used in the experimental setup. The consistently high removal rates obtained in these analyses demonstrate that biochar can efficiently capture Ni(II) ions even at relatively low concentrations present in solutions, which is essential for practical and effective wastewater treatment applications in various industrial settings.

3.2. Effect of Contact Time

The contact time had a significant and critical influence on the removal of Ni(II) ions, as demonstrated in Figure 4. During the initial 10 minutes of the adsorption process, a rapid and substantial adsorption phenomenon occurred, with efficiencies impressively reaching levels between 90% and 97%. This indicates that the surface-active sites of the biochar were readily available and highly conducive for Ni(II) binding. As the process progressed between the 30 and 60-minute marks, the adsorption gradually approached a state of equilibrium, during which the maximum removal efficiencies soared to between 98% and 99.9%. Following the 120-minute time point, the removal efficiency exhibited a tendency to remain nearly constant, suggesting that a stable equilibrium had indeed been reached and the adsorption process had effectively stabilized. The initial fast phase of adsorption correlates closely with surface adsorption mechanisms, while the slower approach toward equilibrium can primarily be attributed to the intraparticle diffusion of nickel ions into the pores of the biochar material. This complex interaction highlights the crucial dynamics involved in the adsorption process and the role of contact time in optimizing the removal of nickel ions.

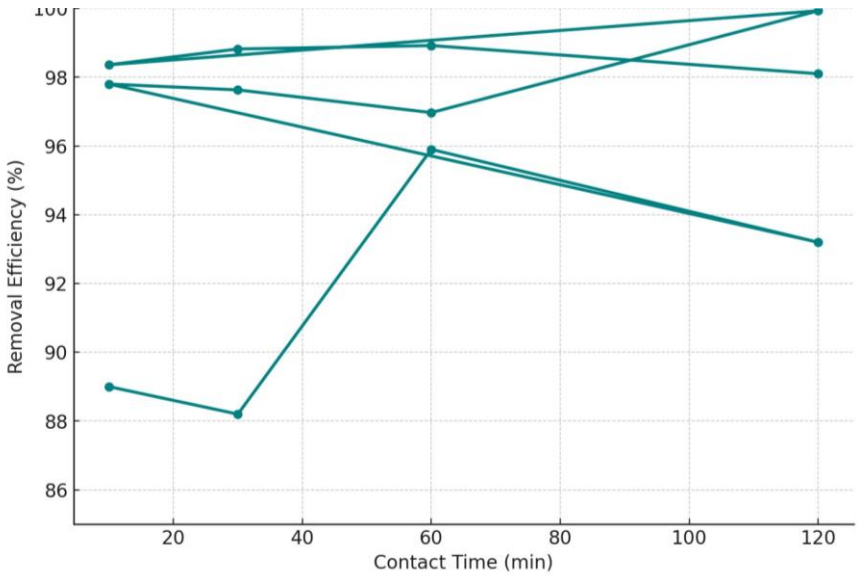


Figure 4. Effect of contact time on Ni(II) removal efficiency using biochar (C_0 = 3 mg/L, m = 1 g)

Рисунок 4. Влияние времени контакта на эффективность удаления Ni(II) с использованием биоугля (C_0=3 мг/л, m=1 г)

This figure illustrates the influence of contact time on Ni(II) removal efficiency using biochar. The removal efficiency increased rapidly within the first 30–60 minutes, reaching nearly 99%, after which it remained almost constant, indicating equilibrium. The initial sharp rise reflects fast external surface adsorption, where Ni^{2+} ions are quickly bound to available active sites on the biochar surface. Beyond 60 minutes, the adsorption rate slows due to pore diffusion limitations and partial saturation of the surface sites. Such a two-phase pattern — a rapid initial phase followed by a plateau — is typical of pseudo-second-order adsorption kinetics, suggesting that

chemisorption mechanisms may play a dominant role. Biochar provides abundant and easily accessible sites for Ni(II) ions, allowing for quick uptake and stable performance within one hour. Prolonged contact (>60 min) does not significantly increase removal, confirming that 30–60 minutes is the optimum equilibrium time for this system.

3.3. Effect of Initial Concentration

The initial concentration of nickel in the solution also had a significant effect on the efficiency of adsorption. When the concentration was set at 1 mg/L, the removal rate of nickel ranged between 88% and 96%. This variation is likely attributed to the lower driving force that exists for mass transfer between the solution and the adsorbent material, which in this case is biochar. As we observed, when the concentration increased to 3 mg/L, the efficiency of removal improved significantly, reaching values between 97% and 99%. This improvement suggests that enhanced diffusion processes are taking place, along with stronger electrostatic attraction forces acting between the Ni^{2+} ions and the negatively charged surfaces of the biochar. At a further increased concentration of 5 mg/L, the highest removal efficiency was observed, achieving values of up to 99.2%. This remarkable finding confirms that biochar retains a very strong adsorption capacity even when subjected to higher levels of contamination present in the solution, thereby demonstrating its potential utility in water treatment applications.

3.4. Effect of Biochar Dosage

Biochar dosage was found to be a crucial factor influencing the effectiveness of Ni(II) removal from various solutions. As illustrated in Figure 5, an increase in biochar dosage from 0.5 g to 1 g led to a noteworthy improvement in the removal efficiency, raising it from the initial range of 91–97% to a higher range of 95–99%. This significant increase highlights the importance of optimal dosage for effective removal. However, when the dosage was further increased to 5 g, the results did not show a substantial enhancement in removal efficiency; in fact, in certain situations, a minor decrease in efficiency was noted. This observed decline can be attributed to the phenomenon of particle agglomeration, as well as the overlapping of active sites on the biochar, which ultimately reduces the total available surface area for effective adsorption of the Ni(II) ions present. Consequently, based on the findings, 1 g of biochar emerged as the identified optimum dosage, which balances high performance in removal efficiency with material economy, making it the most effective choice for such applications (figure 5).

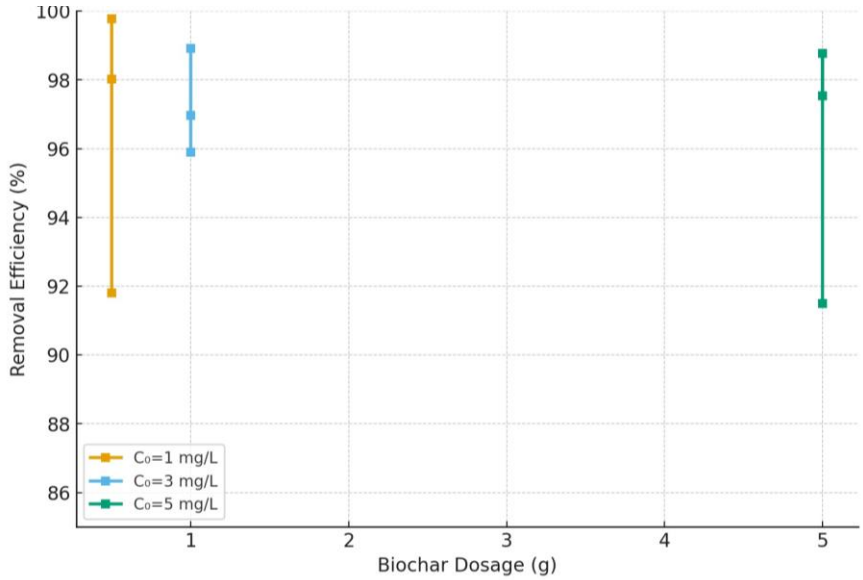


Figure 5. Effect of adsorbent dosage on Ni(II) removal at different initial concentrations (t = 60 m)

Рисунок 5. Влияние дозировки адсорбента на удаление Ni(II) при различных начальных концентрациях (t=60 м)

This figure shows the effect of biochar dosage on Ni(II) removal at a fixed contact time of 60 minutes. The removal efficiency improved as the adsorbent dosage increased from 0.5 g to 1 g, achieving over 95% efficiency across all initial concentrations (1–5 mg/L). However, further increasing the dosage to 5 g did not result in a significant improvement and, in some cases, caused a slight decline. This can be attributed to particle agglomeration and overlapping of active sites, which effectively reduce the total available surface area for adsorption. Interestingly, the efficiency remains consistently high at higher initial concentrations, indicating strong affinity between Ni^{2+} ions and the functional groups present on biochar surfaces. The optimum adsorbent dosage

was found to be 1 g, providing a balance between high removal efficiency and material economy. Increasing the dosage beyond this point does not enhance performance due to mass transfer limitations and reduced effective surface area.

3.5. Mechanism and Practical Implications

The high Ni(II) removal efficiency can be thoroughly explained by examining both the porous structure and the unique surface functionality inherent to biochar. The presence of various oxygen-containing functional groups, such as hydroxyl (–OH) and carboxyl (–COOH), significantly facilitates the complexation processes and ion exchange reactions that occur with nickel ions, optimizing the interaction. Moreover, its distinctive micro–mesoporous structure plays a crucial role in enhancing both the diffusion of ions and their subsequent retention within the biochar matrix. The adsorption process likely involves a sophisticated combination of physical adsorption, surface complexation, as well as electrostatic attraction between the negatively charged functional groups on the biochar and the positively charged nickel ions.

From a practical standpoint, the unique characteristics of biochar, including its low cost, renewable origins, and remarkable adsorption capacity, position it as a promising and sustainable alternative to traditional methods for metal ion removal, which often include approaches like chemical precipitation or ion exchange techniques. The inherent versatility of biochar not only aids in environmental cleanup but also supports resource recovery initiatives. Its exceptional ability to achieve over 98% removal of nickel ions, even under mild operational conditions, strongly underlines its substantial potential for application on a larger scale, particularly in various industrial and municipal wastewater treatment settings. Thus, the adoption of biochar in wastewater management practices could lead to improved outcomes for both environmental sustainability and economic efficiency [4].

4. Conclusion

This comprehensive study provides strong evidence that biochar serves as an exceptionally effective and sustainable adsorbent in the removal of Ni(II) ions from different aqueous systems. The experimental results obtained from this research revealed remarkable removal efficiencies that ranged between an impressive 88% and an exceptional 99.9% under a variety of operating conditions. The investigation went further to identify the optimum parameters for achieving the best results. These parameters were established as using 1 g of biochar, a contact time spanning from 30 to 60 minutes, and an initial concentration of Ni(II) ions at levels of 3 to 5 mg L^{-1}. Under these specific conditions, the removal efficiencies were found to exceed 98%, highlighting the potential of biochar as a viable solution for tackling ion contamination in water systems.

The impressive performance of biochar can be attributed to several key factors, including its large surface area, unique porous structure, and the presence of a high abundance of oxygen-containing functional groups. These characteristics work together to promote strong interaction with nickel ions, effectively enhancing the adsorption process. However, it was noted that increasing the dosage of the adsorbent beyond 1 g did not lead to a significant improvement in the removal efficiency. This lack of improvement is likely due to factors such as particle agglomeration and the saturation of available surface sites, which ultimately limits further enhancements in nickel ion removal.

From a sustainability perspective, biochar provides several unique advantages over more traditional methods that include processes like chemical precipitation and ion exchange. Key benefits of biochar involve its low cost, compatibility with the environment, and ability to be reused effectively. These compelling findings emphasize the potential of utilizing biochar-based adsorption as a practical and eco-friendly solution for effectively controlling nickel contamination within various industrial and municipal wastewater treatment systems. The use of biochar not only promotes sustainability but also contributes to a cleaner and healthier ecosystem.

Future work should concentrate on thoroughly evaluating the regeneration capability of biochar, while also assessing its performance in multi-contaminant as well as real wastewater systems. This assessment is crucial in order to further advance and enhance its potential application in innovative and sustainable water treatment technologies that are more effective and efficient.

References

1. Abd Ali, Z. T., Naji, L. A., Almuktar, S. A. A. A. N., Faisal, A. A. H., Abed, S. N., Scholz, M., Naushad, M., & Ahamad, T. (2020). Predominant mechanisms for the removal of nickel metal ion from aqueous solution using cement kiln dust. [PDF]

2. Ali Khoso, W., Haleem, N., Anwar Baig, M., & Jamal, Y. (2021). Synthesis, characterization and heavy metal removal efficiency of nickel ferrite nanoparticles (NFN's). ncbi.nlm.nih.gov

3. Kostrzewa, M., Staszak, K., Ginter-Kramarczyk, D., Kruszelnicka, I., Góra, W., Baraniak, M., Lota, G., & Regel-Rosocka, M. (2022). Chromium(III) Removal from Nickel(II)-Containing Waste Solutions as a Pretreatment Step in a Hydrometallurgical Process. ncbi.nlm.nih.gov

4. Liu, Y., Wang, H., Cui, Y., & Chen, N. (2023). Removal of copper ions from wastewater: a review. International journal of environmental research and public health, 20(5), 3885. mdpi.com

5. Mothepane Mabowa, H., Mkhohlakali, A., Mokoena, S., Tshilongo, J., & Chimuka, L. (2024). Removal of Nickel from Nickel Sulfite-Fire Assay Dissolution Filtrate Through Precipitation. ncbi.nlm.nih.gov

6. Rahman, N. & Nasir, M. (2019). N-(2-(2-Aminoethyl)amino)ethyl)amino)methyl)-4-sulfamoylbenzamide Impregnated Hydrous Zirconium Oxide as a Novel Adsorbent for Removal of Ni(II) from Aqueous Solutions: Optimization of Variables Using Central Composite Design. ncbi.nlm.nih.gov

7. Thevannan, A. (2009). Biosorption of nickel by barley straw. [PDF]

8. Yamac, S., Turp S. M., Coban, H. (2023). Desalination and Water Treatment 316 (2023) 395-407 December Nickel(II) adsorption in aqueous solutions with cost-effective mesoporous Bitlis pumice stone. Desalination and Water Treatment 316 :395-407. DOI: 10.5004/dwt.2023.30209

9. Zinicovscaia, I., Yushin, N., Grozdov, D., Vergel, K., Popova, N., Artemiev, G., & Safonov, A. (2020). Metal Removal from Nickel-Containing Effluents Using Mineral–Organic Hybrid Adsorbent. ncbi.nlm.nih.gov

Литература

1. Абд Али, З. Т., Наджи, Л. А., Альмуктар, С. А. А. А. Н., Файсал, А. А. Х., Абед, С. Н., Шольц, М., Наушад, М. и Ахамад, Т. (2020). Преобладающие механизмы удаления ионов металлического никеля из водных растворов с использованием цементной пыли.

2. Али Хосо, В., Халим, Н., Анвар Байг, М. и Джамал, Й. (2021). Синтез, характеристика и эффективность удаления тяжелых металлов наночастицами феррита никеля (НФН).

3. Кострзева М., Стасзак К., Гинтер-Крамарсзук Д., Кружелничка И., Гора В., Бараньяк М., Лота Г. и Регель-Росочка М. (2022). Удаление хрома(III) из растворов отходов, содержащих никель(II), как этап предварительной обработки в гидрометаллургическом процессе.

4. Лью Я., Вонг Х., Куи Я. и Чен Н. (2023). Удаление ионов меди из сточных вод: обзор. Международный журнал исследований окружающей среды и общественного здравоохранения, 20(5), 3885.

5. Мозефан Мабова Х., Мкхолакали А., Мокоена С., Тшилонго Ю., Чимука Л. (2024). Удаление никеля из фильтрата, полученного методом пробирного анализа сульфита никеля, осаждением.

6. Рахман Н., Назир М. (2019). Гидрированный оксид циркония, пропитанный N-(2-(2-аминоэтил)амино)этил)амино)метил)-4-сульфамоилбензамидом, как новый адсорбент для удаления Ni(II) из водных растворов: оптимизация переменных с использованием централизованного композитного дизайна.

7. Зеванан А. (2009). Биосорбция никеля ячменной соломой.

8. Ямак С., Турп С. М., Кобан Х. (2023). Опреснение и очистка воды 316 (2023) 395-407 Декабрь Адсорбция никеля(II) в водных растворах с использованием экономически эффективного мезопористого битлисского пемзового камня. DOI: 10.5004/dwt.2023.30209

9. Зиниковская И., ЯшинН., Гроздов Д., Вергель К., Попова Н., Артемьев Г., Сафонов А. (2020). Удаление металлов из никельсодержащих стоков с использованием гибридного минерально-органического адсорбента.

Authors information

Last name, first name, patronymic	*Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)*
Güldane Aslı Turp	Sakarya University, Sakarya, Turkey
Sinan Mehmet Turp	Ph.D. (Environmental Engineering), Associate Professor, Bitlis Eren University, Tatvan Vocational School, Department of Chemistry and Chemical Processing Technologies, Head of Laboratory Technology Program, Bitlis 13200, Türkiye, smturp@beu.edu.tr ORCID 0000-0002-6645-764X
Saim Özdemir	Sakarya University, Sakarya, Turkey
Rasim Alosmanov	Baku State University, Baku, Azerbaijan

Сведения об авторах

ФИО	*Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)*
Турп Гюльдане Аслы	Университет Сакарья, Сакарья, Турция
Турп Синан Мехмет	кандидат технических наук (инженерия окружающей среды), доцент, Университет Битлис Эрен, Татванское профессиональное училище, факультет химии и технологий химической обработки, руководитель программы лабораторных технологий, Битлис, 13200, Турция, smturp@beu.edu.tr ORCID 0000-0002-6645-764X
Оздемир Саим	Университет Сакарья, Сакарья, Турция
Алосманов Расим	Бакинский государственный университет, Баку, Азербайджан

статья поступила в редакцию	одобрена после рецензирования	принята к публикации
14.10.2025	30.10.2025	12.11.2025

the article was submitted	approved after reviewing	accepted for publication
14.10.2025	30.10.2025	12.11.2025

Научная статья

УДК 543.07

ДАТЧИК ТОКСИЧНЫХ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ТРОЙНОГО КОМПОЗИТА

Анастасия Денисовна Васильева✉ [1] nussanussa@mail.ru
Анастасия Олеговна Зарубина [1] karginova@sfedu.ru
Татьяна Сергеевна Колесникова [1] shkip90@yandex.ru
Игорь Ефимович Уфлянд [1] ieuflyand@sfedu.ru

[1]Южный федеральный университет, ул. Зорге, д. 7, г. Ростов - на - Дону, 344090, Россия

Аннотация. В статье представлена возможность конструирования резистивного датчика определения токсичных летучих органических соединений, таких как бензол, толуол, ксилол. Основой сенсорного слоя устройства является тройной композит на основе итаконата стронция, оксида графена и полианилина. Установлено, что предлагаемая конструкция датчика индифферентна к влажности воздуха, обладает удовлетворительными сенсорными характеристиками.

Ключевые слова: сенсор, активный сенсорный слой, итаконат кальция, оксид графена, полианилин.

Для цитирования: Васильева А. Д., Зарубина А. О., Колесникова Т. С., Уфлянд И. Е. Датчик токсичных летучих органических соединений на основе тройного композита // Инженерные технологии. 2025. № 4 (12). С. 61-72.

Original article

A TOXIC VOLATILE ORGANIC COMPOUND SENSOR BASED ON A TERNARY COMPOSITE

Anastasia D. Vasilyeva ✉ [1] nussanussa@mail.ru
Anastasia O. Zarubina [1] karginova@sfedu.ru
Tatyana S. Kolesnikova [1] shkip90@yandex.ru
Igor E. Uflyand [1] ieuflyand@sfedu.ru

[1]Southern Federal University, Sorge St., 7, Rostov-on-Don, 344090, Russia

Abstract. This article presents the feasibility of designing a resistive sensor for detecting toxic volatile organic compounds such as benzene, toluene, and xylene. The device's sensor layer is based on a ternary composite of strontium itaconate, graphene oxide, and polyaniline. The proposed sensor design is found to be insensitive to air humidity and exhibits satisfactory sensor performance.

Keywords: sensor, active sensor layer, calcium itaconate, graphene oxide, polyaniline.

For citation: Vasilyeva A. D., Zarubina A. O., Kolesnikova T. S., Uflyand I. E. A toxic volatile organic compound sensor based on a ternary composite. Ingenernye tehnologii = Engineering technologies. 2025; (4 (12)): 61-72. (In Russ.).

Введение

Ароматические углеводороды в современном мире продолжают играть очень важную роль, хотя и заметны тенденции изменения их назначения. Особое значение в этом плане занимает бензол, являющийся важным продуктом в промышленности и при этом хорошо известно о его канцерогенности [1-3]. Толуол и ксилолы, в отличие от бензола не проявляют канцерогенной активности, но способны оказывать неблагоприятное воздействие на центральную нервную систему человека [4].

В силу этого регистрация и мониторинг таких веществ в атмосфере приобретает все большую важность как на производственных объектах, так и в повседневной жизни человека [5-7]. Реализация задач для достижения такой цели является сложной проблемой и всецело зависит от возможности использования высокопроизводительных и относительно дешевых сенсорных устройств, способных обнаруживать такие газовые аналиты.

Газовый датчик, применяемый для этих целей, должен удовлетворять нескольким условиям:

- обладать высокой чувствительностью;
- проявлять хорошую селективность;
- быстро давать отклик на изменившиеся условия и, при этом также быстро восстанавливаться;
- характеризоваться высокой стабильностью, воспроизводимостью;
- способным работать при комнатной температуре;
- обладать минимальной реакцией на влажность воздуха;
- быть недорогим и простым с технологической точки зрения.

Все многообразие датчиков содержания бензола, толуола и ксилолов в воздухе, можно разделить в соответствии с принципом их работы.

© 2025. Васильева А. Д. и др. / Vasilyeva A. D. et al.

1. Оптические датчики. В работе таких устройств используется принцип абсорбционной спектроскопии. Исследуемая газовоздушная смесь либо ионизируется и анализируется спектр поглощения, или исследуется собственное поглощение в определенной оптической зоне, а полученные данные обрабатываются компьютерной системой. Эти датчики могут обнаруживать газы БТХ в режиме реального времени и особенно полезны для мониторинга окружающей среды [8,9].

2. Электрохимические датчики:

Эти датчики, включая датчики смешанного потенциала, могут обеспечивать миниатюризацию и прямое считывание напряжения, что делает их пригодными для портативных применений, но имеют определенный недостаток – работа таких устройств требует повышенных температур [10].

3. Хеморезистивные газовые датчики:

Эти датчики, часто основанные на оксидах металлов, таких как SnO_2, TiO_2, WO_3, обнаруживают изменения электрического сопротивления при воздействии газов BTX. Такие устройства могут работать как при повышенных температурах [11], так и при комнатной температуре [12].

В настоящем исследовании мы сообщаем о возможности использования нанокомпозитов на основе итаконата стронция, оксида графена и полианилина в качестве эффективного сенсорного слоя для создания компактного датчика на бензол, толуол и ксилол (БТК). Также следует отметить, что новизна данного исследования заключается в использовании материалов, обладающих полупроводниковыми свойствами, что в свою очередь позволяет использовать в качестве аналитического сигнала сопротивление / проводимость активного слоя. Таким образом, предлагаемое устройство может заменить существующие сложные методы измерения этих соединений и потенциально других летучих органических соединений (ЛОС) в воздухе, являясь быстрым, эффективным и недорогим способом. Характеристики данного прибора, очень важны для мониторинга и контроля токсичных ЛОС в режиме реального времени, учитывая существенное влияние на здоровье человека и развитие серьезных заболеваний. В соответствии с этим есть определенная надежда на то, что подобный инструмент принесет обществу большую пользу.

Материал и методы исследования

Все химические вещества имеют аналитическую чистоту или выше и использовались без дополнительной очистки. Все водные растворы были приготовлены на бидистиллированной воде. Карбонат стронция ($SrCO_3$), нитрат натрия, серная кислота (98%), итаконовая кислота, перманганат калия, порошок гидроксида натрия, поливиниловый спирт, полиакриламид, поливинилацетат, диметилформамид (ДМФА) и перекись водорода (38%) были приобретены в компании Acros Organics. Для получения оксида графена (ОГ) использовался графит марки 230U компании Aldrich, содержащий более 99% углерода и 0,6% золы (сжигание в токе кислорода при 1100 °C) [13].

Рентгеноструктурный анализ (XRD) проводили на приборе Phywe XR 4.0 (Phywe, CuKα, λ = 0,15418 нм, скорость сканирования 2°/мин, шаг 0,02°). Инфракрасные Фурье-спектры (FTIR) регистрировали на спектрометре Perkin-Elmer Spectrum 100 FTIR (Perkin-Elmer) с использованием таблеток KBr и программного обеспечения для анализа данных Softspectra (Shelton, CT). Сканирующая электронная микроскопия (SEM) проводилась на приборе ZEISS Crossbeam 340 (Carl Zeiss) с ускоряющим напряжением 3 кВ с использованием детектора вторичных электронов Эверхарта-Торнли (SE2) с увеличением от 1,92 до 50 000 раз. Элементный анализ проводили на CHNOS-анализаторе Vario EL cube (Elementar Analysensysteme GmbH). Стронций определяли на атомно-абсорбционном спектрометре ААС-3 (Германия) после перевода твердой пробы в раствор с использованием минеральных кислот и последующего ультразвукового распыления. Атомизацию проводили в пламени ацетилена-воздуха. Итаконат стронция был получен обменной реакцией между карбонатом стронция и итаконовой кислотой. 100 мл бидистиллированной воды поместили в стакан объемом 250 мл и нагрели при постоянном перемешивании до 60 °C, затем добавили 2,6 г (0,02 моль) итаконовой кислоты. После растворения кислоты небольшими порциями добавили 5,88 г карбоната стронция (0,04 моль). После добавления всего карбоната стронция перемешивание продолжали в течение 30 мин. Горячую суспензию профильтровали через пористую стеклянную пластинку, а полученный прозрачный раствор нагрели на магнитной мешалке при 80 °C. Через некоторое время образовался объемный белый гелеобразный осадок гидрогеля итаконата стронция. Полученный фильтрат снова нагрели и отделили осадок. Эту процедуру проводили до тех пор, пока при длительном нагревании осадок практически не образовываться. Все части отделенного осадка объединили и высушили на воздухе при 60 °C. Выход продукта составил 78,52% в пересчете на итаконовую

кислоту. Элементный анализ, Найдено %: C – 34,76; H – 2,64; Sr – 25,72. Рассчитано на $C_{10}H_8O_8Sr$, %: C – 34,92; H – 2,32; Sr – 25,49.

ОГ был синтезирован с использованием модифицированного метода Хаммерса. В типичном случае 1 г графитовых чешуек и 1 г нитрата натрия смешивали в фарфоровой ступке и тщательно растирали до получения однородной смеси. 33 мл серной кислоты (98%) помещали в стакан объемом 0,5 л и ставили на ледяную баню, охлаждая до 10 °C. Смесь нитрата натрия и графита добавляли в стакан с кислотой небольшими порциями при постоянном перемешивании до однородного состояния, одновременно снижая температуру до 4-5 °C. После этого небольшими порциями добавляли 6 г перманганата калия, постоянно помешивая с осторожностью. Стакан все время находился в ледяной бане, при этом температура не должна была подниматься выше 10 °C. После добавления последней порции перманганата калия перемешивание продолжали не менее 10 мин. Стакан с полученной смесью поместили на водяную баню и медленно подняли температуру до 35 °C, постоянно помешивая с осторожностью. Смесь поддерживали при указанной температуре в течение 90 мин и оставляли при комнатной температуре на 12 ч для успешного разрушения связей между слоями графита. По истечении указанного времени к полученной однородной суспензии графита в кислотной смеси медленно добавили 40 мл дистиллированной воды, соблюдая осторожность, чтобы температура смеси не поднималась выше 60 °C, в конце добавления воды 80 °C. Горячую смесь медленно нагрели до 95 °C и выдерживали в течение 35 мин при постоянном перемешивании. Смесь оставили при комнатной температуре для охлаждения до температуры окружающей среды. К остывшей смеси небольшими порциями при постоянном перемешивании добавили 10 мл перекиси водорода (массовая доля пероксида водорода - 38%). Смесь оставляли отстаиваться в течение 12 ч, после чего разделили сначала декантацией, а затем центрифугированием при 8000 об/мин. Промывали дистиллированной водой и дополнительно очищали осмосом на пленке из ацетата целлюлозы до полного исчезновения сульфат- и нитрат-ионов. Желтовато-коричневый осадок отделяли центрифугированием, кратковременно высушивали на воздухе и хранили в виде пасты. В отдельной порции полученной пасты определяли влажность, необходимую для расчета массы безводного ГО при его введении в реакционную массу.

Синтез ПАНИ осуществлялся методом окислительной полимеризации согласно методикам [14-16].

Синтез двухкомпонентного композита на основе итаконата стронция и ОГ

В стакан объёмом 250 мл налили 100 мл бидистиллированной воды, нагрели до 60 °C и добавили 2,6 г (0,02 моль) итаконовой кислоты. После растворения кислоты добавили расчётное количество пасты ГО из расчёта содержания ГО в количестве 10% от массы итаконата стронция. Смесь перемешивали в течение 30 мин до образования однородной суспензии. Затем небольшими порциями добавили 2,94 г карбоната стронция (0,02 моль) и перемешивали в течение 10 мин. Температуру подняли до 80 °C, далее процедуру проводили аналогично синтезу итаконата стронция. Осадок отделяли от жидкой части центрифугированием, промывали водой, затем дважды спиртом, порциями по 20 мл. Кратковременно сушили на воздухе, затем в сушильном шкафу при 80 °C в течении суток. В конечном итоге порошок досушивали в вакууме при остаточном давлении 10 мм рт ст при 80 °C в течение 6-ти часов.

Синтез трехкомпонентного нанокомпозита итаконат стронция – ОГ – ПАНИ

2.5 г композита итаконата стронция – ОГ диспергируют в 50 мл предварительно высушенного ДМФА под действием ультразвукового излучения (интенсивность излучения 3.5 Вт/см^2, частота 22 кГц излучатель - UZTA-0.8/22-OMU, Россия) в течении 30 минут. В данных условиях композит формирует устойчивую систему, вероятно за счет проникновения ДМФА в межслоевые пространства, образуя вязкую смесь, устойчивую в течении 7 дней. В полученную дисперсию вносят ***2***.5 г ПАНИ и вновь подвергают воздействию ультразвуком, как описано выше в течение 15 минут. В этом случае устойчивой дисперсии не образуется, а напротив, после окончания обработки в скором времени происходит формирование довольно плотного осадка. Полученный осадок отделяют фильтрованием на стеклянной пластинке под вакуумом и промывают два раза абсолютным этанолом порциями по 30 мл. Полученный композит кратковременно сушат на воздухе, а затем при 80 °C в вакууме при остаточном давлении 15 мм рт ст в течении 6 часов. Получают черный сыпучий порошок, который в последствии подвергают прессованию под давлением 480 МПа [17].

Изготовление активного слоя сенсора

Стеклянные пластины были подготовлены, как описано в работе [18]. В центре пластины просверлили два отверстия диаметром

0,5 мм на расстоянии 5 мм друг от друга. 2,00 г композита на основе итаконата стронция – ОГ и 0,50 г ПАНИ смешивали в агатовой ступке, тщательно перемешивали и измельчали. Смесь помещали между пластинами из нержавеющей стали и прессовали под давлением 480 МПа [17] для получения пленки в течение 24 ч. В результате такой обработки толщина пленки составила 25–30 мкм. Выбирали однородные участки пленки и вырезали из них кусочки размером 10 х 10 мм, которые приклеивали к стеклянной пластине раствором поливинилового спирта (ПВС) так, чтобы пленка полностью закрывала просверленные отверстия. Через отверстия пропускали никелевую проволоку диаметром 0,3 мм в качестве штыревых электродов (рисунок 1). Разрывы пленки, образуемые электродами, устранялись кусочками пленки, уплотненными зондом.

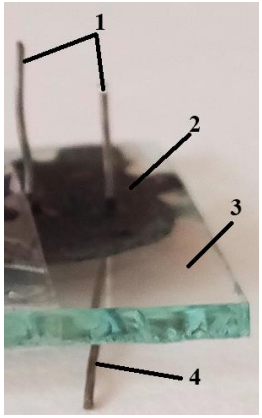


Рисунок 1. Стеклянная подложка с нанесенным активным слоем для сенсора:
1 – встречно- штырьевые электроды; 2 – активный слой сенсорного элемента; 3 – стеклянная подложка; 4 – соединительные провода

Figure 1. Glass substrate with an active layer applied to the sensor: 1 – interdigital electrodes; 2 – active layer of the sensor element; 3 – glass substrate; 4 – connecting wires

Приготовление смесей паров бензола, толуола и ксилола с воздухом

Смеси аналитов готовили путем продувки воздуха, нагнетаемого компрессором, через жидкий бензол, толуол или ксилол. Насыщенный парами воздух смешивали в смесителе с чистым воздухом до достижения необходимой концентрации паров. Точность определения концентраций в калибровочных смесях контролировали методом газовой хроматографии.

Результаты исследования и их обсуждение

Итаконат стронция получен взаимодействием исходных компонентов (карбоната стронция и итаконовой кислоты) в воде. Вначале образуется объёмный белый гелеобразный осадок гидрогеля итаконата стронция (рисунок 2а). После высыхания образуется волокнистое вещество (рисунок 2б) с хаотично ориентированными волокнами, что обеспечивает низкую насыпную плотность полученного соединения – 0,48 г/мл. Итаконат стронция кристаллизуется в виде длинных нитевидных структур длиной до 7 см и диаметром 0,5 мкм (рисунок 2в). Морфологическая картина итаконата стронция, полученная методом СЭМ, позволяет уточнить тонкие детали текстуры вещества (рисунок 3). Из представленного рисунка видно, что итаконат стронция не образован полностью нитевидными структурами, а представляет собой длинные полые балки (рисунок 3а). Многочисленные параллельные элементы объединены в отдельные пластины шириной до 10 мкм и толщиной 200 нм. На поперечном изломе (рисунок 3б) визуализируются элементы, имеющие свободные полости, близкие к сферической форме, диаметром около 100 нм и толщиной стенок 50–80 нм. Последнее обстоятельство объясняет низкую насыпную плотность вещества.

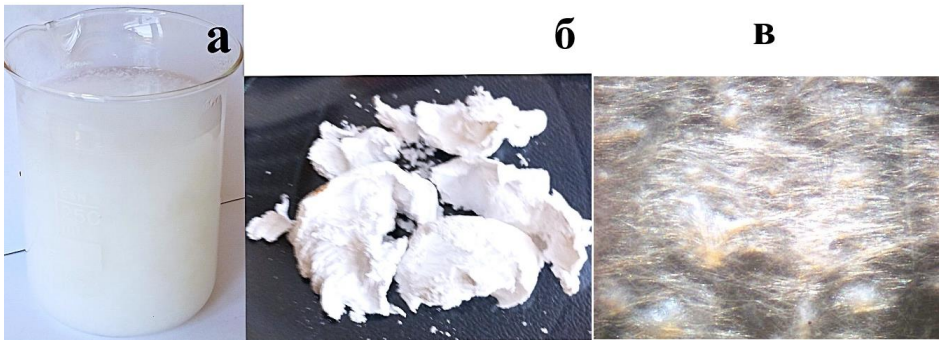


Рисунок 2. Морфологические особенности итаконата стронция: а – гидрогель итаконата стронция; б – высушенный препарат итаконата стронция; в- морфология кристаллического итаконата стронция в световой микроскоп при увеличении 400Х

Figure 2. Morphological features of strontium itaconate: a – strontium itaconate hydrogel; б – dried strontium itaconate preparation; в – morphology of crystalline strontium itaconate under a light microscope at 400X magnification

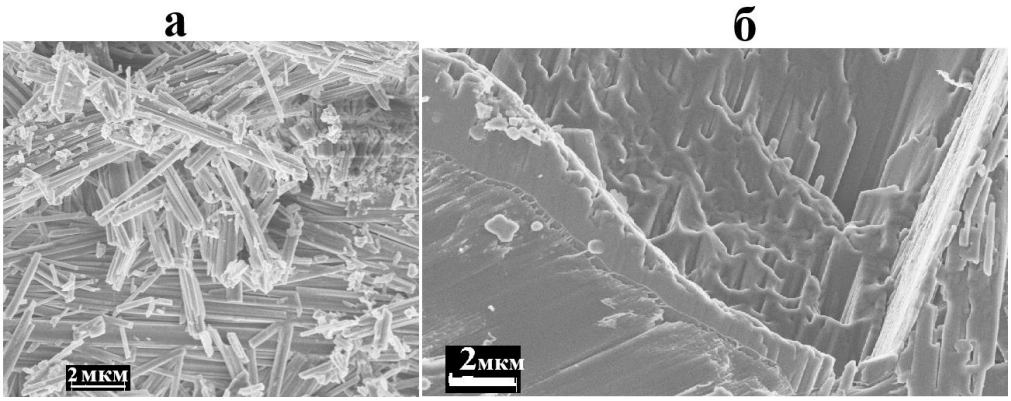


Рисунок 3. Изображение сканирующей электронной микроскопии кристаллов итаконата стронция. а – изображение общей картины кристаллов; б – изображение торцевой части кристаллов с перегородками

Figure 3. Scanning electron microscopy image of strontium itaconate crystals. a – image of the overall picture of the crystals; б – image of the end part of the crystals with partitions

Энергодисперсионный анализ (рисунок 4), проведенный для одного образца в пяти точках, показывает хорошее согласие с элементным анализом, проведенным химическим способом (таблица 1).

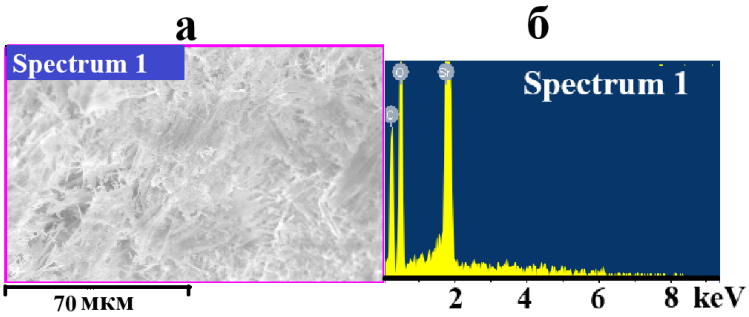


Рисунок 4. Изображение результатов энергодисперсионного анализа образца итаконата стронция: а – область исследования; б – ЭДС спектр

Figure 4. Image of the results of energy dispersive analysis of a strontium itaconate sample: a – study area; б – EDX spectrum

Таблица 1. Результаты элементного анализа итаконата стронция по данным ЭДА

Table 1. Results of elemental analysis of strontium itaconate according to EDX data

Элемент / Element	Интенсивность / Intensity	Массовых, % / Mass %	Ошибка, % / Deviation%
C K	0.4761	35.00	2.78
O K	0.9222	37.59	1.75
Sr L	0.8660	25.22	1.81

Итаконат стронция охарактеризован методом рентгеновской дифракции. Для него характерно большое количество дифракционных пиков: 8,1; 20,8; дублет 27,1 и 28,1; 34,5; 41,7; 43,9; дублет 47,5 и 48,0, что объясняется особенностями его кристаллической структуры. Для проведения дальнейшего эксперимента были получены 5 образцов ОГ, которые были проанализированы методом элементного анализа (химическим и энергодисперсионным рентгеновским методом). Результаты анализа представлены в таблице 2. Из представленных в таблице данных видно, что результаты элементного анализа, проведенного различными методами, в целом согласуются между собой. В образцах 3 и 5 определяется сера, при этом содержание кислотных функциональных групп несколько повышено, что можно объяснить сульфитацией концевых колец концентрированной серной кислотой при окислении графита. Для экспериментов был выбран образец ГО № 1, в котором соотношение C:O = 3:1. Морфологическая картина поверхности всех образцов однородна, как и данные энергодисперсионного анализа (рисунок 5 а,б). На рентгенограмме полученного образца ОГ выделяется пик при 2Θ = 10,7 (рисунок 5в), что соответствует ранее опубликованным данным [19].

Таблица 2. Элементный анализ образцов ОГ и общее содержание кислотных групп (С/О)

Table 2. Elemental analysis data and total content of acid groups (X) of GO samples

Образец ОГ / GO sample	Элементный анализ образцов, % / Elemental analysis data, %						С/О, ммоль/г, P = 0.95; n = 5 X, mmol/g, P = 0.95; n = 5
	Химический метод / Chemical method			ЭДА / EDX			
	C	H	S	C	O	S	
1	69.36	0.76	-	69.27	29.88	-	1.97±0.12
2	70.12	0.62	-	71.41	27.54	-	2.13±0.20
3	65.44	0.84	1.26	66.11	25.62	1.44	2.25±0.62
4	69.22	0.74	-	68.92	28.54	-	1.84±0.24
5	63.27	0.66	1.45	64.12	24.62	1.56	2.48±0.67

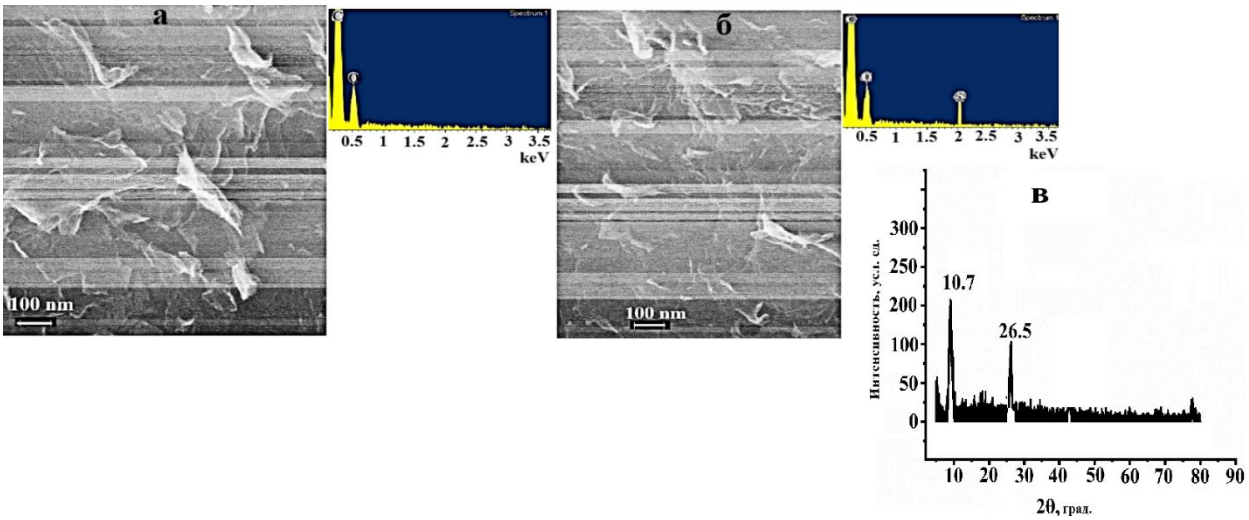


Рисунок 5. Изображение сканирующей электронной микроскопии и ЭДА образцов ОГ 1(а) и 3 (б) и их порошковая рентгенограмма (в)

Figure 5. Scanning electron microscopy and EDA images of OG samples 1 (a) and 3 (б) and their powder X-ray diffraction pattern (в)

Двухкомпонентный композит получали в качестве промежуточного продукта путем введения расчетной массы ОГ (образец 1) на стадии синтеза итаконата стронция. Композит представляет собой черный порошок, не полимеризующийся при нагревании, по крайней мере до 300 °С. При введении ОГ на стадии синтеза структура итаконата стронция претерпевает существенные изменения, образуя черные блестящие кристаллы размером 2,5 × 1,7 мкм. Композит итаконата стронция с ОГ был охарактеризован методом рентгеновской дифракции. Профиль рентгеновской дифракции композита существенно сглажен и характеризуется появлением ряда пиков, отсутствовавших в прекурсоре, включая: 11,0; 12,1; 14,1. При этом сохраняется ряд рефлексов, характерных для итаконата стронция, включая: 20,7; 27,4 и 28,5. В дальней области углов 2Θ в композите все пики существенно сглажены. На конечном этапе в двухкомпонентный композит вводится ПАНИ с целью придания возможности прессования и придания композиту свойств полупроводника. Для получения пленки смесь подвергают прессованию. По окончанию прессования получают пленку, пригодную для использования в качестве активного сенсорного слоя. Исследование пленки с помощью просвечивающей электронной микроскопии показало трасформацию всех компонентов с образованием единой системы со своими морфологическими особенностями. Так изначально итаконат стронция представлены различными по зрелости кристаллами, среди них визуализируются кристаллы призматической формы размерами от 0.86 х 0,142 мкм до 4.6 х 0.42 мкм, ОГ представлен отдельными листами с размером более 1 мкм. Морфология трехкомпонентного нанокомпозита существенно отличается от прекурсоров и представлена после прессования с ПАНИ удлиненными структурами длиной 1.26 мкм, шириной 0.74 мкм с ворсинками на поверхности размерами 18.8 х 7.27 нм. Для композита была измерена площадь поверхности по БЭТ. Полученная в эксперименте изотерма адсорбции-десорбции азота при 77 К может быть отнесена к IV типу по классификации ИЮПАК. Для данного типа адсорбционного процесса характерно протекание как по моно-, так и по многослойному механизму. Кроме этого, для такого типа адсорбционных взаимодействий вполне вероятна капиллярная

конденсация в мезопорах сорбента [20]. Средний размер пор оценивается как 8.37 нм.

Проведение эксперимента по определению содержания бензола, толуола и ксилолов в воздухе

Для проведения эксперимента газовая смесь направлялась в устройство, содержащее сенсорный элемент. Блок-схема устройства представлена на рисунке 6. В качестве газовоздушной смеси использовалась стандартизированная смесь, состав которой контролировался с помощью газового хроматографа. После ввода смеси измерялось сопротивление пленки, определялось время отклика устройства и время его восстановления (релаксации). Мешающее влияние относительной влажности воздуха изучалось в изотермических условиях при значениях относительной влажности 38,2, 59,1, 75,5 и 85,1.

Рисунок 6. Блок – схема измерительной системы

Figure 6. Block diagram of the measuring system

Результаты экспериментов представлены на рисунке 7а. Из представленного рисунка видно, что относительная влажность в диапазоне от 38,2 до 85,1% не оказывает существенного влияния на сопротивление активного слоя сенсорного элемента.

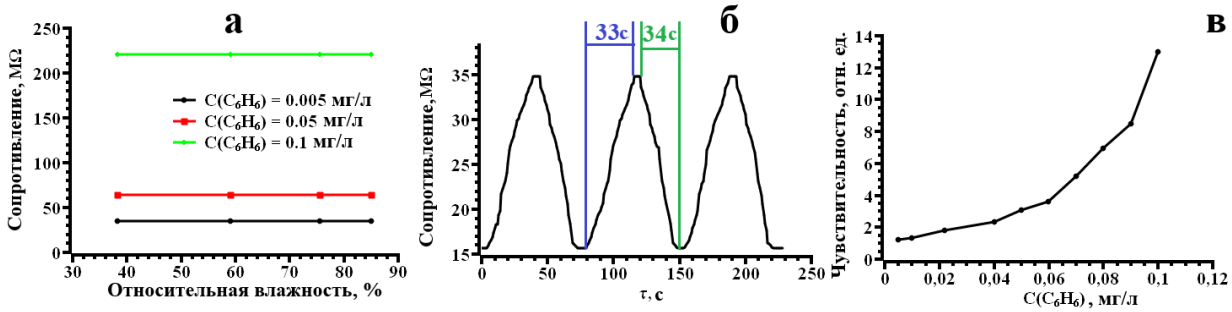


Рисунок 7. Зависимость сопротивления активного слоя от концентрации бензола при разных значениях влажности(а), время отклика и релаксации датчика (б) и чувствительность датчика (в). t = 27 °C, RH = 38,2%, n = 3, P = 0,95, концентрация бензола 0,05 мг/л

Figure 7. Dependence of the active layer resistance on the benzene concentration at different humidity values (a), response and relaxation time of the sensor (b) and sensitivity of the sensor (c). t = 27 °C, RH = 38.2%, n = 3, P = 0.95, benzene concentration 0.05 ppm

Отклонение от средних значений представлено в таблице 3. Анализируя данные таблицы, можно заметить, что с увеличением концентрации бензола в воздухе мешающее значение ОВ оказывает незначительное влияние. Время отклика датчика определялось как время, необходимое для достижения стабильных значений сопротивления датчика при максимальной концентрации аналита по сравнению с сопротивлением датчика в чистом воздухе. Время релаксации определялось путем продувки устройства воздухом или инертным газом, содержащим газовоздушную смесь, содержащую аналит в максимальной концентрации. Время отклика, необходимое датчику для достижения 90% стабилизированного значения сопротивления после контакта чувствительного газа с чувствительной поверхностью. Время восстановления, необходимое датчику для восстановления значения на 10% большего, чем его исходное сопротивление, после удаления чувствительного газа.

Таблица 3. Отклонение от средних значений сопротивления сенсорного слоя при различных значениях концентрации бензола в воздухе в зависимости от относительной влажности при относительной влажности воздуха 85%

Table 3. Deviation from the average values of resistance of the sensor layer at different values of benzene concentration in the air depending on the relative humidity at a relative humidity of 85%

Концентрация бензола, мг/л / C(benzene), ppm	0.005	0.05	0.1
Отклонение от номинального значения сопротивления, % не более / Deviation from the nominal resistance value, % no more than	0.23	0.04	0.02

Время отклика датчика, рассчитанное таким образом, составляет 33,4 ± 0,3 с (s = 0,8%), а время релаксации при условии, что поверхность продувается чистым воздухом или инертным газом (азот, аргон), составляет 34,8 ± 0,7 с (рисунок 7б). Из представленного рисунка видно, что в области достаточно низких концентраций сенсор демонстрирует удовлетворительные характеристики по времени отклика и времени релаксации. Чувствительность сенсора (%) определялась по формуле:

$$S = \frac{(R_a - R_g)}{R_a} \cdot 100\%,$$

где R_a – сопротивление сенсорного слоя на воздухе; R_g – сопротивление сенсорного слоя в воздушно-газовой среде. Зависимость чувствительности сенсора от концентрации бензола представлена на рисунке 7в. Из представленного рисунка видно, что чувствительность сенсора в области низких концентраций достаточно высока и, как и ожидалось, экспоненциально возрастает с ростом концентрации аналита. Аналогичные эксперименты были проведены с газовоздушной смесью тех же концентраций, содержащей толуол и ксилолы (о-ксилол, м-ксилол и п-ксилол). Зависимость сопротивления активного слоя прибора от концентрации толуола и ксилолов представлена на рисунке 8.

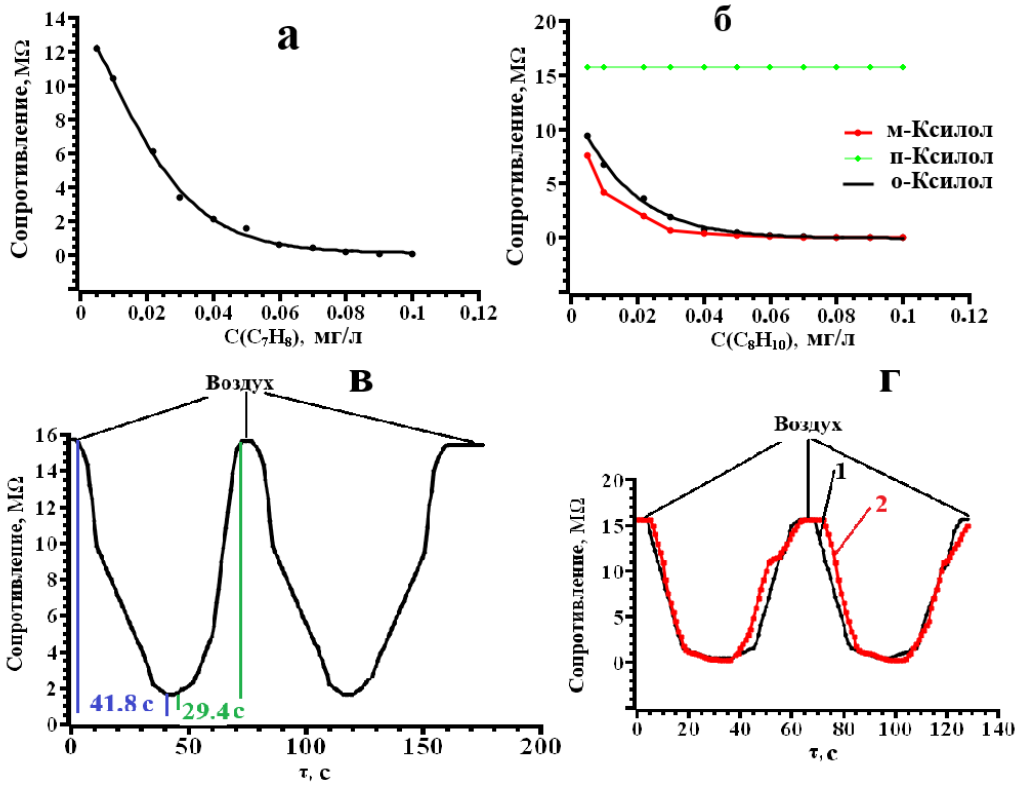


Рисунок 8. Зависимость сопротивления активного слоя сенсора от концентрации: а – толуола; б – ксилолов и время отклика и релаксации сенсора. в – толуол; г – ксилолы, 1 – м-ксилол, 2 – о-ксилол

Figure 8. Dependence of the resistance of the active layer of the sensor on the concentration: a – toluene; б – xylenes and the response and relaxation time of the sensor. в – toluene; г – xylenes, 1 – m-xylene, 2 – o-xylene

Полученные результаты демонстрируют картину, принципиально отличную от таковой для бензола. В случае бензола в качестве аналита сопротивление активного слоя увеличивалось по экспоненциальной зависимости, тогда как в случае толуола, о- и м-ксилолов наблюдается экспоненциальное падение сопротивления. Следует отметить, что в области высоких концентраций о- и м-ксилолов значения сопротивления практически одинаковы. В отличие от других аналитов, п-ксилол индифферентен к активному слою сенсора. Время отклика сенсора при определении толуола несколько увеличено по сравнению с бензолом и ксилолами, а время релаксации во всех случаях примерно одинаково (таблица 4, рисунок 8 в,г). Механизм работы сенсора при определении бензола, вероятно, связан с физической адсорбцией паров бензола на поверхности композита в порах итаконата стронция и за счет π–π-стэкинга молекул бензола и ОГ. Накопление бензола на поверхности композита приводит к увеличению сопротивления поверхностного слоя, поскольку сам бензол имеет сопротивление около 3,8 ТОм.

Таблица 4. Время отклика и время релаксации датчика

Table 4. Response time and relaxation time of the sensor

Аналит / Analyte	Время отклика, с / Response time, s	Время восстановления, с / Relaxation time, s
Толуол	41.8	29.4
М-Ксилол	27.2	30.6
О-Ксилол	29.5	31.3

В условиях эксперимента (комнатная температура) используемый композит не способен окислять бензол, так как простейший процесс окисления характеризуется достаточно высокой энергией активации (118 кДж/моль) [21]. В отличие от бензола, толуол и ксилолы в этих условиях, скорее всего, подвергаются каталитическому окислению ОГ на поверхности итаконата стронция. Суть этого процесса сводится к цепочке последовательных уравнений [22], схематически представленной на рисунке 9.

1. O_2 (gas) → O_2(ads)
2. O_2(ads) + e^- → O_2^-
3. O_2^- + e^- → $2O^-$
4. O^- + e^- → O^{2-}
5. C_mH_n + xO^{-y} → mCO_2 + nH_2O + xye^-

Рисунок 9. Схема процесса окисления толуола и ксилолов, потенцированного ОГ

Figure 9. Scheme of the oxidation process of toluene and xylenes, potentiated by GO

В результате такого окисления происходит цепочка перемещения электронов, снижающая сопротивление активного слоя за достаточно короткий промежуток времени. Важным моментом в описываемых процессах является свободная диффузия целевых аналитов в чувствительный слой на оптимальную глубину, в противном случае незначительная диффузия приводит к незначительному изменению сопротивления активного слоя, что в конечном итоге снижает чувствительность сенсора и значительно увеличивает время отклика. Таким образом, наноразмерная пористость композита, созданного итаконатом стронция, также становится важной. В этом случае диффузия Кнудсена, которая фактически определяет диффузию аналита, становится очень важной [23]. Чувствительность системы обеспечивается наличием в составе ПАНИ, который, как известно, является достаточно хорошо проводящим полимером. Следует отметить, что полученный нами сенсор показал значения времени отклика, близкие к значениям, полученным в недавно опубликованных работах, а в большинстве случаев и превышающие их (таблица 5).

Таблица 5. Сравнение времени отклика различных датчиков летучих органических соединений

Table 5. Comparison of response times of different VOC sensors

Аналит / Analyte	Время отклика, с / Response time, s	Литература / References
Бензол / Benzene	187.8	[24]
	99.6	[24]
	88.8	[24]
	10	[25]
	38	[12]
	71	[12]
	45	[12]
	33.4	Эта работа
Толуол / Toluene	73.2	[24]
	79.2	[24]
	76.2	[24]
	90	[12]
	41.8	Эта работа
Ксилол / Xylene	145.8	[24]
	142.8	[24]
	148.8	[24]
	29.5	Эта работа

Заключение

В настоящем исследовании были успешно изготовлены новые тонкие композитные пленки на основе итаконата стронция – ОГ – ПАНИ для определения токсичных летучих органических соединений, функционирующих при комнатной температуре. Морфологический анализ поверхности композитной пленки с использованием СЭМ показал особенность композитных материалов, применяемых в данном

исследовании, в частности показано образование черных блестящих кристаллов размером 2,5 × 1,7 мкм для нанокомпозита. Профиль рентгеновской дифракции нанокомпозита существенно сглажен по сравнению с исходным итаконатом стронция. Были изучены газочувствительные свойства композита к газо-воздушным смесям, содержащим летучие органические соединения (бензол, толуол, ксилол). Относительная влажность в диапазоне от 38,2 до 85,1% не оказывает существенного влияния на сопротивление активного слоя сенсорного элемента, таким образом мешающее влияние влажности воздуха на функционирование датчика исключается. Время отклика сенсора при определении толуола несколько увеличивается по сравнению с бензолом и ксилолами, а время релаксации во всех случаях примерно одинаково. Предложенный механизм работы сенсора при детектировании бензола, вероятно, связан с физической адсорбцией паров бензола на поверхности композита в порах итаконата стронция и π–π-стэкингом молекул бензола и ОГ.

Работа выполнена благодаря финансовой поддержке РНФ, проект № 22-13-00260 П.

The work was carried out thanks to the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 22-13-00260 P.

Литература

1. Макмайкл А.Дж. Канцерогенность бензола, толуола и ксилола: эпидемиологические и экспериментальные данные. IARC Sci Publ. 1988; (85):3-18. PMID: 3053447.
2. Д. Лумис, К. З. Гайтон, Й. Гросс, Ф. Эль Гиссасси, В. Бувар, Л. Бенбрахим-Таллаа, Н. Гуха, Н. Вилахур, Х. Мэтток, К. Стрейф. Канцерогенность бензола. Lancet Oncol. 2017, 18, 1574.
3. Г. Ст. Хелен, Е. Лиакони, Н. Нардон, Н. Аддо, П. Джейкоб 3-й, Н. Л. Бэновитс. Сравнение системного воздействия токсичных и/или канцерогенных летучих органических соединений (ЛОС) при вдыхании паров, курении и воздержании от курения. Cancer Prev. Res. 2020, 13, 153.
4. Куин Р, Юан К, Юу Ю., Ху Ю., Жанг В., Вонг Ю., Као Ю., Ма К., Ли С. Ли Г., Вонг Д., Двухслойный газовый сенсор WO3/Ru@CeO2 для обнаружения ксилола на уровне ppb на основе каталитически чувствительного синергетического механизма. ACS Appl Mater Interfaces. 19 марта 2025 г.; 17(11):16920–16931.
5. Ричард Х. Браун. Мониторинг летучих органических соединений в воздухе — разработка стандартов ISO и критическая оценка методов. J. Environ. Monit., 2002,4, 112–118.
6. Е. С. Большаков, А. В. Иванов, А. В. Гармаш, А. С. Самохин, А. А. Козлов, Ю. А. Золотов. Комплексный подход к мониторингу летучих органических соединений сенсорными фотонно-кристаллическими матрицами. Журнал неорганической химии, 2021, Т. 66, № 2, стр. 220-228.
7. Ипатова В.С., Близнюк У.А., Борщеговская П.Ю., Болотник Т.А., Никитченко А.Д., Черняев А.П., Родин И.А. Мониторинг концентрации летучих органических соединений в мясе говядины после радиационной обработки ускоренными электронами. Заводская лаборатория. Диагностика материалов, Т 90, №3, 2024, с. 12-23.
8. Хамди, К.; Эбрант, М.; Мартин, П.; Галланд, Б.; Этьен, М. Мезопористая пленка из наночастиц кремния как сорбент для in situ и мониторинга в реальном времени летучих БТК (бензола, толуола и ксилолов). Sens. Actuators B Chem. 2016, 223, 904–913.
9. Каму С., Тамечика Э., Хориучи Т. // Портативный датчик для определения концентрации бензола в образцах воздуха/жидкостей с высокой точностью. Статьи: Технологии визуализации и датчиков для обеспечения безопасности. Т. 10, № 2, стр. 38–44, февраль 2012 г.
10. Ван Н., Цао Х., Хэ Р., Лю И., Хуан И. Датчик на основе каталюминесценции для обнаружения паров бензола, толуола и ксилола с использованием каталитического восстановления на поверхности наноразмерного Al2O3/Pt. Advanced Materials Research, том 663 (2013), стр. 335–342.
11. Инес К. Вебер, Паскаль Рюеди, Петр Шот, Андреас Т. Гюнтнер и Сотирис Э. Працинис. Портативный прибор для селективного определения бензола в толуоле и ксилоле. Adv. Sci. 2022, 9, 2103853.
12. Вишвакарма А.К., Шарма А.К., Верма А., Ядав Б.К., Ядава Л. Чувствительность толстых пленок CdS-TiO2 для обнаружения водорода. RSC Adv., 2024, 14, 38302.
13. Полуэктов П.П., Кащеев В.А., Устинов О.А. Мусатов Н.Д., Якунин С.А., Карлина О.К., Диордий М.Н. Энергия 2014, 116, 105.
14. Стейскал Ю., Сапурина И., Трхова М., Конюшенко Е.Н., Макромолекулы, 2008, 41, 3530.
15. Сапурина И., Стейскал Й., Полим. Они. 2008, 57, 1295.

16. Стейскал Дж. Полианилин. Чистое приложение. хим. 2002, 74, 8547.
17. Прокеш Й., Варга М., Кршивка И., Рудаева А., Стейскал Й. Й. Матер. хим. 2011, 21, 5038.
18. Уфлянд И.Е., Жинжило В.А., Кугабаева Г.Д., Кыдралиева К.А., Джардималиева Г.И., Синтез. Но. 2024, 307, 117709.
19. Насроллахзаде М., Бабаи Ф., Фахри П., Джале Б. RSC Adv. 2015, 5, 10782.
20. Донохью М., Аранович Г. Классификация изотерм адсорбции Гиббса. Достижения в области коллоидной и интерфейсной науки, 1998, 76. 137-152.
21. Ян Дж.-Х., Сунь Г., Гао Ю., Чжао Х., Тан П., Тан Дж., Лу А.-Х., Ма Д. Энергия окружающей среды. наук. 2013, 6, 793.
22. Сам Т., Гурло А., Берсан Н., Веймар У. Сенсорные приводы B: Chem. 2006, 118, 78.
23. Суэмацу К., Шин Ю., Ма Н., Ояма Т., Сасаки М., Юаса М., Кидаанд Т., Симаноэ К. Анал. хим. 2015, 87, 8407.
24. Ма З., Юань Т., Фань Ю., Ван Л., Дуань З., Ду В., Чжан Д., Сюй Дж. Sens. Actuators B: Chem. 2020, 311, 127365.
25. Вайшнав В.С., Патель С.Г., Панчал Дж.Н. Смысл. Приводы Б: Хим. 2015, 206, 381.

References

1. McMichael AJ. Carcinogenicity of benzene, toluene and xylene: epidemiological and experimental evidence. IARC Sci Publ. 1988;(85):3-18. PMID: 3053447.
2. D. Loomis, K. Z. Guyton, Y. Grosse, F. El Ghissassi, V. Bouvard, L. Benbrahim-Tallaa, N. Guha, N. Vilahur, H. Mattock, K. Straif. Carcinogenicity of benzene. Lancet Oncol. 2017, 18, 1574.
3. G. St Helen, E. Liakoni, N. Nardone, N. Addo, P. Jacob 3rd, N. L. Benowitz, Comparison of Systemic Exposure to Toxic and/or Carcinogenic Volatile Organic Compounds (VOC) during Vaping, Smoking, and Abstention. Cancer Prev. Res. 2020, 13, 153.
4. Qin R, Yuan Q, Yu J, Hu J, Zhang W, Wang Y, Cao Y, Ma Q, Li S, Li G, Wang D. WO_3/Ru@CeO_2 Bilayer Gas Sensor for ppb-Level Xylene Detection Based on a Catalytic-Sensitive Synergistic Mechanism. ACS Appl Mater Interfaces. 2025 Mar 19; 17(11):16920-16931.
5. Richard H. Brown. Monitoring volatile organic compounds in air—the development of ISO standards and a critical appraisal of the methods. J. Environ. Monit., 2002, 4, 112-118.
6. E. S. Bolshakov, A. V. Ivanov, A. V. Garmash, A. S. Samokhin, A. A. Kozlov, Yu. A. Zolotov. An integrated approach to monitoring volatile organic compounds using photonic crystal sensor arrays. Russian Journal of Inorganic Chemistry, 2021, Vol. 66, No. 2, pp. 220-228.
7. Ipatova V.S., Bliznyuk U.A., Borshchegovskaya P.Yu., Bolotnik T.A., Nikitchenko A.D., Chernyaev A.P., Rodin I.A. Monitoring the concentration of volatile organic compounds in beef after radiation treatment with accelerated electrons. Plant laboratory. Diagnostics of materials, T 90, No. 3, 2024, pp. 12-23.
8. Hamdi, K.; Hébrant, M.; Martin, P.; Galland, B.; Etienne, M. Mesoporous silica nanoparticle film as sorbent for in situ and real-time monitoring of volatile BTX (benzene, toluene and xylenes). Sens. Actuators B Chem. 2016, 223, 904–913.
9. Camou S., Tamechika E., Horiuchi T.// Portable.Sensor for Determining Benzene Concentration from Airborne/liquid Samples with High Accuracy. Feature Articles: Imaging and Sensing Technologies for Safety and Security. Vol. 10, No. 2, pp. 38–44, Feb. 2012.
10. Wang N., Cao X., He R, Liu Y., Huang Y. A Cataluminescence-based Sensor for Detecting Benzene, Toluene and Xylene Vapors Utilizing the Catalytic Reduction on the Surface of Nanosized Al_2O_3/Pt. Advanced Materials Research Vol 663 (2013) pp 335-342.
11. Ines C. Weber, Pascal Rüedi, Petr Šot, Andreas T. Güntner, and Sotiris E. Pratsinis. Handheld Device for Selective Benzene Sensing over Toluene and Xylene. Adv. Sci. 2022, 9, 2103853.
12. Vishwakarma A.K., Sharma A.K., Verma A., Yadav B. C., Yadava L. Sensing behavior of CdS-TiO_2 thick films for the detection of hydrocarbons. RSC Adv., 2024, 14, 38302.
13. Poluektov P.P., Kashcheev, V.A., Ustinov O.A. Musatov N.D., Yakunin S.A., Karlina O.K., Diordii M.N. At. Energy 2014, 116, 105.
14. Stejskal J., Sapurina I., Trchová M., Konyushenko E.N., Macromolecules, 2008, 41, 3530.
15. Sapurina I., Stejskal J., Polym. Int. 2008, 57, 1295.
16. Stejskal J., Polyaniline. Pure Appl. Chem. 2002, 74, 8547.
17. Prokeš J., Varga M., Křivka I., Rudajevová A., Stejskal J. J. Mater. Chem. 2011, 21, 5038.
18. Uflyand I.E., Zhinzhilo V.A., Kugabaeva G.D., Kydralieva K.A., Dzhardimalieva G.I., Synth. Met. 2024, 307, 117709.
19. Nasrollahzadeh M., Babaei F., Fakhri P., Jaleh B. RSC Adv. 2015, 5, 10782.

20. Donohue M., Aranovich G. Classification of Gibbs adsorption isotherms. Advances in Colloid and Interface Science, 1998, 76. 137-152.
21. Yang J.-H., Sun G., Gao Y., Zhao H., Tang P., Tan J., Lu A.-H., Ma D. Energy Environ. Sci. 2013, 6, 793.
22. Sahm T., Gurlo A., Bârsan N., Weimar U. Sens. Actuators B: Chem. 2006, 118, 78.
23. Suematsu K., Shin Y., Ma N., Oyama T., Sasaki M., Yuasa M., Kidaand T., Shimanoe K. Anal. Chem. 2015, 87, 8407.
24. Ma Z., Yuan T., Fan Y., Wang L., Duan Z., Du W., Zhang D., Xu J. Sens. Actuators B: Chem. 2020, 311, 127365.
25. Vaishnav V.S., Patel S.G., Panchal J.N. Sens. Actuators B: Chem. 2015, 206, 381.

Сведения об авторах

ФИО	*Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)*
Васильева Анастасия Денисовна	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования (ФГБОУ ВО) "Южный федеральный университет", студент, nussanussa@mail.ru ORCID 0009-0001-9854-0229
Зарубина Анастасия Олеговна	ФГБОУ ВО "Южный федеральный университет", ассистент, karginova@sfedu.ru SPIN-код 1224-3496 ORCID 0000-0001-9340-3252 Scopus Author ID 57201323155
Колесникова Татьяна Сергеевна	ФГБОУ ВО "Южный федеральный университет", старший преподаватель, shkip90@yandex.ru SPIN-код 6387-9400 ORCID 0000-0001-9652-2978 Researcher ID F-9723-2018 Scopus Author ID 55881956700
Уфлянд Игорь Ефимович	доктор химических наук, профессор, ФГБОУ ВО "Южный федеральный университет", заведующий кафедрой, ieuflyand@sfedu.ru ORCID 0000-0002-7164-8168 Researcher ID B-7664-2015 Scopus Author ID 6701372374

Authors information

Last name, first name, patronymic	*Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)*
Vasilyeva Anastasia Denisovna	Southern Federal University, student, nussanussa@mail.ru ORCID 0009-0001-9854-0229
Zarubina Anastasia Olegovna	Southern Federal University, assistant, karginova@sfedu.ru SPIN-code 1224-3496 ORCID 0000-0001-9340-3252 Scopus Author ID 57201323155
Kolesnikova Tatiana Sergeevna	Southern Federal University, senior lecturer, shkip90@yandex.ru SPIN-code 6387-9400 ORCID 0000-0001-9652-2978 Researcher ID F-9723-2018 Scopus Author ID 55881956700
Uflyand Igor Efimovich	Southern Federal University, Head of Department, ieuflyand@sfedu.ru ORCID 0000-0002-7164-8168 Researcher ID B-7664-2015 Scopus Author ID 6701372374

статья поступила в редакцию	одобрена после рецензирования	принята к публикации
05.11.2025	20.11.2025	01.12.2025

the article was submitted	approved after reviewing	accepted for publication
05.11.2025	20.11.2025	01.12.2025

Научная статья

УДК 547.979.8

ПОЛУЧЕНИЕ И ВЛИЯНИЕ ГИДРОЛИЗАТОВ ПРИРОДНЫХ ФЛАВОНОИДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Владимир Михайлович Болотов [1] za.bolotova@mail.ru
Елена Владимировна Комарова✉ [1] kev.vgta@yandex.ru
Павел Николаевич Саввин [1] pashkasavvin@yandex.ru
Любовь Николаевна Студеникина [1] lubov-churkina@ yandex.ru

[1]Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-кт Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. В работе изучены процессы ингибирования реакций окисления кислородом воздуха в полимерных материалах на примере нитрильного каучука СКН-2 и полистирола в присутствии гидрофобных флавоноид-агликонов, получаемых реакцией гидролиза флавоноидов растительного сырья.

Ключевые слова: полимерные материалы, антиоксиданты, флавоноиды.

Для цитирования: Болотов В. М., Комарова Е. В., Саввин П. Н., Студеникина Л. Н. Получение и влияние гидролизатов природных флавоноидных соединений на свойства полимерных материалов // Инженерные технологии. 2025. № 4 (12). С. 73-78.

Original article

OBTAINING AND INFLUENCING HYDROLYSATES OF NATURAL FLAVONOID COMPOUNDS ON THE PROPERTIES OF POLYMERIC MATERIALS

Vladimir M. Bolotov [1] za.bolotova@mail.ru
Elena V. Komarova ✉ [1] kev.vgta@yandex.ru
Pavel N. Savvin [1] pashkasavvin@yandex.ru
Lubov N. Studenikina [1] lubov-churkina@ yandex.ru

[1]Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue, 19, Voronezh, 394036, Russia

Abstract. The paper studies the processes of inhibition of atmospheric oxygen oxidation reactions in polymer materials using the example of SKN-2 nitrile rubber and polystyrene in the presence of hydrophobic flavonoid aglycones obtained by the hydrolysis of flavonoids from plant raw materials.

Keywords: polymer materials, antioxidants, flavonoids.

For citation: Bolotov V. M., Komarova E. V., Savvin P. N., Studenikina L. N. Obtaining and influencing hydrolysates of natural flavonoid compounds on the properties of polymeric materials. Ingenernye tehnologii = Engineering technologies. 2025; (4 (12)): 73-78. (In Russ.).

Введение

Одно из перспективных направлений совершенствования технологий производства полимеров связано с созданием новых видов биосовместимых полимерных материалов, применяемых в медицинской практике, включая изделия для диагностики и лечения заболеваний человека (например, катетеры и протезы). Полимеры, предназначенные для медицины, обязаны обладать полной безопасностью для человеческого организма и исключать наличие токсичных добавок.

Чтобы обеспечить устойчивость высокомолекулярных соединений к разрушению кислородом воздуха, используются различные типы антиоксидантов. Чаще всего применяются пространственно-затруднённые фенольные соединения, такие как ионол [1]. Однако их широкое использование ограничено токсичностью, что ставит перед исследователями задачу разработки альтернативных решений.

Исследования направлены на замену традиционных синтетических антиоксидантов на природные аналоги — флавоноиды растительного происхождения. Эти вещества представляют собой полифенолы, содержащие агликон — гидрофобный фрагмент, связанный с углеводным остатком посредством гликозидной связи. Присутствие углеводного компонента делает молекулу гидрофильной и повышает её растворимость в водных растворах [2].

Однако для успешного взаимодействия флавоноидов с гидрофобными материалами, такими как каучук, необходима модификация их структуры. Мы разработали методику увеличения гидрофобности природных флавоноидов путём удаления углеводного фрагмента с

© 2025. Болотов В. М. и др. / Bolotov V. M. et al.

помощью реакции гидролиза гликозидных связей [3]. Это позволяет повысить совместимость природных антиоксидантов с большинством известных полимеров, расширяя возможности их применения в медицинской промышленности [4, 5].

Материал и методы исследования

Целью проведенных исследований является изучение влияния введенных в состав полимеров (на примере нитрильного каучука и полистирола) выделенных гидрофобных гидролизатов природных флавоноидов на некоторые физико-химические свойства высокомолекулярных соединений и их антиоксидантную защиту в реакциях окисления под действием кислорода воздуха.

Флавоноидные соединения природного происхождения были получены методом экстракции из растительного материала. Для выделения флавоноидов использовался верхний слой покровных чешуек репчатого лука (*Allium cepa*) [6]. Экстракция антоциановых пигментов осуществлялась из сухих лепестков цветков суданской розы (каркадэ, *Hibiscus sabdariffa*) либо красных роз (*Rosa biferia*) [7].

Экстрагирование природных флавонолов проводили водой из расчета 200 мл на 5 г сухого сырья в трехгорлой колбе с обратным водяным холодильником при непрерывном перемешивании и нагревании раствора на водяной бане при температуре 70 – 80 ^{0}С до постоянного максимального содержания сухих веществ в составе экстракта.

Содержание сухих веществ в растворе определяли рефрактометрическим методом на рефрактометре ИРФ-45452М (ЛОМО, Россия) по стандартной методике [8].

Экстрагирование антоцианов проводили по аналогичной методике с использованием в качестве экстрагента 2М раствора соляной кислоты.

Концентрирование экстрактов натуральных флавоноидов производилось путем двукратного уменьшения объема за счёт отгонки воды под вакуумом.

Далее проводилась реакция гидролиза полученных флавоноидов. Концентрат экстракта обрабатывали небольшим количеством концентрированной ортофосфорной кислоты, служившей катализатором процесса. Реакция протекала при температуре 70∘С70∘С в трёхгорлой колбе с обратным холодильником и постоянным перемешиванием. Процесс завершался образованием устойчивого минимума сухого остатка вследствие осаждения гидролизованных форм флавоноидов.

Образовавшиеся агликоны отделялись фильтрованием и сушились при комнатной температуре или в вакууме.

Влияние обработанных гидрофобных флавоноидов на процессы окисления полимеров изучалось на примере бутадиен-нитрильного каучука марки СКН-26 и полистирола. Исследовалось поведение полимеров под воздействием нагрева и ультрафиолетового излучения.

Растворы гидрофобных флавоноидов в метилэтилкетоне смешивали с аналогичными растворами каучука и полистирола в чашках Петри с учетом конечного содержания добавок в высушенном полимере 2 %. Удаление растворителя из растворов полимеров проводили в вытяжном шкафу при комнатной температуре в условиях рассеянного освещения с контролем степени испарения весовым методом.

Изготовленные полимерные пленки, как с добавлением флавоноидов, так и без них, были нарезаны на полосы. Затем одна часть образцов прошла тепловую обработку в воздушной среде при температуре 105∘С105∘С в течение 56 часов в присутствии кислорода.

Другую группу образцов каучука подвергли ультрафиолетовому излучению лампой RU919 (мощность 9 Вт, длина волны 365 нм) также в атмосфере кислорода в течение аналогичных 56 часов. Образцы полистирола подверглись окислению в течение меньшего срока — 10 часов.

Для анализа изменений прочностных характеристик каучука до и после термического и оксидативного воздействия из предварительно изготовленных плёнок вырезали тестовые образцы стандартной формы ("лопатки"). Их испытание проводилось согласно стандарту ГОСТ 11262–2017 на специализированной разрывной установке ПМ-50 фирмы "Машпласт" (Москва), оснащенной программой автоматизированного тестирования "Stretch Test".

Полистирольные образцы, содержащие флавоноиды и контрольные без добавок, после завершения этапа фотоокисления были растворены в толуоле. Оптическая плотность полученных растворов измерялась на фотоэлектрокалориметре в диапазоне длин волн от 300 до 540 нм.

Для оценки степени накопления карбонильных групп в полистироле рассчитывалось соотношение значений поглощения при длине волны 300 нм (характерная полоса карбонилов) и при 350, 440, 490 и 540 нм (полосы поглощения остатков молекул полистирола и флавоноидов). Такой подход позволил минимизировать

погрешности, обусловленные разницей в концентрации растворенных компонентов.

Результаты исследования и их обсуждение

Агликоны флавоноидов характеризуются формой мелкодисперсного порошка, имеющего оттенки от шоколадно-коричневого (у антоцианов) до тёмно-коричневого (у флавонолов). Они практически не растворяются в водной среде, однако демонстрируют хорошую растворимость в низкоатомных спиртах (таких как этанол и пропанол), а также в кетонах, таких как ацетон и метилэтилкетон. Вместе с тем, наблюдается низкая растворимость агликонов в сложных эфирах (например, этил- и бутилацетате) и прочих малополярных растворителях.

Растворение агликонов флавониодов в органическом растворителе с дальнейшим смешением полученных растворовс растворами таких полимерных материалов, как нитрильный каучук СКН-26 и полистирол с последующим удалением растворителя позволило получить полимерные материалы в виде пленки с равномерно распределенными в ней флавоноидными соединениями.

Представленные в таблице 1 экспериментальные данные показывают, что под влиянием кислорода воздуха при температуре более 100 ^{0}С упруго-прочностные показатели нитрильного каучука уменьшаются на 12 % (с 0,43 до 0,38 МПа), а ведение в состав каучука антоциан-агликона повышают этот показатель на 4,6 % (с 0, 43 до 0, 45 МПа), введение флавонол-агликона – увеличивает на 18,6 % (с 0, 43 до 0,51 МПа).

Таблица 1. Влияние природных антиоксидантов на когезионные упруго-прочностные показатели каучука СКН-26 до и после термоокислительных процессов

Table 1. The influence of natural antioxidants on the cohesive elastic strength properties of SKN-26 rubber before and after thermal-oxidative processes

N п/п	Наименование образцов и условия окисления / Name of samples and oxidation conditions	Когезионная прочность при разрыве, Мпа / Cohesive tensile strength, MPa	Относительное удлинение при разрыве, % / Relative elongation at break, %
1	Исходный каучук без окисления	0,43	788
2	Исходный каучук после термоокисления	0,38	842
3	Каучук с добавкой антоциан-агликона без термоокисления	0,45	595
4	Каучук с добавкой антоциан-агликона после термоокисления	0,44	852
5	Каучук с добавкой флавонол-агликона без термоокисления	0,44	774
6	Каучук с добавкой флавонол-агликона после термоокисления	0,51	849

Представленные в таблице 2 результаты измерений упруго-прочностных показателей нитрильного каучука после окисления кислородом воздуха в присутствии длительного (56 часов) УФ-облучения показывают протекающие химические реакции в структуре макромолекул полимера, вызывающих увеличение упруго-прочностных показателей на 35 % (с 0,37 до 0,50 МПа).

Введение в состав каучука антоциан-агликона способствует увеличению упруго-прочностных свойств на 32, 4 % (с 0,37 до 0, 49 МПа), а введение флавонол-агликона увеличивает эти свойства на 45,9 % (с 0,37 до 0, 54 МПа).

Представленные в таблице 3 результаты ингибирования окислительных процесов при окислении полистирола кислородом воздуха в присутствии УФ-облучения показывает возможность применения этих соединений в качестве фотостабилизаторов.

Большая активность флавонол-агликона по сравнению с антоциан-агликоном в окислительных процессах обусловлена повышенными восстановительными свойствами флавонолов по отношению к антоцианам из-за особенностей строения молекул.

Таблица 2. Влияние природных антиоксидантов на когезионные упруго-прочностные показатели каучука СКН-26 до и после фотоокислительных процессов

Table 2. The influence of natural antioxidants on the cohesive elastic strength properties of SKN-26 rubber before and after photooxidation processes

N п/п	Наименование образцов и условия окисления / Name of samples and oxidation conditions	Когезионная прочность при разрыве, Мпа / Cohesive tensile strength, MPa	Относительное удлинение при разрыве, % / Relative elongation at break, %
1	Исходный каучук без окисления	0,37	783
2	Исходный каучук после УФ-облучения	0,50	809
3	Каучук с добавкой антоциан-агликона без УФ-облучения	0,31	693
4	Каучук с добавкой антоциан-агликона после УФ-облучения	0,49	1240
5	Каучук с добавкой флавонол-агликона без УФ-облучения	0,50	852
6	Каучук с добавкой флавонол-агликона после УФ-облучения	0,54	1310

Таблица 3. Антиоксидантные свойства гидрофобных агликонов из растительного сырья

Table 3. Antioxidant properties of hydrophobic aglycones from plant materials

Наименование добавки/ Additive name	Интенсивность накопления карбонильной группы в пленке полистирола после фотоокисления ($A_{300нм}/A_{350\ нм}$) / The intensity of accumulation of carbonyl group in polystyrene film after photooxidation (A300 nm/A350 nm)		Эффект стабилизации/ Stabilization effect
	без добавки / without additives	с добавкой / with additives	
Флавонол-агликон	2,95/1,75 = 1,69	2,90/2,80 = 1,04	1,69/1,04 = 1,60
Антоциан-агликон	2,14/0,67 = 3,19	1,86/0,84 = 2,21	3,19/2,21 = 1,40

Выводы

Таким образом, представленные исследования показывают, что введение в состав неполярных высокомолекулярных соединений – гидрофобных флавонол-агликонов, получаемых реакцией гидролиза флавоноидов растительного сырья, способствует ингибированию радикальных окислительных процессов под действием кислорода воздуха в полимерных материалах, что позволяет увеличить срок службы полимерных изделий.

Литература

1. Ершов В.В., Никифоров Г.А., Володькин А.А. Пространственно-затрудненные фенолы. - Москва: Химия, 1972. – 352 с.

2. Корулькин Д.Ю., Абиллов Ж.А., Музыкина Р.А., Толстиков Г.А. Природные флавоноиды. – Новосибирск: Академическое изд-во «Тео», 2007. – 232 с.

3. Пат. 2733411 РФ. Способ получения гидрофобных флавоноидных и антоциановых соединений из флавоноидсодержащего растительного сырья / В.М. Болотов, Е.В.Комарова, П.Н. Саввин (Россия) // БИ 2020. № 28. – 6 с.

4. Рубцов М.В., Болотов В.М., Седых В.А., Студеникина Л.Н. Антиоксидантные свойства флавонолсодержащих каучуков. В книге: Материалы LXII отчетной научной конференции преподавателей и научных сотрудников ВГУИТ за 2023 год. Материалы LXII отчетной научной конференции преподавателей и научных сотрудников ВГУИТ за 2023 год В 3 частях. Воронеж, 2024. С. 124.

5. Болотов В.М., Рубцов М.В., Седых В.А., Студеникина Л.Н., Саввин П.Н., Комарова Е.В. Применение модифицированных флавоноидов в качестве антиоксидантов каучуков. В сборнике: Технология органических веществ. Материалы 88-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием). Минск, 2024. С. 127-129.

6. Онищенко Ю.В., Чередникова Я.А., Болотов В.М. Технология получения и применение модифицированных флавоноидов растительного сырья. В сборнике: Материалы студенческой научной конференции за 2024 год. Воронеж, 2024. С. 279.

7. Голикова К.Е., Болотов В.М. Технология получения и свойства алкилфлавоноидов из природых соединений В сборнике: Материалы студенческой научной конференции за 2024 год. Воронеж, 2024. С. 266-267.

8. Рачинский Ф.Ю., Рачинская М.ф. Техника лабораторных работ.- Ленинград: Химия, 1982.- 432 с.

References

1. Ershov V.V., Nikiforov G.A., Volodkin A.A. Structural hindered phenols. - Moscow: Chemistry, 1972. - 352 p.

2. Korulkin D.Yu., Abillov Zh.A., Muzykina R.A., Tolstikov G.A. Natural flavonoids. - Novosibirsk: Academic Publishing House "Teo", 2007. - 232 p.

3. Patent. 2733411 RF. Method for obtaining hydrophobic flavonoid and anthocyanin compounds from flavonoid-containing plant materials / V.M. Bolotov, E.V. Komarova, P.N. Savvin (Russia) // BI 2020,. No. 28. - 6 p.

4. Rubtsov M.V., Bolotov V.M., Sedykh V.A., Studenikina L.N. Antioxidant properties of flavonol-containing rubbers. In: Proceedings of the LXII reporting scientific conference of VSUET faculty and research staff for 2023. Proceedings of the LXII reporting scientific conference of VSUET faculty and research staff for 2023. In 3 parts. Voronezh, 2024. P. 124.

5. Bolotov V.M., Rubtsov M.V., Sedykh V.A., Studenikina L.N., Savvin P.N., Komarova E.V. Use of modified flavonoids as antioxidants in rubbers. In: Technology of Organic Substances. Proceedings of the 88th scientific and technical conference of faculty, research staff, and postgraduate students (with international participation). Minsk, 2024. pp. 127-129.

6. Onishchenko Yu.V., Cherednikova Ya.A., Bolotov V.M. Technology for the Production and Application of Modified Flavonoids from Plant Raw Materials. In: Proceedings of the Student Scientific Conference for 2024. Voronezh, 2024. p. 279.

7. Golikova K.E., Bolotov V.M. Technology for the Production and Properties of Alkylflavonoids from Natural Compounds In: Proceedings of the Student Scientific Conference for 2024. Voronezh, 2024. pp. 266-267.

8. Rachinsky F.Yu., Rachinskaya M.F. Laboratory work technique. - Leningrad: Chemistry, 1982. - 432 p.

Сведения об авторах

ФИО	*Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)*
Болотов Владимир Михайлович	доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», профессор кафедры Технологии органических соединений и переработки полимеров, za.bolotova@mail.ru SPIN-код 9943-8965
Комарова Елена Владимировна	кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», доцент кафедры Технологии органических соединений и переработки полимеров, Kev.vgta@yandex.ru SPIN-код 2502-0325
Саввин Павел Николаевич	кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», доцент кафедры Технологии органических соединений и переработки полимеров, pashkasavvin@yandex.ru SPIN-код 6003-1023
Студеникина Любовь Николаевна	кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», доцент кафедры Промышленной экологии и техносферной безопасности, Lubov-churkina@yandex.ru SPIN-код 5506-1066 ORCID 0000-0001-6613-4974 Researcher ID AAB-4789-2020 Scopus Autor ID 57207914255

Authors information

Last name, first name, patronymic	*Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)*
Bolotov Vladimir Mikhailovich	DSc, professor, Voronezh state university of engineering technologies, professor of the department of Technology of organic compounds and polymer processing, za.bolotova@mail.ru SPIN-code 9943-8965
Komarova Elena Vladimirovna	PhD, associate professor, Voronezh state university of engineering technologies, associate professor of the department of Technology of organic compounds and polymer processing, Kev.vgta@yandex.ru SPIN-code 2502-0325
Savvin Pavel Nikolaevich	PhD, associate professor, Voronezh state university of engineering technologies, associate professor of the department of Technology of organic compounds and polymer processing, pashkasavvin@yandex.ru SPIN-code 6003-1023
Studenikina Lyubov Nikolaevna	PhD, associate professor, Voronezh state university of engineering technologies, associate professor of the department of Industrial ecology and technosphere safety, Lubov-churkina@yandex.ru SPIN-code 5506-1066 ORCID 0000-0001-6613-4974 Researcher ID AAB-4789-2020 Scopus Autor ID 57207914255

статья поступила в редакцию	одобрена после рецензирования	принята к публикации
02.06.2025	13.06.2025	24.06.2025

the article was submitted	approved after reviewing	accepted for publication
02.06.2025	13.06.2025	24.06.2025

Научная статья

УДК 543.544:581.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ 1,1-ДИМЕТИЛГИДРАЗИНА В РАСТИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТАХ

Наталья Владимировна Маслова ✉ [1] maslovanatvl@mail.ru
Алексей Сергеевич Сатуров [2] alex7704@mail.ru
Павел Тихонович Суханов [3] pavel.suhanov@mail.ru

[1]Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко, 10, ул. Студенческая, Воронеж, 394036, Россия
[2]Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, 8, ул Тимирязева, Воронеж, 394087, Россия
[3]Воронежский государственный университет инженерных технологий, 19, пр-кт Революции, Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Статья посвящена разработке спектрофотометрического метода определения массовой концентрации 1,1-диметилгидразина в растительных объектах для санитарно-экологического мониторинга в зонах риска загрязнения ракетным топливом. НДМГ относится к веществам I класса опасности, с ПДК в воздухе, воде и почве, но без установленной ПДК для растений. Стабильность предложенного способа определения подтверждена картами Шухарта для повторяемости, внутрилабораторной прецизионности и погрешности.

Ключевые слова: 1,1- диметилгидразин, растительные объекты, спектрофотометрия, карты Шухарта, экологический мониторинг.

Для цитирования: Маслова Н. В., Сатуров А. С., Суханов П. Т. Определение массовой концентрации 1,1-диметилгидразина в растительных объектах // Инженерные технологии. 2025. № 4 (12). С. 79-86.

Original article

DETERMINATION THE MASS CONCENTRATION OF 1,1-DIMETHYLHYDRAZINE IN PLANT OBJECTS

Nataliya V. Maslova ✉ [1] maslovanatvl@mail.ru
Aleksey S. Saturov [2] alex7704@mail.ru
Pavel T. Sukhanov [3] pavel.suhanov@mail.ru

[1] Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko, 10, Studencheckaya St., Voronezh, 394036, Russia
[2]Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva St., Voronezh, 394087, Russia
[3]Voronezh State University of Engineering Technologies, 19, Revolutsii Avenue, Voronezh, 394036, Russia

Abstract. The article is devoted to the development of a spectropohotometric method for determining the mass concentration of 1,1 – dimethylhydrazine in plant objects for sanitary and environmental monitoring in areas at risk of contamination with rocket fuel. UDMH belongs to substances of hazard class I, with MPC in air, water and soil, but without an established MPC for plants/ The stability of the proposed determination method is confirmed by Shewhart charts for repeatability, intralaboratory precision. and error.

Keywords: 1,1 – dimethylhydrazine, plant objects, spectropohotometry, Shewhart charts, environmental monitoring.

For citation: Maslova N. V., Saturov A. S., Sukhanov P. T. Determination the mass concentration of 1,1-dimethylhydrazine in plant objects. Ingenernye tehnologii = Engineering technologies. 2025; (4 (12)): 79-86. (In Russ.).

Введение

Несимметричный диметилгидразин (1,1 – диметилгидразин, гептил, НДМГ) относится к высокотоксичным веществам I класса опасности. Предельно допустимая концентрация (ПДК) для этого соединения установлена на уровне 0,1 мг/м^3 для воздуха рабочей зоны, 0,001 мг/м^3 для атмосферного воздуха и 0,02 мг/л для воды, используемой в бытовых целях [1]. Для почвы и растительности ПДК не определена, однако существует ориентировочно безопасный уровень (ОБУВ), который для почв составляет 0,1 мг/кг [2].

Гептил применяется в составе ракетных топлив благодаря своим энергетическим характеристикам и эксплуатационным качествам. В связи с этим его производство и применение будет продолжаться. Основной риск попадания гептила в объекты окружающей среды обусловлен утечками топлива в местах испытаний, запусков ракет и утилизации отработанных ступеней [3]. В связи с тем, что применяемые методики рутинного определения гептила в объектах окружающей среды (в частности в растительных образцах) экономически нецелесообразны и сложны в исполнении, актуальна разработка

© 2025. Маслова Н. В. и др. / Maslova N. V. et al.

доступных способов определения НДМГ в растительных образцах.

Полярная природа НДМГ затрудняет его выделение из растительных материалов и водных сред.

Известны способы определения НДМГ, включающие предварительную дериватизацию, позволяющую достичь низких пределов обнаружения [4]. НДМГ и продуктов его разложения в водных матрицах [5] определяют методом ион-парной хроматографии [6].

МУК 4.1.027-14 подробно описана фотометрическая методика определения НДМГ в пробах растений, обеспечивающая высокую селективность и точность результатов анализа [7]. Из-за сложности пробоподготовки и разделения компонентов проведения анализа методика применяется преимущественно в научных исследованиях.

Цель работы – разработка способа определения НДМГ в растительных объектах, которую можно применять для санитарно-экологического мониторинга в зонах риска.

Материал и методы исследования

НДМГ определяли фотометрически (спектрофотометр UNICO 1201 WP 0701019, «United Products»). Растворы готовили с применением весов электронных Exploper Pro, СНПВ 210 («OHAUS Europe).

В работе использовали 1,1-диметилгидразин (Государственный стандартный образец состава раствора 1,1-диметилгидразина в серной кислоте, ГСО № 8838-2006, ААА «Экоаналитика», Москва, погрешность ±5%), *пара*-нитробензальдегид (4-Nitrobenzaldehyde,99%, molecular weight $C_7H_5NO_3$, ACROS ORGANICS, CHINA), уксусная кислота (х.ч.), гидроксид натрия (х.ч.), гидроксид калия (х.ч.), хлороформ (ч.д.а.). Реактивы использовались без предварительной очистки.

Исходные растворы 1,1-диметилгидразина (1 мг/мл) и *пара*-нитробензальдегида (0,6 %) готовили растворением навесок препарата соответственно в воде и этаноле. Рабочие растворы с меньшей концентрацией получали разбавлением исходных растворов.

Отбор проб листьев с деревьев и кустарников осуществляли методом конверта, при котором на каждой выбранной площадке выбирали пять точечных проб равной массы. Пробы объединяли в одну общую. Масса свежеотобранной объединенной пробы, предназначенной для анализа, должна составлять не менее 350 г.

Для определения 1,1-диметилгидразина листья с деревьев или кустарников собирали с четырех сторон растения и объединяли в единую пробу так, чтобы общая площадь листьев составляла 0,5 м^2. Затем проводили смыв аналита с поверхности листьев дистиллированной водой. Полученный раствор осветляли, добавляя по 1 мл 1 % мас. раствора гидроксида калия и 1 % мас. раствора сульфата цинка. Образовавшийся осадок отделяли фильтрование через бумажный фильтр с размером пор 1,0-2,5 нм [8, 9].

Определение 1,1-диметилгидразина в фильтрате проводили спектрофотометрически [9] по реакции *п*-нитробензальдегида в щелоченном растворе этанола. При этом образуется комплекс желтого цвета. Оптическую плотность полученных растворов измеряли относительно раствора сравнения, не содержащего определяемый ингредиент. Концентрацию вещества устанавливали методом градуировочного графика, построенному по стандартным растворам аналита. Градуировочная зависимость линейна и описывается уравнением (R^2 = 0,9800):

$$A = 0{,}7652\ c - 0{,}0026,$$

где с – концентрация 1,1-диметилгидразина, мг/дм.

Выполнение анализа. Из полученного смыва отбирают 50 см^3 раствора для анализа, переносят в колбу для дистилляции, добавляют 10 см^3 гидроксида натрия и отгоняют 50 см^3 пробы в мерный цилиндр содержащий 5 см^3 уксусной кислоты. Полученный дистиллят переливают в колбу вместимостью 200 см^3, добавляют 1 см^3 гидроксида калия, 5 см^3 спиртового раствора *п*-нитробензальдегида, закрывают колбу пробкой и нагревают 15 минут на водяной бане при 70-75°С.

После охлаждения до комнатной температуры в колбу вливают 10 см^3 хлороформа, тщательно встряхивают в течение 2 минут и переносят в делительную воронку. После разделения фаз нижний хлороформенный слой помещают в сухую пробирку.

Оптическую плотность органического фазы измеряют при толщине кюветы 20 мм и длине волны 400 нм.

Рассчитывают концентрацию компонента в пробе (С, мг/м^2) по уравнению (1) [10].

Массовую концентрацию 1,1-диметилгидразина (мг/м^2) в растительном материале рассчитывают по уравнению:

$$C = \frac{c \cdot V}{1000 \cdot S} \quad (1)$$

где с – результат измерения концентрации определяемого вещества в смыве с пробы растительности, устанавливаемый по градуировочному графику; мг/дм^3; S – площадь, занимаемая пробой растений для анализа (0,5 м^2); V – объем смыва с пробы растений, см^3.

Для обеспечения достоверности результатов определения рассчитывали стандартную расширенную неопределенность способа, которая характеризует диапазон возможных значений результата измерения, и позволяет оценить степень доверия к полученной концентрации вещества. Также, учет неопределенности обеспечивает сопоставимость результатов между лабораториями и методиками [11].

Исходными данными для расчета стандартной неопределенности измерения входной величины X_i типа А являются результаты ее многократных измерений x_i, при этом стандартная неопределенность входной величины x_i рассчитывается по формуле (2) [12, 13]:

$$u_A(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n_i(n_i-1)}\sum_{q=1}^{n_i}(x_{iq}-\bar{x}_i)^2}, \quad (2)$$

где $\bar{x}_i$ - среднее арифметическое результатов измерений i-й входной величины;

n_i - число измерений входной величины X_i.

Стандартную неопределенность измерения входной величины, вычисляемую по типу В, определяют по формуле (3):

$$u_B(x_i) = \frac{b_B - b_H}{2\sqrt{3}}, \quad (3)$$

где b_B и b_H соответственно верхняя и нижняя границы неопределенности для входной величины x_i.

Информацию о значениях b_B и b_H получают из результатов предшествующих измерений, опытным путем из данных о характеристиках применяемых технических средств (средств измерений, испытательного оборудования или стандартных образцов), из данных, приводимых в свидетельствах о поверке или сертификатах калибровки применяемых средств измерений, протоколов аттестации испытательного оборудования, паспортов стандартных образцов и др.

Суммарная стандартная неопределенность измерения рассчитывается по формуле (4):

$$U_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{m}\left(\partial f / \partial x_i\right)^2 U^2(x_i)}, \quad (4)$$

где $\partial f / \partial x_i$ - частная производная функции ***f(y)*** по x_i;

$U(x_i)$ - стандартная неопределенность i-й входной величины, оцениваемой по типу А или типу В.

Если при измерениях имеются достаточно достоверные данные о корреляции оценок входных величин X_i (i=1, m), то суммарная стандартная неопределенность измерения показателя, оцениваемого при испытаниях образца, оценивается по формуле (5):

$$U_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m}\frac{\partial f}{\partial x_i}\frac{\partial f}{\partial x_j}U(x_i,x_j)}, \quad (5)$$

где x_i, x_j являются оценками соответственно X_i и X_j; $U(x_i,x_j)=U(x_j,x_i)$ - оценка ковариации x_i и x_j.

Расширенная неопределенность измерений ***U,*** оцениваемого объекта, рассчитывается по формуле (6):

$$U = k\,U_c(y), \quad (6)$$

где k - коэффициент охвата (значение коэффициента охвата k выбирают на основе уровня доверия, требуемого для интервала от y-U до y+U) [14], $k = 2$ при P = 95%, а значение $k = 3$ - интервалу с уровнем доверия (P), близким к 99%.

Результат измерения рекомендуется представлять в виде (7):

$$Y = y \pm U. \quad (7)$$

Результаты исследования и их обсуждение

При проведении внедрения способа измерений в лаборатории рассчитана неопределенность при определении массовой концентрации 1,1-диметилгидразина в растительных объектах, которая составила U ± 8 % , тогда результат определенной массовой концентрации НДМГ в растворе составляет с учетом расширенной неопределенности 0,0200± 0,0016 мг/ м^2.

Для отслеживания стабильности процесса, контроля воспроизводимости и точности результатов анализа и выявления источников вариабельности (нестабильность реагентов или градуировки) построены карты Шухарта [15]. Для построения контрольных карт использовали полученные результаты контроля повторяемости. На карту наносили среднюю линию (CL), которая соответствует рассчитанному значению контролируемой характеристики (8):

$$CL = d_2 \cdot \sigma_r, \quad (8)$$

где d_2 - коэффициент средней линии, для n = 2, составляет 1,128 [13], σ_r – показатель повторяемости для стадии анализа отобранных проб, % (σ_r = 4).

Расчет предела предупреждения (UCL) и предела действия (LCL) выполняют по формулам (9 и 10) соответственно:

$$UCL = D_1 \cdot \sigma_r, \quad (9)$$

$$LCL = D_2 \cdot \sigma_r, \quad (10)$$

где D_1 и D_2 – коэффициенты двух параллельных измерений. Для предела предупреждения D_1 = 2,834, для предела действия D_2 = 3,686.

Расчетные значения средней линии, пределов предупреждения и пределов действия приведены в таблице 1. На рисунках 1 – 3 представлены контрольные карты Шухарта, которые построены при апробации способа определения массовой концентрации 1,1 – диметилгидразина в растительных объектах.

Таблица 1. Значения средней лини, предела предупреждения и предела действия для построения карт Шухарта

Table 1. Values of the averagt line, warning limit, and action limit for constructing Schuhart maps

Рассчитанные метрологические характеристики	σ_r = 0,004	σ_R = 0,04	Δ = 0,002
ККШ	повторяемость	внутрилабораторная прецизионность	контроль погрешности
CL	0,004	0,005	0
UCL	0,010	0,012	0,010
LCL	0,014	0,015	0,020

Карта повторяемости (рисунок 1) показывает расхождения результатов параллельных определений во времени. Все результаты определений (30 точек) расположены ниже предела предупреждения (0,014), что соответствует отсутствию явных сигналов нестабильности процессов. Большинство точек находятся ниже предела предупреждения (0,008), за исключением нескольких (точки 7, 10, 14, 20), которые близки к этому уровню, но не превышают его. Можно считать процесс стабильным в рамках заданных границ.

Карта стабильности внутрилабораторной прецизионности (рисунок 2) показывает, что процесс стабилен: все точки расположены ниже предела предупреждения (0,005) и предела действия(0,010). Сигналы для корректировки отсутствуют.

Карта стабильности показателя точности (рисунок 3) показывает, что отсутствуют сигналы нестабильности по правилам Шухарта. Сигналов о необходимости корректировки нет. Разработанный способ определения НДМГ рекомендуется к применению в лабораториях.

Рисунок 1. Контрольная карта Шухарта стабильности показателя повторяемости для НДМГ в растительности

Figure 1. Schuhart control map of the stability of the repeatability index for NDMG in vegetation

Рисунок 2. Контрольная карта Шухарта стабильности показателя внутрилабораторной прецизионности для НДМГ в растительности

Figure 2. Schuhart control map of the stability of the intralaboratory precision index for NDMG in vegetation

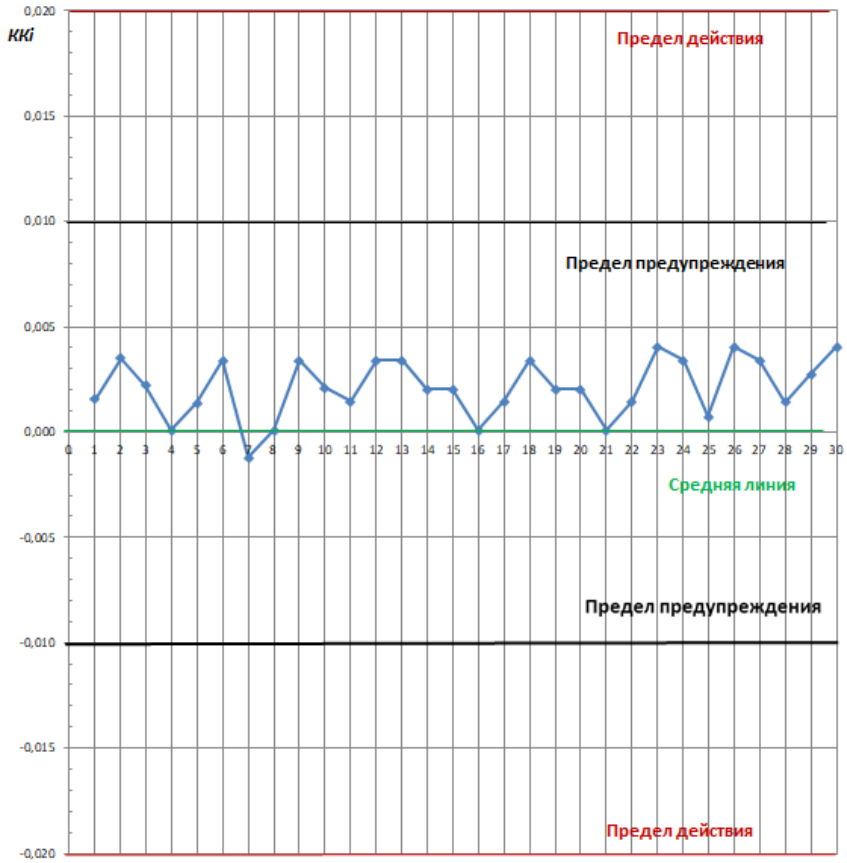


Рисунок 3. Контрольная карта Шухарта стабильности показателя точности для НДМГ в растительности

Figure 3. Schuhart control map of the stability of the accuracy index for NDMG in vegetation

Выводы

Разработанный способ спектрофотометрического определения массовой концентрации 1,1-диметилгидразина в растительных объектах с использованием дериватизации n-нитробензальдегидом обеспечивает предел обнаружения (0,01 мг/м^2 при А=0,005) и расширенную неопределенность ±8%, что обеспечивает его пригодность для санитарно-экологического контроля.

Процесс отбора проб и анализа демонстрирует стабильность, подтвержденную картами Шухарта: отсутствие сигналов нестабильности по повторяемости, внутрилабораторной прецизионности и точности.

Разработанный способ определения 1,1-диметилгидразина превосходит прототип (МУК 4.1.027-14) по простоте и стоимости, рекомендуется для внедрения в лабораториях, которые проводят мониторинг загрязнений растительности ракетным топливом.

Литература

1. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – Введ. 01.03.2021. - 493 с.

2. ГОСТ 12.1.007-76 Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. – Введ. 01.01.77. – 7 с.

3. Экологическая безопасность ракетно-космической деятельности / Под ред. Н.С. Касимова.- М.: Спутник, 2015. - 280 с

4. Тимченко, Ю.В. Определение 1,1-диметилгидразина методом обращенно-фазовой высокоэффективной жидкостной хроматографии со спектрофотометрическим детектированием в виде производного с 4-нитробензальдегидом / Ю.В. Тимченко, И.В. Беликова, А.Д. Смоленков, А.В. Пирогов, О.А. Шпигун // Журн. аналит. химии. - 2004. - V.59. №5. - С. 511-515.

5. Понамаренко, А. С. Определение 1,1 – диметилгидразина и продуктов его разложения методом ион-парной хроматографии/ С.А. Понамаренко, А.Д., Смоленков, О.А. Шпигун// Вестник Моск ун-та, сер . 2 Химия. - 2009. - Т. 50, № 3. - С. 185 – 192

6. Тимченко, Ю.В. Одновременное определение гидразина, метилгидразина и 1,1-диметилгидразина в водах методом ВЭЖХ со спектрофотометрическим детектированием с применением катализа для получения производных / Ю.В. Тимченко, А.В. Апенкина, А.Д. Смоленков, А.В. Пирогов, О.А. Шпигун // Журнал аналитической химии. - 2021. - Т. 76, № 10. - С. 927-936.

7. МУК 4.1.027-14 Методика измерений массовой доли 1,1-диметилгидразина в пробах растений фотометрическим методом. – ФМБА, Москва, 2014. – 32 с

8. Методическое пособие по организации и порядку отбора проб объектов производственной и природной среды для проведения анализа компонентов ракетного топлива и продуктов его деструкции. – М.: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна. - 2014. - 158 с

9. Маслова, Н.В. Роль растительности в инфраструктуре города/ Н.В. Маслова, В.В. Ивченко, А.С. Сатуров// В сборнике: Журналистика и география. Сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. - Воронеж, 2024. - С. 65-68.

10. Патент РФ №RU 2758197 C1, 26.10.2021 // Описание изобретения к патенту // Маслова Наталья Владимировна, Суханов Павел Тихонович, Кушнир Алексей Алексеевич [и др].

11 ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 "Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий" , ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 "Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения" – Введ. 01.07.2023. – 68 с.

12. Сатуров А.С. Квалиметрический подход и статистические методы в управлении качеством атмосферного воздуха /А.С. Сатуров, Н.В. Маслова, Н.Н. Попова // В сборнике: Актуальные проблемы менеджмента качества, стандартизации и метрологии. Сборник докладов X Всероссийской научно-практической Интернет-конференции. – Белгород, 2025. – С. 280-284.

13. ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 "Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения" - Введ. 14.07.2017. – 68 с.

14. РМГ 76 Внутренний контроль качества результатов количественного химического анализа. - Введ. 25.06.2014. – 111 с.

15. ГОСТ ИСО 5725-6 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. – Введ. 23.04.2002. – 42 с.

References

1. SanPiN 1.2.3685-21 Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of human habitat factors. – Introduced. 01.03.2021. - 493 p.

2. GOST 12.1.007-76 Occupational Safety Standards. Harmful Substances. Classification and General Safety Requirements. – Introduced. 01.01.77. – 7 p.

3. Environmental Safety of Rocket and Space Activities / Ed. by N.S. Kasimov. - M.: Sputnik, 2015. - 280 p.

4. Timchenko, Yu.V. Determination of 1,1-dimethylhydrazine by reverse-phase high-performance liquid chromatography with spectrophotometric detection as a derivative with 4-nitrobenzaldehyde / Yu.V. Timchenko, I.V. Belikova, A.D. Smolenkov, A.V. Pirogov, O.A. Shpigun // Journal. the analyte. chemistry. - 2004. - V.59. No.5. - P. 511-515.

5. Ponamarenko, A. S. Determination of 1,1-Dimethylhydrazine and its decomposition products by ion-pair chromatography/ S.A. Ponamarenko, A.D., Smolenkov, O.A. Shpigun// Bulletin of Moscow University, Ser. 2 Chemistry. - 2009. - Vol. 50, No. 3. - Pp. 185 - 192

6. Timchenko, Yu.V. Simultaneous Determination of Hydrazine, Methylhydrazine, and 1,1-Dimethylhydrazine in Waters by HPLC with Spectrophotometric Detection Using Catalysis for Derivative Formation / Yu.V. Timchenko, A.V. Apenkina, A.D. Smolenkov, A.V. Pirogov, and O.A. Shpigun // Journal of Analytical Chemistry. - 2021. - V. 76, No. 10. - P. 927-936.

7. MUK 4.1.027-14 Method for measuring the mass fraction of 1,1-dimethylhydrazine in plant samples using the photometric method. – FMBA, Moscow, 2014. – 32 p.

8. Guidelines for the organization and procedure for sampling industrial and natural environment objects for the analysis of rocket fuel components and their degradation products. – Moscow: A.I. Burnazyan Federal State Budgetary Scientific Institution. - 2014. - 158 p.

9. Maslova, N.V. The Role of Vegetation in the City's Infrastructure/ N.V. Maslova, V.V. Ivchenko, A.S. Saturov// In the collection: Journalism and Geography. Collection of materials from the III All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation. - Voronezh, 2024. - Pp. 65-68.

10. Patent of the Russian Federation No. RU 2758197 C1, 26.10.2021 // Description of the invention for the patent // Maslova Natalya Vladimirovna, Sukhanov Pavel Tikhonovich, Kushnir Aleksey Alekseevich [et al.].

11 GOST ISO/IEC 17025-2019 "General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories", GOST 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 "Measurement Uncertainty. Part 3. Guide for Expressing Measurement Uncertainty" – Introduced. 01.07.2023. – 68 p.

12. Saturov, A.S. Qualimetric Approach and Statistical Methods in Atmospheric Air Quality Management / A.S. Saturov, N.V. Maslova, and N.N. Popova // In the collection: Current Issues in Quality Management, Standardization, and Metrology. Collection of Papers from the 10th All-Russian Scientific and Practical International Conference.

13. GOST 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 "Measurement Uncertainty. Part 3. Guide to the Expression of Measurement Uncertainty" - Introduced. 14.07.2017. – 68 p.

14. RMG 76 Internal Quality Control of Quantitative Chemical Analysis Results. - Introduced. 25.06.2014. – 111 p.

15. GOST ISO 5725-6 Accuracy (correctness and precision) of methods and results of measurements. – Vved. 23.04.2002. – 42 p.

Сведения об авторах

ФИО	*Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)*
Маслова Наталья Владимировна	кандидат химических наук, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко», доцент кафедры клинической лабораторной диагностики, maslovanatvl@mail.ru SPIN-код 3150-1295 ORCID 0000-0002-0100-9600
Сатуров Алексей Сергеевич	студент-магистр, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», магистрант, alex7704@mail.ru SPIN-код 9293-1749 ORCID 0009-0000-1276-7872
Суханов Павел Тихонович	доктор химических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», советник при ректорате по научно-методической деятельности, pavel.suhanov@mail.ru SPIN-код 8978-9118 ORCID 0000-0002-2588-9286

Authors information

Last name, first name, patronymic	*Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)*
Maslova Natalia Vladimirovna	candidate of chemical sciences, Voronezh state medical university named after N. N. Burdenko, associate professor of the department of Clinical laboratory diagnostics, maslovanatvl@mail.ru SPIN-код 3150-1295 ORCID 0000-0002-0100-9600
Saturov Alexey Sergeevich	master's student, Voronezh state forest engineering university named after G.F. Morozov, post-graduate student, alex7704@mail.ru SPIN-код 9293-1749 ORCID 0009-0000-1276-7872
Sukhanov Paul Tikhonovich	doctor of chemical sciences, professor, Voronezh state university of engineering technologies, advisor to the rector's office for scientific and methodological activities, pavel.suhanov@mail.ru SPIN-код 8978-9118 ORCID 0000-0002-2588-9286

статья поступила в редакцию	одобрена после рецензирования	принята к публикации
14.10.2025	06.11.2025	02.12.2025

the article was submitted	approved after reviewing	accepted for publication
14.10.2025	06.11.2025	02.12.2025

Научная статья

УДК 661.723 : 661. 725: 661.728

РЕИНЖИНИРИНГ ПРОЦЕССОВ ГЛУБОКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТОЛУОЛА

Михаил Юрьевич Князев [1, 2] diskmy20242026@gmail.com

[1]Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. Карла Маркса, д. 68, г. Казань, 420015, Респ. Татарстан, Россия
[2]ООО «Инвестиционно-промышленный Концерн «ЗВЕЗДА», Краснопресненская наб., д. 12, под. 3, эт. 10, 1/13, г. Москва, 123610, Россия

Аннотация. Рассмотрен реинжиниринг химико-технологической системы проекта глубокой переработки толуола инновационного комплекса – «бензилового кластера». Комплекс включает в себя получение ценных химических продуктов (бензилхлорида, бензилового спирта, бензилцианида, дибензилового эфира, бензилцеллюлозы, бензойной кислоты, бензилбензоата и др.), которые широко применяются в фармацевтической, парфюмерной, пищевой и других отраслях промышленности. В ходе реинжиниринга предложены три новации: новая конструкция барботажного реактора хлорирования толуола; усовершенствованная технологическая схема выделения бензилового спирта из продуктов гидролиза бензилхлорида; инновационная технологическая схема совместного получения бензилхлорида, бензилового спирта и дибензилового эфира. Реализация предложенных решений способствует значительному сокращению энергозатрат, уменьшению объема сточных вод и гибкому управлению производством в зависимости от рыночного спроса.

Ключевые слова: толуол, глубокая переработка, бензилхлорид, бензиловый спирт, дибензиловый эфир, реинжиниринг, химико-технологическая система.

Для цитирования: Князев М. Ю. Реинжиниринг процессов глубокой переработки толуола // Инженерные технологии. 2025. № 4 (12). С. 87-93.

Original article

REENGINEERING OF TOLUENE DEEP CONVERSION PROCESSES

Mikhail Yu. Knyazev [1, 2] diskmy20242026@gmail.com

[1]Kazan National Research Technological University, Karl Marx st., 68, Kazan, Rep. Tatarstan, 420015, Russia
[2]Limited liability company “Investment-industrial concern “ZVEZDA”, Krasnopresnenskaya nab., 12, entr. 3, floor 10, room 1/13, Moscow, 123610, Russia

Abstract. The article presents the results of reengineering the chemical technological system of toluene deep processing project focused on designing an innovative complex – “benzyl cluster”. The complex involves production of a series of valuable chemical products (benzyl chloride, benzyl alcohol, benzyl cyanide, dibenzyl ether, benzyl cellulose, benzoic acid, benzyl benzoate, etc.), which are widely used in the pharmaceutical, perfumery, food and other industries. Three innovations are proposed in the course of reengineering: a new design of a bubbling reactor for toluene chlorination; an improved process flow chart for isolating benzyl alcohol from benzyl chloride hydrolysis products; an innovative process flow scheme for the joint production of benzyl chloride, benzyl alcohol and dibenzyl ether. The implementation of the proposed solutions contributes to a significant reduction in energy costs, a decrease in the volume of wastewater and flexible production management depending on market demand. The project is in line with the strategic goals of developing the chemical industry in Russia, which will help strengthen its position in the global market.

Keywords: toluene, deep processing, benzyl chloride, benzyl alcohol, dibenzyl ether, reengineering, chemical technological system.

For citation: Knyazev M. Yu. Reengineering of toluene deep conversion processes. Ingenernye tehnologii = Engineering technologies. 2025; (4 (12)): 87-93. (In Russ.).

Введение

В настоящее время в России активно развивается химическая промышленность благодаря инвестициям в инновации и цифровизацию производственных процессов [1]. Особое внимание уделяется импортозамещению и разработке собственных технологий, что делает внедрение современных инженерных решений особенно актуальным [2].

Инжиниринг представляет собой комплекс работ по проектированию, разработке и внедрению новых технологических процессов и производств. Это особенно важно для высокотехнологичной и капиталоемкой химической отрасли. Инжиниринг химико-технологических систем (ХТС) охватывает как проектно-технологические, так и организационно-технологические аспекты [3]. Одним из ключевых этапов является разработка проектов

© 2025. Князев М. Ю. / Knyazev M. Yu.

синтеза ХТС, требующая глубокого понимания химических процессов и инженерных решений.

Реинжиниринг, в свою очередь, направлен на модернизацию уже существующих производств с целью повышения их эффективности, снижения экологической нагрузки и соответствия современным стандартам. Реинжиниринг ХТС предполагает разработку мер по обновлению и совершенствованию её структуры с использованием более эффективных технологий. Проекты реинжиниринга включают рационализацию и модернизацию действующих производственных комплексов, обновление проектной документации, а также структурный анализ ХТС. Он заключается в постоянной адаптации системы к изменениям производственной программы под влиянием быстро меняющегося рынка, а также внедрения новых технологий и оборудования с целью снижения издержек [4].

Таким образом, развитие этих направлений способствует укреплению позиций России на мировом рынке химической продукции и обеспечивает устойчивый рост отрасли в долгосрочной перспективе.

В контексте этого направления в настоящее время в России реализуется инвестиционный проект «Разработка и организация производства бензилхлорида и бензилового спирта» по реинжинирингу ХТС глубокой переработки толуола. Проект выполняется в соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 21.07.2020 г. № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» и в рамках государственной программы Российской Федерации «Научно-техническое развитие Российской Федерации». Проект включает в себя организацию малотоннажных производств линейки ценных химических продуктов, основанной на объединении физических, химических и технологических процессов.

Цель настоящей статьи – рассмотрение результатов реинжиниринга химико-технологической системы проекта глубокой переработки толуола в рамках создания инновационного комплекса «бензиловый кластер».

Химические основы проекта «бензиловый кластер»

В ходе реализации инвестиционного проекта его масштабы были значительно расширены: помимо бензилхлорида и бензилового спирта, в производство включены другие химические соединения, близкие по структуре. На основе взаимосвязанных физических, химических и технологических процессов они объединены в единый производственный комплекс, получивший название «бензиловый кластер» (см. рисунок 1) [5].

Бензилхлорид (БХ) $C_6H_5CH_2Cl$ является базовым элементом (ключевым компонентом) бензилового кластера. Его получают жидкофазным радикально-цепным хлорированием толуола:

$$C_6H_5CH_3 + Cl_2 \rightarrow C_6H_5CH_2Cl + HCl$$

БХ является исходным продуктом для получения бензилового спирта, сложных эфиров бензойной кислоты, бензилхлорида, бензилцеллюлозы, используемых в фармацевтической промышленности при изготовлении лекарственных средств, душистых веществ для парфюмерной продукции, а также при производстве красителей и пластических масс.

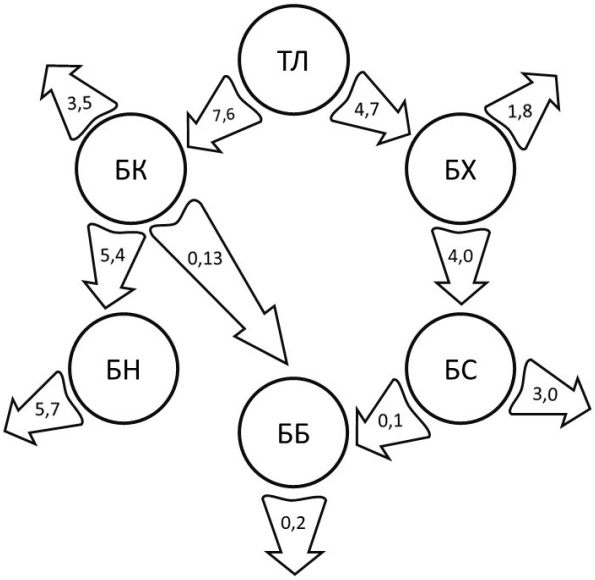


Рисунок 1. Схема комплекса глубокой переработки толуола (ТЛ) «бензиловый кластер», включающего получение: бензойной кислоты (БК), бензилхлорида (БХ), бензилового спирта (БС), бензилбензоата (ББ) и бензоата натрия (БН). Цифры (тыс. т) указывают потребность рынка в этих продуктах в перспективе к 2030 г. (получены в результате анализа рынка [6-9]). Другие цифры указывают объемы внутреннего потребления получаемых продуктов в комплексе (получены расчетным путем)

Figure 1. Scheme of toluene (ТЛ) deep processing complex "benzyl cluster", including the production of: benzoic acid (БА), benzyl chloride (БХ), benzyl alcohol (БС), benzyl benzoate (ББ), and sodium benzoate (БН). The figures (thousand tons) indicate the market demand for these products in the long term by 2030 (result of market analysis [6-9]). Other figures indicate the volumes of domestic consumption of the products obtained in the complex (calculation results)

Бензотрихлорид (БТХ) $C_6H_5CCl_3$ получают более глубоким жидкофазным радикально-цепным хлорированием толуола через промежуточную стадию образования

бензальхлорида ($C_6H_5CHCl_2$). БТХ используется для получения бензотрифторида, бензоилхлорида, бензойной кислоты, красителей и др.

Бензиловый спирт (БС) $C_6H_5CH_2OH$ является вторым ключевым компонентом бензилового кластера. Его получают щелочным гидролизом БХ:

$$C_6H_5CH_2Cl + NaOH \rightarrow C_6H_5CH_2OH + NaCl$$

Побочным процессом, протекающим при щелочном гидролизе БХ, является алкоголиз органических хлоридов, приводящий к образованию простого эфира:

$$2C_6H_5CH_2Cl+2NaOH\rightarrow(C_6H_5CH_2)_2O+2NaCl+H_2O$$

БС как ключевой компонент бензилового кластера, используется прежде всего для получения дибензилового эфира, бензилбензоата, других простых и сложных эфиров бензила, а также применяется в производствах основного органического синтеза, текстильной, лакокрасочной, медицинской, пищевой, косметической отраслях промышленности.

Алкилдиметилбензиламмоний хлорид (АДБАХ) четвертичная аммонийная соль, одним из представителей является додецилдиметилбензиламмоний хлорид $[C_{12}H_{25}N(CH_3)_2CH_2C_6H_5]^+Cl^-$. Его получают взаимодействием БХ с додецилдиметиламином:

$$C_6H_5CH_2Cl+(CH_3)_2NC_{12}H_{25} \rightarrow$$
$$\rightarrow [C_{12}H_{25}N(CH_3)_2CH_2C_6H_5]^+Cl^-.$$

Это соединение является действующим веществом для производства средств дезинфекции.

АДБАХ относятся к группе поверхностно-активных четвертичных аммониевых солей, которые сочетают в себе дезинфицирующие, смачивающие, пенообразующие, антикоррозионные и гидрофобизирующие свойства. Преимущества этих веществ перед существующими дезинфицирующими препаратами (хлором, фенолом, гипохлоритом натрия) заключается в том, что они хорошо растворимы в воде, не имеют запаха и даже в большом разбавлении 1 : 100000 проявляют антимикробное действие, оставаясь безвредными для организма человека.

Бензилцианид (БЦ) $C_6H_5CH_2CN$. Этот химический продукт получают с высоким выходом реакцией бензилхлорида с цианидом натрия в этанольном растворе или с водным раствором NaCN в присутствии катализатора межфазного переноса – триалкилбензиламмоний хлорида:

$$C_6H_5CH_2Cl + NaCN \rightarrow C_6H_5CH_2CN + NaCl$$

БЦ используют для синтеза фенилуксусной кислоты, применяемой для получения лекарственных веществ, а также оптических отбеливателей, душистых веществ, инсектицидов.

Дибензиловый эфир (ДБЭ) $(C_6H_5CH_2)_2O$. Получают взаимодействием БХ с водным раствором едкого натра в присутствии катализатора фазового переноса (АДБАХ):

$$2C_6H_5CH_2Cl+2NaOH\rightarrow(C_6H_5CH_2)_2O+2NaCl+H_2O$$

ДБЭ является исходным мономером для синтеза душистых веществ и лекарственных препаратов, а также может быть использован для синтеза бензальдегида. ДБЭ, выделяемый как побочный продукт при синтезе БС, может быть применен для получения БХ (ключевого компонента бензилового кластера) в процессе гидрохлорирования ДБЭ концентрированной соляной кислотой в присутствии катализатора межфазного переноса тетра- или три-C_1–C_8 алкилбензиламмоний хлорида. ДБЭ применяется также в процессе полимеризации олефинов как ингибитор и как средство для регулирования селективности. Из смеси ДБЭ и БС может быть получен дифенилметан. Перспективным направлением использования ДБЭ является его применение в качестве многофункциональной присадки к дизельным топливам.

Бензилцеллюлоза (БЦ) $[C_6H_7O_2(OCH_2C_6H_5)_x(OH)_{3-x}]_n$. Продукт получают действием бензилхлорида на щелочную целлюлозу в присутствии в качестве катализатора солей иодистоводородной кислоты

$$Целл–ONa+ClCH_2C_6H_5\rightarrow Целл–O–CH_2C_6H_5+NaCl$$

Благодаря уникальным физико-химическим свойствам (водостойкость, стойкость к кислотам и щелочам, высокая адгезия и др.), БЦ может служить основой для создания антикоррозионных полимерных и композитных покрытий промышленного и специального назначения. БЦ применяется в основном для изготовления кабелей. Благодаря хорошей адгезионной способности, БЦ также используется для изготовления защитных покрытий и лаков. Растворы БЦ применяются для получения «вечных» обоев из декоративной моющейся бумаги, из нее получают также прессовочные и литьевые композиции для производства водо- и щелочестойких изделий, различные полимерные материалы. БЦ можно использовать для приготовления водостойких и электроизоляционных лаков.

Бензойная кислота (БК) C_6H_5COOH. Получают БК двумя различными способами, оба из которых планируется реализовать в бензиловом кластере. Первый способ – окисление толуола кислородом воздуха в жидкой фазе:

$$C_6H_5CH_3 + 3/2\ O_2 \rightarrow C_6H_5COOH + H_2O$$

Второй способ – гидролиз бензотрихлорида в кислой среде:

$$C_6H_5CCl_3 + 2H_2O \xrightarrow{H^+} C_6H_5COOH + 3HCl$$

БК и ее натриевая соль используются в качестве бактерицидных и бактериостатических препаратов для консервации пищевых продуктов. Литиевые, магниевые и кальциевые соли БК применяется как противоподагрические и противоревматические средства в медицине. БК является исходным продуктом для получения красителей, различных фармацевтических препаратов, душистых веществ.

Бензилбензоат (ББ) $C_6H_5COOCH_2C_6H_5$. Получают взаимодействием соответствующей кислоты и спирта:

$$C_6H_5COOH + HOCH_2C_6H_5 \rightarrow$$
$$\rightarrow C_6H_5COOCH_2C_6H_5 + H_2O$$

или взаимодействием бензоата натрия и БХ. Основные области применения ББ: медицинская продукция (препарат против эктопаразитов, входит в состав бальзамов «Перу» и «Толу»); инсекторепеллент (в том числе против комаров); ветеринария. Основными потребителями ББ являются заводы химической промышленности, фармацевтические, парфюмерные и косметические предприятия.

Реинжиниринг ХТС проекта «бензиловый кластер»

Реинжиниринг ХТС по глубокой переработке толуола был дополнен использованием трех новаций:

1. Предложена новая конструкция барботажного колонного реактора [10] для хлорирования толуола, которая позволяет интенсифицировать процесс за счет специальной конфигурации барботера, позволяющей распределять газовую фазу по всему поперечному сечению реакционной зоны. Наличие нескольких автономных теплообменных устройств дает возможность передавать большие тепловые потоки при значительных тепловых эффектах газожидкостных химических реакций и при необходимости создавать температурный градиент по высоте реактора. Высота колонного аппарата может быть изменена за счет использования в конструкции однотипных цилиндрических кольцевых блоков.

2. Разработана и рассчитана новая технологическая схема выделения бензилового спирта из продуктов гидролиза бензилхлорида [11], позволяющая стабильно получать товарный бензиловый спирт высокой чистоты с содержанием основного компонента 99,99%.

Этот эффект достигается за счет использования улучшенной обвязки двух вакуумных ректификационных колонн, применения более глубокого вакуума для разделения продуктов реакции и использования высокоэффективной CY-насадки.

3. Разработана новая технологическая схема совместного получения бенилхлорида, бензилового спирта и дибензилового эфира, позволяющая значительно улучшить энергоресурсосберегающие показатели комплекса глубокой переработки толуола (рисунок 2).

В соответствии с этой схемой осуществляется замкнутый цикл получения указанных продуктов. Сначала в барботажном колонном реакторе (1) проводят хлорирование предварительно перегнанного толуола (Т) и очищенного хлора. Газообразные продукты хлорирования (HCl, непрореагировавший Cl_2) направляют в насадочную колонну (8), где их абсорбируют водой с получением соляной кислоты. Жидкие продукты хлорирования направляют на стадию (2) разделения (вакуумная ректификация), где выделяют непрореагировавший толуол и возвращают его на стадию хлорирования. Тяжелые органические продукты со стадии (2) выводят на термическую утилизацию. Часть полученного на стадии (2) БХ используют как товарный продукт, а оставшуюся часть БХ направляют на стадию гидролиза (3) водным раствором Na_2CO_3. Полученный продукт гидролиза, содержащий БС и ДБЭ, направляют на стадию фазоразделения (4), где разделяют органическую и водную фазы. Водную (щелочную) фазу направляют в смеситель (7). В смеситель (7) подают также часть соляной кислоты, полученной на стадии абсорбции (8). В смесителе (7) происходит нейтрализация кислых и щелочных стоков производства и полученную сточную воду с pH = 7–8 направляют на стадию очистки. Органическую фазу, полученную на стадии (4), направляют на стадию вакуумной ректификации (5), где выделяют: азеотроп БС-вода, который рециркулируют на стадию гидролиза (3); БС – как товарный продукт; ДБЭ – часть которого используют как товарный продукт, а оставшуюся часть направляют на стадию гидрохлорирования, на которой, в результате взаимодействия ДБЭ и соляной кислоты образуется БХ, который после фазоразделения (на схеме не показано) направляют на стадию разделения (2).

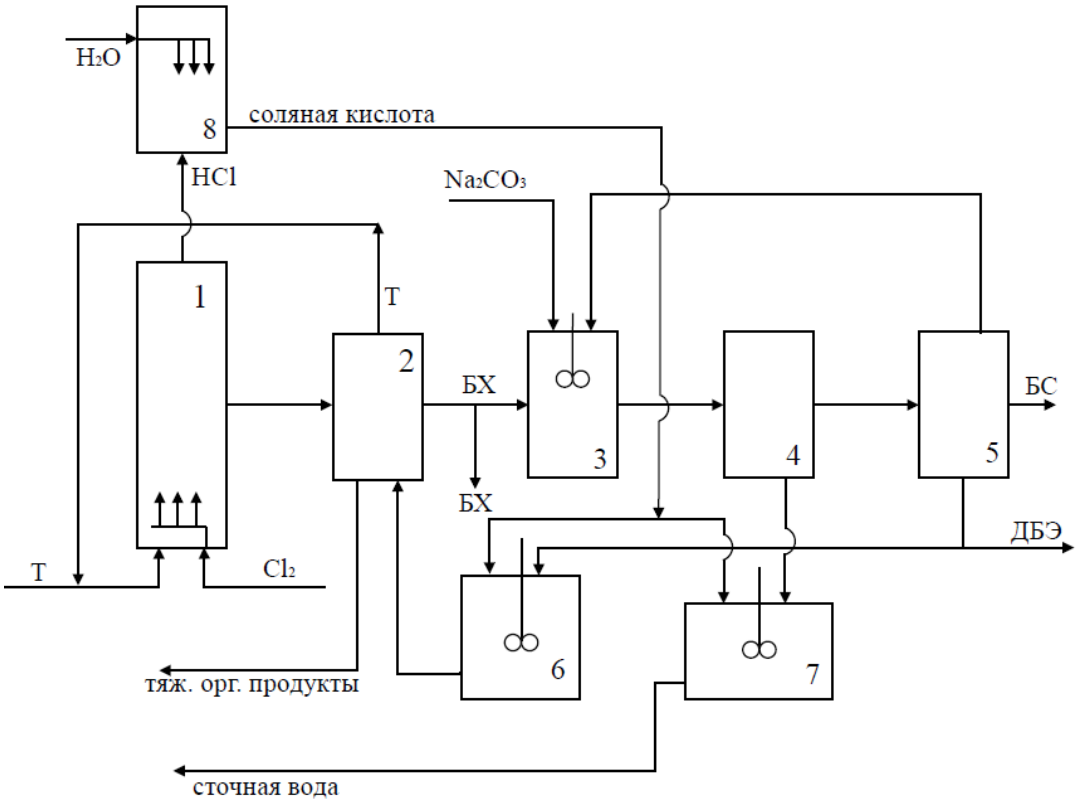


Рисунок 2. Принципиальная технологическая схема совместного получения бензилхлорида, бензилового спирта и дибензилового эфира. Пояснения в тексте

Figure 2. Basic flow chart of the combined production of benzyl chloride, benzyl alcohol and dibenzyl ester. (See text for explanations)

Предлагаемая технологическая схема позволяет:

1) Значительно сократить количество направляемых на термическое уничтожение побочных тяжелых органических продуктов за счет вовлечения в переработку фракции органических веществ, содержащих ДБЭ;

2) дополнительно получать ДБЭ;

3) получать дополнительное количество БХ за счет вовлечения в процесс «внутреннего» продукта комплекса соляной кислоты.

4) снизить количество сточных вод и энергозатраты на их очистку

5) гибко регулировать количество получаемых продуктов с учетом их спроса на товарном рынке.

Заключение

В результате проведенного реинжиниринга химико-технологической системы проекта глубокой переработки толуола разработан инновационный комплекс – «бензиловый кластер», позволяющий получать широкую гамму ценных химических продуктов (бензилхлорид, бензиловый спирт, бензилцианид, дибензиловый эфир, бензилцеллюлозу, бензойную кислоту, бензилбензоат и другие соединения).

Предложены три ключевые новации, повышающие эффективность процессов:

1. Новая конструкция барботажного колонного реактора для хлорирования толуола;

2. Усовершенствованная технологическая схема выделения бензилового спирта;

3. Инновационная схема совместного получения бензилхлорида, бензилового спирта и дибензилового эфира.

Реализация предложенных технических решений позволит значительно повысить энерго- и ресурсосбережение производства, снизить количество отходов и сточных вод, гибко регулировать объемы выпускаемой продукции в зависимости от рыночного спроса, расширить ассортимент производимой продукции, повысить экономическую эффективность комплекса глубокой переработки толуола.

Таким образом, выполненный реинжиниринг создает современную конкурентоспособную производственную базу для выпуска востребованных химических продуктов и соответствует стратегическим целям развития химической отрасли Российской Федерации до 2030 года.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства промышленности и торговли Российской Федерации.
Соглашение № 020-11-2022-1598 от 15.12.2022

This work was supported by the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation.
Agreement No. 020-11-2022-1598 dated December 15, 2022.

Литература

1. Калугина П.Б. Химическая промышленность России: современное состояние и проблемы развития // Символ науки: международный научный журнал. – 2023. – Т. 1. – № 12-1. – С. 125–129.

2. Ляченков М.И. Развитие российской химической промышленности в условиях санкций и импортозамещения // Вестник Московского финансово-юридического университета МФЮА. – 2023. – № 4. – С. 155– 166.

3. Мешалкин В.П. Введение в инжиниринг энергоресурсосберегающих химико-технологических систем. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2020 – 212 с.

4. Богомолов Б.Б., Аверина Ю.М., Верхососова А.И., Дюженко М.Е. Бизнес-моделирование реинжиниринга химико-технологических систем // Химическая промышленность сегодня. – 2024. – № 2. – С. 20–25.

5. Траханова Е.В., Князев М.Ю., Артемов А.В., Дюбанов М.В. Экономическое обоснование и разработка технологии производства импортозамещающей химической продукции из толуола // Российский химический журнал. – 2024. – Т. 68, № 1. – С. 74–79. DOI: 10.6060/RCJ/2024681.13.

6. Князев М.Ю., Траханова Е.В., Артемов А.В., Дюбанов М.В. Бензилбензоат: получение, свойства применение (обзор) // Химическая промышленность сегодня. – 2024. – № 4. – С. 29–37.

7. Князев М.Ю. Состояние и перспективы организации производства импортозамещающей продукции и цепей ее поставок на примере анализа рынка бензойной кислоты // Наука и бизнес: пути развития. – 2025. – № 3. – С. 135–140.

8. Князев М.Ю. Исследование перспектив организации производства бензоата натрия на базе российской промышленности // Наука и бизнес: пути развития. – 2025. – № 3. – С.141–146.

9. Князев М.Ю. Исследование динамики потребления химической продукции линейки сложных эфиров бензойной кислоты в российской экономике // Наука и бизнес: пути развития. – 2025.– № 4. – С. 151–159.

10. Патент РФ на полезную модель № 231000. МПК B01J 10/00. Барботажный реактор. Траханова Е.В., Князев М.Ю., Артемов А.В., Дюбанов М.В. Опубл. 26.12.2024. Бюл. № 36. ООО «Инвестиционно-промышленный Концерн «ЗВЕЗДА».

11. Заявка на патент РФ № 2024125829/04(057288). Установка для выделения бензилового спирта из продуктов гидролиза бензилхлорида ректификацией. Князев М.Ю, Румянцева Е.В., Артемов А.В., Дюбанов М.В. ООО «Инвестиционно-промышленный концерн «ЗВЕЗДА», заявл. 03.09.2024.

References

1. Kalugina P.B. Chemical industry of Russia: current state and problems of development // Simvol nauki: mezhdunarodnyi naucnyi zhurnal [Symbol of Science: International Scientific Journal]. – 2023. – V. 1. – № 12-1. – P. 125–129 (in Russ).

2. Liachenkov M.I. Development of the Russian chemical industry in the context of sanctions and import substitution // Vestnik moskovskogo finansovo-yuridicheskogo univ. MFUA [Bulletin of the Moscow Financial and Law University MFUA]. – 2023. – № 4. – P. 155– 166 (in Russ.).

3. Meshalkin V.P. Introduction to Engineering of Energy-Saving Chemical-Engineering Systems. – M.: Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia, 2020 – 212 p. (in Russ.).

4. Bogomolov B.B., Averina Yu.M., Verkhososova A.I., Dyuzhenko M.E. Business modeling of reengineering of chemical-technological systems // Himicheskaja promyshlennost' segodnja [Chemical Industry Today]. – 2024. – № 2. – P. 20–25 (in Russ.).

5. Trakhanova E.V., Knyazev M.Yu., Artemov A.V., Dyubanov M.V. Economic justification and development of technology for the production of import substituting chemical products from toluene // Rossiiskii khimicheskii zhurnal [Russian Chemical Journal]. – 2024. – V. 68(4). – P. 74–79 (in Russ.).

6. Knyazev M.Yu., Trakhanova E.V., Artemov A.V., Dyubanov M.V. Benzyl benzoate: basic methods of preparation, properties, applications (review) // Himicheskaja promyshlennost' segodnja [Chemical Industry Today]. – 2024. – № 4. – P. 29–37 (in Russ.).

7. Knyazev M.Yu. Status and perspectives of organizing import substitute production and supply chains: the case of benzoic acid market analysis // Nauka i biznes: puti razvitiya [Science and Business: Ways of Development]. – 2025. – № 3. – P. 135–140 (in Russ.).

8. Knyazev M.Yu. Investigation of prospects for organizing sodium benzoate production on the basis of Russian industry// Nauka i biznes: puti razvitiya [Science and Business: Ways of Development]. – 2025. – № 3. – P. 141–146 (in Russ.).

9. Knyazev M.Yu. Investigation of consumption dynamics of chemical product range of benzoic acid esters in Russian economy // Nauka i biznes: puti razvitiya [Science and Business: Ways of Development]. – 2025. – № 3. – P. 141–146 (in Russ.).

10. RF Patent No. 231000. MPC B01J 10/00. Bubbling reactor. Trakhanova E.V., Knyazev M.Yu., Artemov A.V., Dyubanov M.V. Publ. 26.12.2024. Limited liability company "Investment-industrial concern "ZVEZDA".

11. RF Patent application № 2024125829/04(057288). Installation for separation of benzyl alcohol from the products of benzyl chloride hydrolysis by rectification. Knyazev M.Yu., Rumyantseva E.V., Artemov A.V., Dyubanov M.V. Limited liability company "Investment-industrial concern "ZVEZDA". Appl. 03.09.2024.

Сведения об авторах

ФИО	*Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)*
Князев Михаил Юрьевич	Кандидат экономических наук, старший научный сотрудник кафедры логистики и управления Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ). Советник генерального директора Общества с ограниченной ответственностью «Инвестиционно-промышленный Концерн «ЗВЕЗДА». diskmy20242026@gmail.com ORCID 0009-0000-1641-461X

Authors information

Last name, first name, patronymic	*Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)*
Knyazev Mikhail Yuryevich	Candidate of Economic Sciences (Ph.D.), Senior Researcher of Department of Logistics and Management, Kazan National Research Technological University. Advisor of the General Director of the Limited liability company "Investment-industrial concern "ZVEZDA", diskmy20242026@gmail.com ORCID 0009-0000-1641-461X

статья поступила в редакцию	одобрена после рецензирования	принята к публикации
14.10.2025	30.10.2025	12.11.2025

the article was submitted	approved after reviewing	accepted for publication
14.10.2025	30.10.2025	12.11.2025

Научная статья

УДК 678.031.8: 667.042.2

ЖИДКОФАЗНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ СОЗДАНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИ СОВЕРШЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА НАНОКОМПОЗИТОВ

Владимир Иванович Корчагин [1] kvi-vgta@rambler.ru
Артем Викторович Протасов [1] pav-vgta86@mail.ru
Алексей Игоревич Лимов [1] alex71limov@mail.ru
Наталья Юрьевна Санникова ✉ [1] cnu@inbox.ru
Дмитрий Юрьевич Федоров [1]

[1]Воронежский государственный университет инженерных технологий, проспект Революции, д. 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Созданы научно-практические подходы получения нанокомпозитов с высокой энергетической активностью. В основе метода лежит технология жидкофазного наполнения эмульсионного каучука озонолизированным высокодисперсным печным техническим углеродом, который водится на стадии выделения каучука из латекса. Показано, что равномерное распределение высокодисперсного печного технического углерода при получении водной дисперсии целесообразно достигать ультразвуковой озонолизацией, способствующей частичному разрушению вторичных агрегатов и функционализации поверхности нанодисперсного углерода за счет образования кислородосодержащих групп (карбоксильных, фенольных, лактоновых и т.п.). Использование ультразвуковой озонолизации при получении нанокомпозитов позволяет решить ряд эколого-технологических проблем за счет исключения образования высокодисперсных газовых смесей, токсичных и опасных загрязняющих веществ.

Ключевые слова: жидкофазное наполнение, нанокомпозиты, технический углерод, эластомерные композиции, ультразвуковая озонолизация.

Для цитирования: Корчагин В. И., Протасов А. В., Лимов А. И., Санникова Н. Ю., Федоров Д. Ю. Жидкофазные технологии при создании экологически совершенного производства нанокомпозитов // Инженерные технологии. 2025. № 4 (12). С. 94-103.

Original article

LIQUID-PHASE TECHNOLOGIES IN THE CREATION OF ECO-FRIENDLY PRODUCTION OF NANOCOMPOSITES

Vladimir I. Korchagin [1] kvi-vgta@rambler.ru
Artem V. Protasov [1] pav-vgta86@mail.ru
Aleksey I. Limov [1] alex71limov@mail.ru
Natalya Yu. Sannikova ✉ [1] cnu@inbox.ru
Dmitry Yu. Fedorov [1]

[1]Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue, 19, Voronezh, 394036, Russia

Abstract. Scientific and practical approaches to producing nanocomposites with high energy activity have been developed. The method is based on liquid-phase filling of emulsion rubber with ozonized, highly dispersed furnace carbon black, which is introduced during the rubber separation process from latex. It has been demonstrated that uniform distribution of highly dispersed furnace carbon black during the production of an aqueous dispersion can be achieved using ultrasonic ozonization, which facilitates the partial destruction of secondary aggregates and the functionalization of the nanodispersed carbon surface through the formation of oxygen-containing groups (carboxyl, phenolic, lactone, etc.). The use of ultrasonic ozonization in the production of nanocomposites allows for the resolution of a number of environmental and technological issues by eliminating the formation of highly dispersed gas mixtures and toxic and hazardous pollutants.

Keywords: liquid-phase filling, nanocomposites, carbon black, elastomer compositions, ultrasonic ozonization.

For citation: Korchagin V. I., Protasov A. V., Limov A. I., Sannikova N. Yu., Fedorov D. Yu. Liquid-phase technologies in the creation of eco-friendly production of nanocomposites. Ingenernye tehnologii = Engineering technologies. 2025; (4 (12)): 94-103. (In Russ.).

Введение

Технология получения эластомерных композиций (ЭК), основанная на «сухом» механическом смешении синтетического каучука с высокодисперсными марками технического углерода (ТУ), имеет значительный недостаток. Получаемая эластомерная фаза характеризуется низкой степенью гомогенизации частиц наполнителя по объему. В высоковязкой

© 2025. Корчагин В. И. и др. / Korchagin V. I. et al.

эластомерной матрице равномерное распределение нанодисперсного ТУ, склонного к агломерированию, достигается при высоких энергетических затратах на стадии изготовления резиновой смеси на вальцах и в резиносмесителях. При механическом смешении возникают критические напряжения сдвига, продолжительное воздействие которых способствует необратимым структурным превращениям в эластомерной матрице. Диспергируемость печного ТУ в каучуке при «сухом» смешении затрудняется при использовании высокодисперсных углеродных наполнителей с низкой структурностью. «Сухое» смешение сопровождается выбросами в рабочую зону тонкодисперсных частиц во время загрузки и выгрузки резиносмесителя и при изготовлении на вальцах резиновой смеси.

Достижение максимальной возможной степени диспергирования частиц ТУ в эластомерной матрице нанокомпозитов направлено на обеспечение высокого значения модуля, показателя прочности и износостойкости в вулканизатах, а также снижение усадки и разбухания резиновых полуфабрикатов при экструзии. Однако в реальном технологическом процессе более 30 % поверхности ТУ недоступны для адгезии каучука. В результате возникает трение между частицами в агломератах и, как следствие, в условиях деформации в резинах выделяется нежелательное тепло [1].

Жидкофазные технологии открывают возможность направленного регулирования состава и структуры нанокомпозитов, представляющих собой высокоорганизованную дисперсную систему с равномерно-распределенным по эластомерной матрице активным наполнителем. Наполнение эмульсионных каучуков нанодисперными углеродными наполнителями, в частности, *высокодисперсным* печным ТУ, на стадии выделения из латекса обеспечивает минимизацию энергопотребления, т.к. энергозатраты в процессе смешения лимитируется вязкостью дисперсионной среды, т.е. вязкостью водной фазы. Стадии выделения и обезвоживания влажного агломерата нанокомпозита, полученного жидкофазным наполнением эмульсионного каучука высокодисперсным ТУ выполняются по установленной для заводов СК технологии [2]. Введение наполнителей на стадии латекса позволяет обеспечить осуществление малоэнергоемкого процесса тонкого смешения.

Компания «Кэбот» разработала инновационный метод производства натурального каучука, насыщенного ТУ, непосредственно на этапе обработки латекса в режиме непрерывного потока с использованием пароструйного смесителя [3]. Благодаря интенсивному воздействию струи водяного пара на суспензию углеродосодержащих компонентов удается создать стабильную водную дисперсию ТУ без добавления специальных стабилизаторов [4]. Получение ЭК осуществляется путем быстрого перемешивания латекса с мелкодисперсным наполнителем в условиях экстремальной турбулентности и мощного теплового воздействия водяным паром всего за считанные секунды, исключая необходимость введения коагулянтов [5, 6].

Предложенный авторами метод [7], включает технологию жидкофазного объединения бутадиен-стирольного каучука с высокодисперсным ТУ низкого уровня структуры на стадии извлечения из латекса посредством ультразвуковой активации. Такой подход обеспечивает высокоэффективный и экономичный процесс формирования эластичного композита с большим количеством равномерно распределенных частиц наноразмерного ТУ. Применение ультразвукового воздействия на стадии совмещения дисперсии тонкодисперсного ТУ марки К354 и латекса промышленного изготовления каучука марки СКС-30 АРК способствует формированию высококачественных эластичных композитов, позволяющих сократить продолжительность смешивания резиновых композиций с 27 минут до 17 минут и обеспечить необходимые физико-механические характеристики готовых изделий. За счет использования полученных таким образом композитов существенно снижается вероятность образования вредных выбросов, включающих мелкие частицы наноуглерода.

Исследования показали [8], что технология жидкофазного наполнения эмульсионных каучуков на этапе их отделения из латекса обеспечивает однородное распределение наночастиц ТУ внутри композитного материала благодаря диспергирующему эффекту. Эмульгаторы, содержащиеся в латексе, перемещаются с поверхности латексных гранул на активно развитую поверхность частиц ТУ вследствие ультразвукового воздействия. Это приводит к повышению степени дисперсности, увеличению адсорбционных свойств и усилению энергетической активности наполнителя.

Значительное улучшение физико-механических характеристик вулканизированных материалов, произведённых с применением ЭК, обусловлено специфическими поверхностными взаимодействиями, возникающими на границе фаз. Основными характеристиками

ТУ, обеспечивающими эффект усиления вулканизатов, являются [9]:

- высокая удельная внешняя поверхность (адсорбция цетилтриметиламмония бромида более 70 $м^2 \cdot г^{-1}$);
- повышенная структурность — морфология дисперсных частиц (адсорбция дибутилфталата более 100 мл/100 г технического углерода);
- энергетическая активность и неоднородность поверхности.

Поверхностная активность наночастиц ТУ обусловлена присутствием функциональных кислородсодержащих группировок (таких как фенольные, карбоксильные, лактоны, хиноидные и прочие). Данные группы характеризуются химической совместимостью с полимерной матрицей, содержащей полярные компоненты, а также взаимодействуют с многофункциональными соединениями, используемыми в составе смеси. Все это положительно сказывается на повышении прочностных и упругих характеристик вулканизированных резиновых изделий.

Ярко-выраженный эффект усиления проявляется для эластомеров на основе насыщенного бутадиен-стирольного каучука, наполненного низкоструктурным высокодисперсным канальным ТУ с высоким содержанием на поверхности соединений с кислородом, в отличие от высокодисперсного печного ТУ, для которого характерно низкое содержание на поверхности кислородосодержащих групп. Эффект усиления проявляется для эластомеров на основе ненасыщенного неполярного бутилкаучука, наполненного канальным ТУ. Следует отметить, что канальный ТУ с высоким содержанием кислородсодержащих групп образует большее количество связанного каучука в виде углерод-каучукового геля. Образование связанного каучука можно считать необходимым, но недостаточным условием усиления каучука наполнителем. Наличие функциональных групп на поверхности углеродных наноматериалов обеспечивает химическую совместимость с полимерной матрицей с непредельными связями в процессе переработки [10]. Следует отметить, что высокие значения предела прочности при растяжении были отмечены у вулканизатов на основе натурального каучука при введении окисленного ТУ [11].

Согласно исследованиям [12], установлено, что достижение высокого уровня однородности распределения высокодисперсного углеродного наполнителя в полимерной матрице при формировании нанокомпозитных материалов возможно посредством использования экологичного метода озонолиза в условиях воздействия ультразвуковых волн. Процесс ультразвуковой озонолизации (УО) нанодисперсного ТУ в водной среде характеризуется разрушением агломератов и формированием устойчивых дисперсий, что способствует равномерному распределению активного наполнителя в полимерной структуре при осуществлении жидкофазного наполнения жидких полимерных сред.

Известно, что степень озонолизации поверхности ТУ нарастает по мере воздействия, и коррелируется с показателем pH водной среды. Преимущественно на первой стадии образуются гидроксильные и фенольные группы, которые на второй стадии трансформируются в карбоновые и лактоновые группы. На третьей - на поверхности ТУ продуцируются ангидридные группы, включающие атомы кислорода. Степень окисленности поверхности ТУ условно характеризуется содержанием сильнокислотными карбоксильными группами, а также слабокислотными фенольными группами, которые оказывают влияние водородный показатель pH водной суспензии. Функциональный состав зависит от морфологии и строения ТУ, поэтому общих закономерностей его формирования не существует.

Исследования показали [13], что проведение низкотемпературного процесса обработки ТУ в кислородно-озоновой смеси в неподвижном слое вызывает уменьшение среднего диаметра глобул с 25 до 18 нм и снижение показателя поглощения ДБФ с 120 до 88 $см^3$/100 г. Этот эффект обусловлен разрушением межчастичных связей внутри агрегатов, что ведет к распаду крупных агломератов и формированию компактных структур из более мелких частиц. В результате чего наблюдается сокращение объема микропор с 0,13 до 0,08 $см^3/г$ и общее снижение удельной площади поверхности с 411 до 375 $м^2/г$ относительно аналогичной величины после высокотемпературной обработки в атмосфере диоксида углерода. При этом в ходе озонирования образуются карбоксильные и фенольные функциональные группы в количестве 7,25 и 8,00 мкг-экв/$м^2$ соответственно, локализованные как на внешней стороне графеновых слоев, так и на внутренних дефектах структуры материала.

Целью работы является создание научно-практических основ получения нанокомпозитов жидкофазным наполнением эмульсионного каучука высокодисперсным печным ТУ на стадии выделения из латекса при использовании ультразвуковой озонолизации.

Материал и методы исследования

Нанокомпозиты были получены жидкофазным наполнением озонолизированным высокодисперсным ТУ каучука СКС-30АРК (АО «Воронежсинтезкаучук») на стадии латекса со следующими характеристиками: содержание каучука в латексе — 20,7 % (мас), pH — 9,7. Перед жидкофазным наполнением латекса ТУ марок ТУ-П234 (ООО «Омсктехуглерод»), ТУ-П324 и ТУ-П514 (ООО ПКФ «Экопользa») подвергали предварительно ОУ. Объект сравнения - канальный ТУ-К354 с озонолизированным печным ТУ, подвергнутым продолжительной УО озоно-воздушной смесью с удельным расходом озона 2,0 мг на 1,0 г ТУ в минуту при температуре 25 °С. Объем экспериментального образца при УО водной суспензии печного ТУ составлял 0,5 дм^3.

Количество карбоксильных, лактоновых и фенольных групп на углеродной поверхности стандартных и экспериментально обработанных образцов ТУ было определено согласно методике [14], предусматривающей последовательную обработку реагентами различной активности. Так, содержание карбоксильных групп оценивали титрованием раствором бикарбоната натрия ($NaHCO_3$); количество карбоксильных и лактоновых групп устанавливали с помощью раствора карбоната натрия (Na_2CO_3); суммарное присутствие карбоксильных, лактоновых и фенольных групп фиксировали раствором гидроксида натрия (NaOH). Поверхностное натяжение в исходном и экспериментальных образцах латекса СКС-3-АРК определяли на тензиометре дю–Нуи (Paul N. Gardner, США), а гидродинамический радиус латексных частиц на спектрофотометре PortLab511 в диапазоне длин волн 190–1100 нм и фотометрической точностью ± 0,5 %.

Результаты исследования и их обсуждение

Использование высокодисперсного печного ТУ при получении нанокомпозитов жидкофазным совмещением с латексными системами ограничено его высокой гидрофобностью. Повышение смачиваемости поверхности агрегатов ТУ поверхностно-активными веществами при получении устойчивой водной дисперсии осложнено снижением межфазного взаимодействия между углеродным наполнителем и полимерной матрицей. Использование нанодисперсного ТУ с высокой поверхностной активностью направлено на достижение максимально-возможного межфазного контакта агрегатов нанодисперсным ТУ с эластомерной матрицей, что способствует повышению физико-механических показателей вулканизатов, изготовленных с использованием нанокомпозитов.

Высокая гидрофобность печного ТУ проявляется в высоком показателе pH (≥7,8 условных единиц) водной суспензии, содержащей 100 г/дм^3 техуглерода (таблица 1). Это объясняется отсутствием на поверхности частиц ТУ функциональных групп, обеспечивающих совместимость с высокополярной водной средой. Напротив, низкий показатель pH (≤4,3) водных суспензий канального ТУ аналогичной концентрации свидетельствует о наличии на его поверхности кислородсодержащих соединений, особенно карбоксильных групп, увеличивающих кислотность среды и снижающих значения pH растворов.

Таблица 1. Влияние содержания ТУ в водной дисперсии на значения показателя pH

Table 1. The influence of carbon black content in aqueous dispersion on pH values

Марка технического углерода / Carbon black grade	Содержание ТУ в водной дисперсии, г/дм^3 / Carbon black content in aqueous dispersion, g/dm^3			
	25.0	50.0	75.0	100.0
К354	5.3–5.7	4.9–5.2	4.7–4.4	4.1–4.3
П234	6.9–7.2	7.3–7.5	7.5–7.7	7.8–8.0
П324	7,1- 7,3	7.5–7.7	7.7–7.9	8.0–8.2
П514	7.3–7.6	7.7–8.0	8.0–8.2	8.2–8.4

Повышение гидрофильности нанодисперсного печного ТУ целесообразно достигать продуцированием кислородсодержащих групп при обработке УО водной суспензии. На диаграмме (рисунок 1) отражено снижение значения показателя pH водной суспензии для нанодисперсного печного ТУ марок П234; П324 и П514 в зависимости от удельного расхода озона, что указывает на образование групп кислотного характера, в частности, сильнокислотных групп – карбоксильных, и слабокислотных - фенольных.

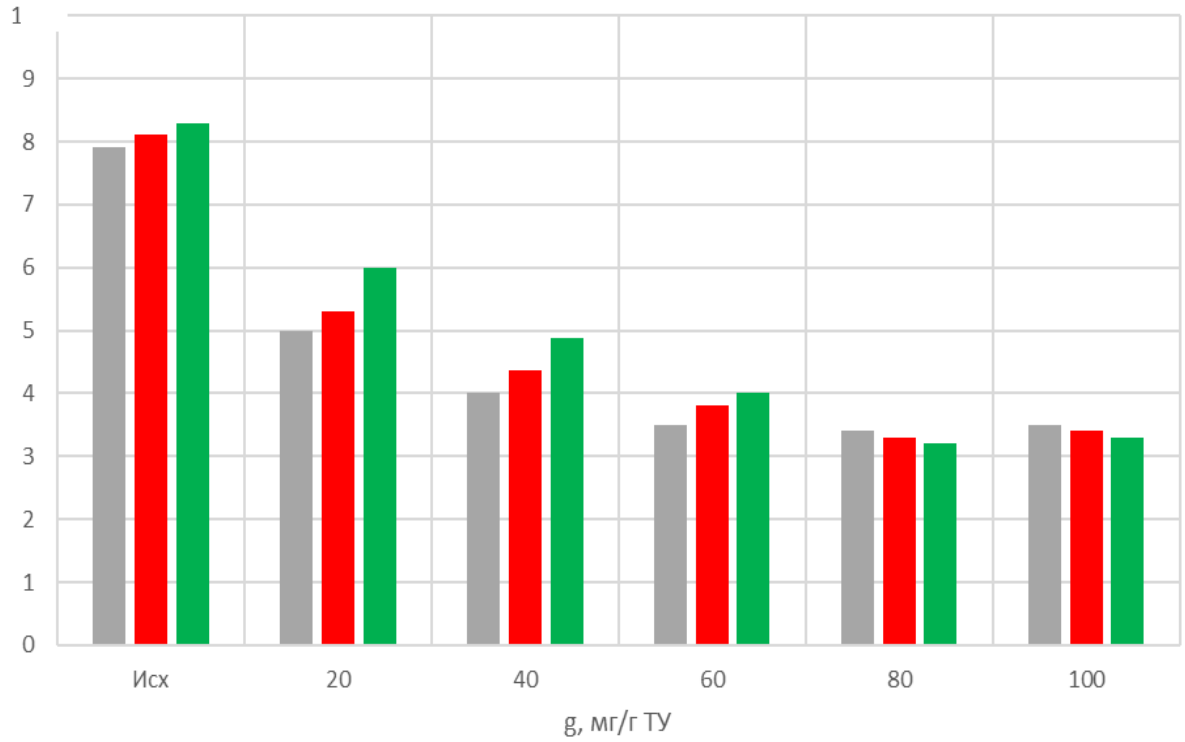


Рисунок 1. Снижение показателя pH водных суспензий ТУ-П234 (серый стобец); ТУ-П324 (красный столбец) и ТУ-П514 (зеленый столбец) в зависимости от удельного расхода озона при ультразвуковой озонолизации

Figure 1. Decrease in pH of aqueous suspensions TU-P234 (gray column); TU-P324 (red column) and TU-P514 (green column) depending on the specific ozone consumption during ultrasonic ozonization

Использование УО при получении устойчивой водной дисперсии печного ТУ позволяет устранить гидрофобность за счет образования на поверхности ТУ кислородосодержащих групп, которые способствуют увеличению поверхностной энергетической активности нанодисперсного наполнителя. Проведение УО нанодисперсного ТУ в водной среде стимулирует формирование на его поверхности кислородсодержащих функциональных групп, включая фенольные, хиноидные, карбоксильные, лактонные и ангидридные соединения. Эти группы способствуют улучшению степени диспергирования углерода в воде. Повышение интенсивности ОУ снижает значение pH водных суспензий ТУ, свидетельствуя о появлении кислых функциональных групп, преимущественно карбоксильных и фенольных, на поверхности обработанного материала. Начальное значение pH водной среды для необработанных образцов составляло около 8,2±0,2. Важно подчеркнуть, что высокодисперсные марки ТУ типа П234 и П324 демонстрируют значительно большее падение значений pH по сравнению с среднедисперсным образцом ТУ-П514. Причина такого различия заключается в увеличенной удельной поверхности высокодисперсных сортов, способствующей активному образованию кислых центров, что повышает общую реакционную способность и энергетический потенциал поверхности частиц.

Рост концентрации карбоксильных, лактонных и фенольных групп (рисунок 2) возрастает по мере увеличения воздействия УО, причем вначале доминирует продуцирование фенольных групп, которые в последствие трансформируются в карбоксильные и лактоновые. При глубокой озонолизации, соответствующей удельному расходу озона свыше 100 мг/г ТУ, наблюдается продуциирование лактоновых групп, которые не обладают кислотными свойствами, но способствуют диспергированию озонолизированного ТУ в водной фазе. Конечная стадия окисления сопровождается образованием ангидридных групп с последующим разложением до углекислого газа.

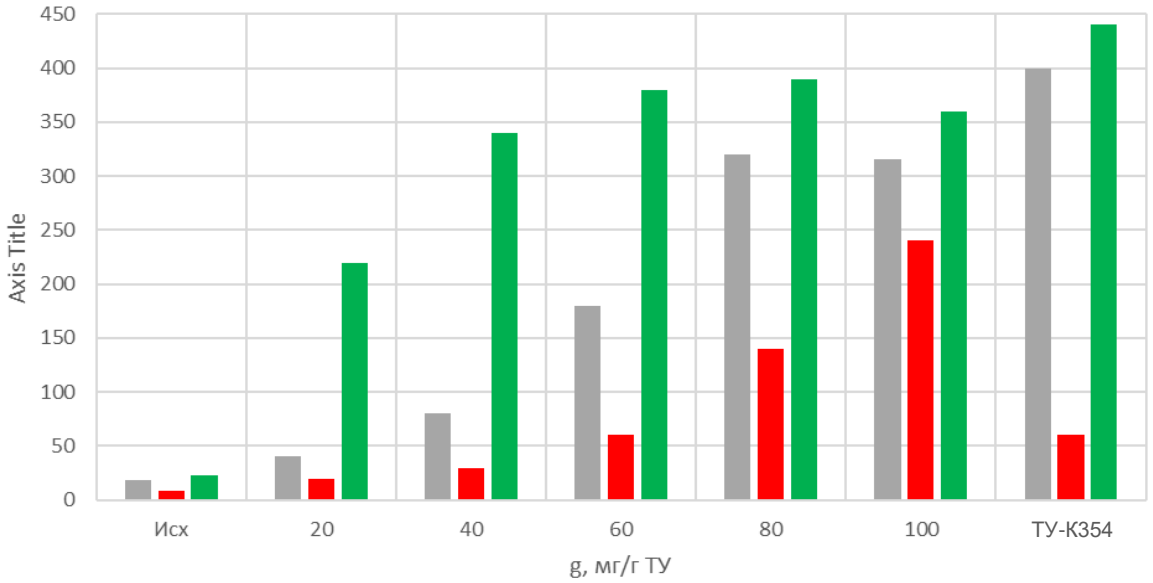


Рисунок 2. Продуцирование кислородосодержащих групп при ультразвуковой озонолизации водной суспензии ТУ-П324 в зависимости от удельного расхода озона: карбоксильные группы – серый столбец, лактоновые – красный столбец, фенольные - зеленый столбец

Figure 2. Production of oxygen-containing groups during ultrasonic ozonization of aqueous suspension TU-P324 depending on the specific ozone consumption: carboxyl groups – gray column, lactone – red column, phenolic – green column

Использование озонолизированного ТУ позволяет получить устойчивую водную дисперсии за счет полярных кислородосодержащих групп, наличие которые обеспечивает равномерное распределение нанодисперного углеродного наполнителя водной среде. Установлено [15], что УО сопровождается разрушением вторичных агрегатов и образованием кислородсодержащих групп на поверхности нанодисперсного ТУ-П324. При получении водной дисперсии нанодисперсного ТУ снижение агрегирования углеродных частиц с более высокой дисперсностью обусловлено наличием полярных кислородосодержащих групп.

Ультразвуковое воздействие оказывает влияние на коллоидно-химические свойства латекса, которые обуславливают агрегативную устойчивость при механических воздействиях и предоопределяют условия выделения каучука, наполненного озонолизированным нанодисперным ТУ, на стадии выделения из латекса. На рис. 3 показано, что ультразвуковое воздействие на бутадиен-стирольный латекс СКС-30АРК с содержанием полимера 10,0 % (мас.) сопровождается увеличением гидродинамического диаметра латексных частиц более чем в 1,5 раза, при этом снижается коэффициент поверхностного натяжения с 67 до 60 мН/м водной фазы латексной системы (рисунок 3).

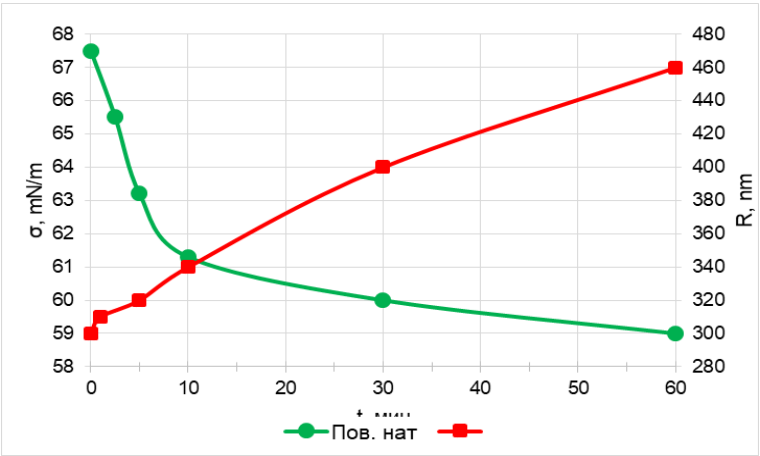


Рисунок 3. Влияние продолжительности ультразвукового воздействия на изменение гидродинамического радиуса частиц и коэффициента поверхностного натяжения латекса с содержанием каучука СКС-30 АРК -10

Figure 3. The influence of the duration of ultrasonic exposure on the change in the hydrodynamic radius of particles and the surface tension coefficient of latex containing SKS-30 ARK-10 rubber

При ультразвуковой обработке латекса СКС-30АРК происходит агломерация его частиц, вызванная частичным высвобождением эмульгаторов с поверхности латексных частиц в водную фазу. По мере уменьшения количества эмульгатора на поверхности частицы начинают активно взаимодействовать гидрофобными областями, оставшимися без защитного покрытия. Воздействие ультразвука также дестабилизирует структуру бутадиен-стирольного латекса путем разрушения гидратных оболочек на поверхности частиц, что существенно сокращает необходимость в применении коагулирующих веществ.

Полученные результаты позволили предложить блок схему (рисунок 4) получения нанокомпозитов с высокой степенью диспергирования озонолизированного высокодисперсного ТУ. Жидкофазное наполнение бутадиен-стирольного каучука озонолизированным нанодисперсным ТУ на стадии выделения из латекса исключает пылеобразование, а главное обеспечивает необходимую степень диспергирования в эластомерной фазе нанокомпозитов при низких энергетических затратах. Образование высокополярных кислородных соединений на поверхности нанодисперсного печного ТУ при УО обеспечивает получение устойчивой водной дисперсии печного ТУ без использования стабилизаторов. При этом резко исключается использование коагулирующих агентов при выделении каучука из латекса за счет создания кислой среды, которая способствует перераспределению эмульгирующих компонентов латекса с поверхности латексных глобул на развитую активную поверхность ТУ.

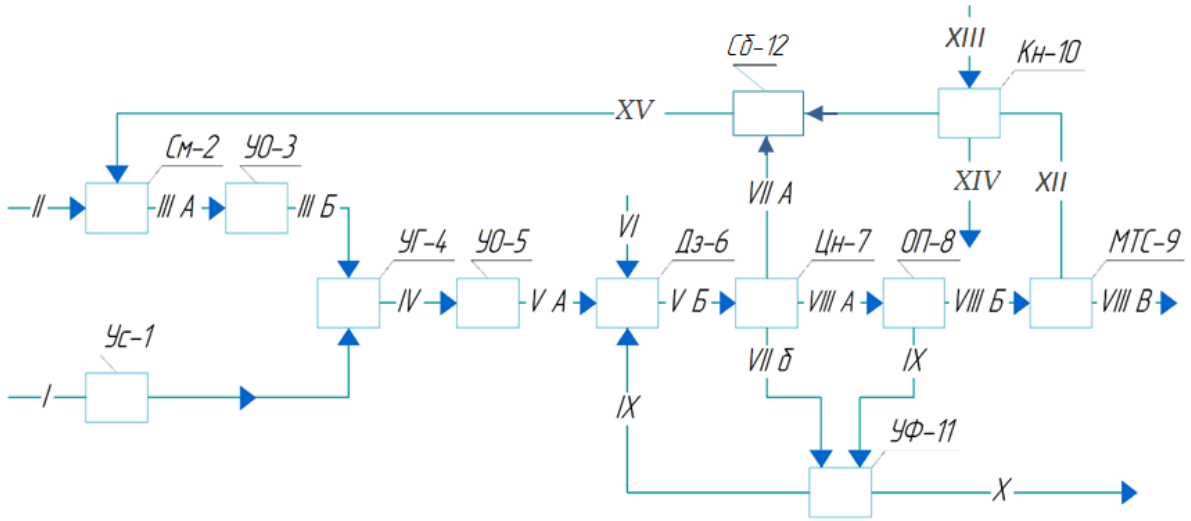


Рисунок 4. Блок схема жидкофазной технологии производства нанокомпозитов с использованием ультразвуковой озонолизации

Обозначение: Ус1 – усреднитель, См2 - смеситель; УО3 и УО5 – ультразвуковые озонолизаторы; УГ4 - ультразвуковой гомогенизатор; Дз6 – дозреватель; Цн7 – центрифуга; ОП8 – отжимной шнековый пресс; МТС9 – механо-термическая шнековая сушилка; Кн10 – кондесатор; УФ11 – ультрафильтрационная установка; Сб12 – сборник.

Потоки: I – латекс; II — ТУ (технический углерод); IIIа – суспензия ТУ; IIIб – дисперсия ТУ; IV - смесь латекса с ТУ; Vа – пульпа нанокомпозита; Vб - пульпа нанокомпозита VI – раствор серной кислоты; VIIа – фильтрат; VIIб – избыток фильтрата; VIIIа– концентрат нанокомпозита; VIIIб– влажный нанокомпозит; VIIIв– нанокомпозит; IX –отжатая вода; X – сток (техническая вода); XI – концентрат; XII – парогазовая смесь; XIII– охлажденная вода; XIV - оборотная вода; XV-возвратный сток (рецикл)

Figure 4. Block diagram of liquid-phase technology for the production of nanocomposites using ultrasonic ozonization

Designation: Ус1 – averager, См2 – mixer; УО3 и УО5 – ultrasonic ozonizers; УГ4 – ultrasonic homogenizer; Дз6 – ripener; Цн7 – centrifuge; ОП8 – screw squeezing press; МТС9 – mechanical-thermal screw dryer; Кн10 – condenser; УФ11 – ultrafiltration unit; Сб12 – collector.

Streams: I – latex; II – TU (carbon black); IIIa – TU suspension; IIIб – TU dispersion; IV – latex and TU mixture; Va – nanocomposite pulp; Vб – nanocomposite pulp; VI – sulfuric acid solution; VIIa – filtrate; VIIб – excess filtrate; VIIIa – nanocomposite concentrate; VIIIб – wet nanocomposite; VIIIв – nanocomposite; IX – squeezed water; X – runoff (process water); XI – concentrate; XII – steam-gas mixture; XIII – cooled water; XIV – recycled water; XV-return flow (recycle)

Жидкофазное совмещение латекса с ТУ, подвергнутого ультразвуковому озонолизу в УО-3, проводится в гомогенизаторе УГ-4 при ультразвуковом воздействии. Формирование нанокомпозита из смеси латекса с ТУ осуществляется в УО-5, где происходит

одновременно функционализация латекса и агломерирование латексных частиц с последующей дестабилизацией латекса за счет перераспределения эмульгирующих компонентов с поверхности глобул латекса на развитую поверхность озонолизированного ТУ. Окончательное формирование нанокомпозита в виде грубодисперсной пульпы происходит в дозревателе Дз-6 при подкислении раствором серной кислоты. Высокая степень разделения пульпы нанокомпозита от водной фазы латексной системы достигается центрифугированием в Цн-7 с последующим механическим обезвоживанием в шнековом прессе ОП-8. Окончательное удаление влаги из нанокомпозита осуществляется механотермической сушкой с использованием высокопроизводительного шнекового агрегата МТС-9. Отделенный фильтрат (VII а) в Цн-7 частично возвращается в См-2 на приготовление суспензии, а избыток фильтрата (VII б) и отжатая вода (IX) в ОП-8 подвергаются ультрафильтрации в УФ-11. Образующийся при ультрафильтрации концентрат (XI) возвращается в рецикл, а фильтрат (X) с низкой степенью загрязненности эмульгирующими агентами целесообразно использовать в качестве технической воды. Парогазовая смесь, образующаяся при удалении влаги в МТС-9, возвращается в рецикл См-2.

Метод жидкофазного введения озонолизированного нанодисперсного технического углерода в бутадиен-стирольный каучук марки СКС-30АРК непосредственно на этапе выделения из латекса обеспечит оптимальные условия для равномерного распределения ультрадисперсных частиц с минимальным размером в структуре вулканизатов. Применение нанокомпозиционных материалов, включающих озонолизированный технический углерод, гарантирует высокое качество диспергирования полярных добавок в резинах и позволяет уменьшить продолжительность технологического цикла изготовления резиновых композиций.

Выводы

Использование УО при получении нанокомпозитов на стадии изготовления водной дисперсии функционализированного нанодисперсного печного ТУ сопровождается разрушением вторичных агрегатов и образованием на его поверхности карбоксильных, фенольных и лактоновых групп, которые повышают энергетическую активность, и как следствие, устраняют гидрофобность поверхности углеродного наполнителя.

Жидкофазное совмещение неполярного бутадиен-стирольного каучука с озонолизированным ТУ, содержащего функциональные кислородные группы, достигается УО. Жидкофазное наполнение эмульсионного каучука озонолизированным нанодисперсным ТУ в ультразвуковом поле сопровождается нарушением агрегативной устойчивости латекса. Дестабилизация латекса происходит за счет уменьшения защитного слоя латексных частиц в результате адсорбции ТУ эмульгирующих компонентов из латексной системы при низких значениях показателя pH, что исключает использование коагулирующих агентов.

Создание жидкофазной технологии при получении нанокомпозитов решает ряд эколого-технологических задач:

- организация безотходного производства при получении нанокомпозитов с повышенной энергетической активностью;
- получение нанокомпозитов с высоким содержанием нанодисперсного ТУ при низком энергопотреблении;
- снижение энергопотребления при изготовлении резиновых смесей с использованием нанокомпозитов;
- исключение пылеобразования при получении и переработке нанокомпозитов;
- функционализация нанодиспесного ТУ при использовании высокотехнологичной УО в водной среде;
- диспергирование нанодисперсного ТУ в водной среде без использования стабилизаторов, способствующих вторичному загрязнению;
- безреагентное выделение наполненного озонолизированным нанодисперсным ТУ каучука из латексной системы;
- отсутствие образования выбросов и стоков.

Литература

1. Moiseevskaya G. V. A comparative investigation of conductive grades of carbon black of the omcarb series and rubber compounds based on natural rubber / Moiseevskaya G. V., Petin A. A., Razd'yakonova G. I., Strizhak E. A., Karavaev M. Y. // International Polymer Science and Technology, 2016, V. 43, N 2. - С. 23–28.

2. Гришин Б.С. Инновационные технологии производства усиленных эластомерных компрозитов / Гришин Б.С. // Каучук и резина, 2016, № 2. - С.58 – 63.

3. Куперман Ф.Е. Натуральные каучуки, содержащие техуглеродные и кремнекислотные наполнители (обзор) / Куперман Ф.Е. // Каучук и резина, 2010, № 2. – С.2.

4. Пат. 6048923 US. МКИ C08K/04.

5. Пат.6040364 US. МКИ C08K3/00.
6. Пат. 6075084 US. МКИ C08K3/00.
7. Пат. 2640522 C2 РФ, МПК C08C 1/00, C08K 3/04, C08L 9/00, C09C 3/04
8. Корчагин В.И. Влияние нанодисперсного технического углерода на агрегативную устойчивость бутадиен-стирольного латекса при жидкофазном наполнении в ультразвуковом поле / Корчагин В.И., Протасов А.В., Киселев И.С. // Журнал прикладной химии, 2023, Т. 96, N 2. – С. 169-176.
9. Гюльмисарян Т. Г. Технический углерод : морфология, свойства, производство / Т. Г. Гюльмисарян, В. М. Капустин, И. П. Левенберг. - Москва : Каучук и Резина, 2017. - 586 с.
10. Краус Дж. Усиление эластомеров. Сборник статей / Краус Дж. – М.: Химия, 1968. – С. 484.
11. Yongpeng Wu. Improved dynamic properties of natural rubber filled with irradiation- modified carbon black / Yongpeng Wu, Shipeng Wen, Jing Shen, Jian Jiang, Shui Hub, Liqun Zhang, Li Liu. // Radiation Physics and Chemistry, 2015, V. 111. – С. 91–97.
12. Yeo E.S. Функционализация и диспергирование углеродных наноматериалов с использованием экологически чистого процесса ультразвукового озонолиза / Yeo E.S., Mathys G.I., Brack N., Thostenson E.T., Rider A.N. // J. Vis. Exp. (123), e55614, doi:10.3791/55614 (2017).
13. Kokhanovskaya O.A. Hermal-oxidative treatment to control the texture characteristics of carbon black / Kokhanovskaya O.A., Baklanova O.N., Knyazheva O.A., Lavrenov A.V., Drozdov V.A., Leont'yeva N.N., Trenikhin M.V., Syrieva A.V. // Chemistry for Sustainable Development, 2023, Т. 31, № 1. - С. 32-39.
14. Boehm H.P. Some aspects of the surface chemistry of carbon blacks and other carbons / Boehm H.P. // Carbon, 1994, V. 32, № 5. – С. 759–769.
15. Корчагин В.И. Жидкофазное наполнение озонолизированным техническим углеродом бутадиен-стирольного каучука на стадии выделения из латекса в ультразвуковом поле / Корчагин В.И., Киселев И.С., Протасов А.В., Студеникина Л.Н. // Журнал прикладной химии, 2025, Т. 98, N 6. - С. 401-410.

References

1. Moiseevskaya G. V. A comparative investigation of conductive grades of carbon black of the omcarb series and rubber compounds based on natural rubber / Moiseevskaya G. V., Petin A. A., Razd'yakonova G. I., Strizhak E. A., Karavaev M. Y. // International Polymer Science and Technology, 2016, V. 43, N 2. - P. 23–28.
2. Grishin B.S. Innovative technologies for the production of reinforced elastomer composites / Grishin B.S. // Rubber and Resin, 2016, N. 2. - P.58 – 63.
3. Kuperman F.E. Natural rubbers containing carbon black and silica fillers (review) / Kuperman F.E. // Rubber and Resin, 2010, N. 2. – P.2.
4. Pat. 6048923 US. MKI S08K/04.
5. Pat. 6040364 US. MKI S08K3/00.
6. Pat. 6075084 US. MKI S08K3/00.
7. Pat. 2640522 C2 RF, MPK C08C 1/00, C08K 3/04, C08L 9/00, C09C 3/04
8. Korchagin V.I. Influence of nanodispersed carbon black on the aggregation stability of butadiene-styrene latex during liquid-phase filling in an ultrasonic field / Korchagin V.I., Protasov A.V., Kiselev I.S. // Journal of Applied Chemistry, 2023, V. 96, N. 2. – P. 169-176.
9. Gyulmisaryan T. G. Technical carbon: morphology, properties, production / T. G. Gyulmisaryan, V. M. Kapustin, I. P. Levenberg. - Moscow: Kauchuk i Rezina, 2017. - 586 p.
10. Kraus J. Strengthening of elastomers. Collection of articles / Kraus J. – Moscow: Chemistry, 1968. – P. 484.
11. Yongpeng Wu. Improved dynamic properties of natural rubber filled with irradiation- modified carbon black / Yongpeng Wu, Shipeng Wen, Jing Shen, Jian Jiang, Shui Hub, Liqun Zhang, Li Liu. // Radiation Physics and Chemistry, 2015, V. 111. – P. 91–97.
12. Yeo E.S. Функционализация и диспергирование углеродных наноматериалов с использованием экологически чистого процесса ультразвукового озонолиза / Yeo E.S., Mathys G.I., Brack N., Thostenson E.T., Rider A.N. // J. Vis. Exp. (123), e55614, doi:10.3791/55614 (2017).
13. Kokhanovskaya O.A. Hermal-oxidative treatment to control the texture characteristics of carbon black / Kokhanovskaya O.A., Baklanova O.N., Knyazheva O.A., Lavrenov A.V., Drozdov V.A., Leont'yeva N.N., Trenikhin M.V., Syrieva A.V. // Chemistry for Sustainable Development, 2023, Т. 31, № 1. - P. 32-39.
14. Boehm H.P. Some aspects of the surface chemistry of carbon blacks and other carbons / Boehm H.P. // Carbon, 1994, V. 32, № 5. – P. 759–769.
15. Korchagin V.I. Liquid-phase filling of butadiene-styrene rubber with ozonolized carbon black at the stage of separation from latex in an ultrasonic field / Korchagin V.I., Kiselev I.S., Protasov A.V., Studenikina L.N. // Journal of Applied Chemistry, 2025, Vol. 98, No. 6. - P. 401-410.

Сведения об авторах

ФИО	*Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)*
Корчагин Владимир Иванович	доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", профессор кафедры Промышленной экологии и техносферной безопасности, kvi-vgta@rambler.ru SPIN-код 9177-9943 ORCID 0000-0001-7212-1627
Протасов Артем Викторович	кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", доцент кафедры Промышленной экологии и техносферной безопасности, pav-vgta86@mail.ru SPIN-код 1411-5030 ORCID 0000-0003-0196-7734
Лимов Алексей Игоревич	студент-магистр, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", магистрант кафедры Промышленной экологии и техносферной безопасности, alex71limov@mail.ru
Санникова Наталья Юрьевна	кандидат химических наук, доцент доцент, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", доцент кафедры Технологии органических соединений и переработки полимеров, cnu@inbox.ru SPIN-код 9425-8735 ORCID 0000-0002-5583-2563
Федоров Дмитрий Юрьевич	студент-магистр, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", магистрант кафедры Промышленной экологии и техносферной безопасности

Authors information

Last name, first name, patronymic	*Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)*
Korchagin Vladimir Ivanovich	doctor of technical sciences, associate professor, Voronezh state university of engineering technologies, professor of the department of Industrial ecology and technosphere safety, kvi-vgta@rambler.ru SPIN-code 9177-9943 ORCID 0000-0001-7212-1627
Protasov Artem Viktorovich	candidate of technical sciences, associate professor, Voronezh state university of engineering technologies, associate professor of the department of Industrial ecology and technosphere safety, pav-vgta86@mail.ru SPIN-code 1411-5030 ORCID 0000-0003-0196-7734
Limov Aleksey Igorevich	master's student, Voronezh state university of engineering technologies, master's student of the department of Industrial ecology and technosphere safety, alex71limov@mail.ru
Sannikova Natalya Yurievna	candidate of chemical sciences, associate professor, Voronezh state university of engineering technologies, associate professor, department of Technology of organic compounds and polymer processing, cnu@inbox.ru SPIN-code 9425-8735 ORCID 0000-0002-5583-2563
Fedorov Dmitry Yurievich	master's student, Voronezh state university of engineering technologies, master's student of the department of Industrial ecology and technosphere safety

статья поступила в редакцию	одобрена после рецензирования	принята к публикации
27.11.2025	11.12.2025	19.12.2025

the article was submitted	approved after reviewing	accepted for publication
27.11.2025	11.12.2025	19.12.2025

Научная статья

УДК 666.3

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КЕРАМИКИ ВК94-1 С ДОБАВКОЙ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ

Александр Андреевич Соколин✉ [1,2] alex-sokol@mail.ru
Николай Александрович Макаров [1] makarov.n.a@muctr.ru

[1]Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, д. 9, стр. 1, Миусская площадь, г. Москва, 125047, Россия
[2]АО НПП «Исток» им. Шокина, ул. Вокзальная, 2а, г. Фрязино, Московская область, 141190, Россия

Аннотация. Работа посвящена исследованию процесса изготовления керамики ВК94-1, модифицированной диоксидом циркония (ZrO_2). Цель исследования заключается в оценке влияния добавки ZrO_2 на основные характеристики материала: кажущуюся плотность, прочность на изгиб и микротвердость, а также изучении действия температурных режимов обжига в процессе спекания. Для анализа были изготовлены образцы с различными концентрациями добавки ВК94-1/ZrO_2: 90/10%, 80/20% и 70/30% при давлении 150 МПа методом изостатического прессования. Обжиг проводили при трех различных температуры (1500°С, 1550°С и 1600°С) и в разных средах обжига.

Ключевые слова: вакуумно-плотная керамика ВК94-1, диоксид циркония, механическая прочность

Для цитирования: Соколин А. А., Макаров Н. А. Исследование свойств керамики ВК94-1 с добавкой диоксида циркония // Инженерные технологии. 2025. № 4 (12). С. 104-110.

Original article

RESEARCH OF THE PROPERTIES OF BK94-1 CERAMICS WITH ZIRCONIUM DIOXIDE ADDITIVE

Aleksandr A. Sokolin✉ [1,2] alex-sokol@mail.ru
Nikolay A. Makarov [1] makarov.n.a@muctr.ru

[1]D. I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 9, build. 1, Miusskaya Square, Moscow, 125047, Russia
[2]AO NPP «Istok» named after Shokin, Vokzalnaya St., 2a, Fryazino, Moscow Region, 141190, Russia

Abstract. This work is devoted to the study of the process of manufacturing VK94-1 ceramics modified with zirconium dioxide (ZrO_2). The purpose of the study is to evaluate the effect of the ZrO_2 additive on the main characteristics of the material: apparent density, bending strength, and microhardness, as well as to study the effect of firing temperature regimes during the sintering process. For analysis, samples were made with different concentrations of the VK94-1/ZrO_2 additive: 90/10%, 80/20%, and 70/30% at a pressure of 150 MPa using isostatic pressing. The samples were fired at three different temperatures (1500°C, 1550°C, and 1600°C) and in different firing environments.

Keywords: VK94-1 vacuum-tight ceramic, zirconium dioxide, mechanical strength

For citation: Sokolin A. A., Makarov N. A. Research of the properties of VK94-1 ceramics with zirconium dioxide additive. Ingenernye tehnologii = Engineering technologies. 2025; (4 (12)): 104-110. (In Russ.).

Введение

Керамические материалы играют ключевую роль в инновационных разработках, поскольку отличаются высокой прочностью, устойчивостью к высоким температурам и агрессивным средам. Особое внимание уделяется созданию вакуумно-плотных керамических деталей, характеризующихся повышенной плотностью структуры и отличающимися превосходными электрофизическими характеристиками [1-3].

Среди наиболее востребованных марок выделяется керамика ВК94-1, имеющая следующий состав: Al_2O_3– 94,4 %, SiO_2– 2,76 %, MnO – 2,35 %, Cr_2O_3– 0,49 % [4].

Благодаря своей вакуумной плотности материал обладает высокими эксплуатационными качествами, такими как повышенная износостойкость, высокая механическая прочность и стойкость к химическим воздействиям (таблица 1) [5].

Одним из ключевых методов повышения механической прочности керамических материалов является добавление в состав армирующей фазы, представляющей собой тетрагональную модификацию диоксида циркония (ZrO_2) [6].

© 2025. Соколин А. А., Макаров Н. А. / Sokolin A. A., Makarov N. A.

Таблица 1. Основные свойства керамики ВК94-1

Table 1. Basic properties of VK94-1 ceramics

Свойство материала / Material property	Значение / Value
Кажущаяся плотность, г/см^3	3,76-3,79
Водопоглощение, %	0,02
Предел прочности при статическом изгибе, МПа	320
Модуль упругости, ГПа	320
Удельное электрическое сопротивление, Ом·см при температуре 100±5°С не менее	10^{13}
Диэлектрическая проницаемость при частоте 10^6 Гц и температуре 25±10°С не более	10,3
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 10^6 Гц и температуре 25±10°С не более	$6 \cdot 10^{-4}$

Введение диоксида циркония в керамические материалы является одной из наиболее популярных методик для повышения их характеристик. Диоксид циркония известен своими исключительными свойствами, включая высокую механическую прочность и твердость. Помимо этого, он обладает превосходной термостойкостью, что делает его незаменимым компонентом для использования в изделиях, предназначенных для работы при высоких температурах [7].

Диоксид циркония оказывает влияние не только на физико-механические свойства, но и на диэлектрические характеристики. Диэлектрическая проницаемость (ε) керамики, включающей оксид циркония, может существенно изменяться в зависимости от количества этой добавки и условий обжига. Это открывает возможности для разработки материалов с определёнными электрическими свойствами, что особенно актуально для использования в электронике и электротехнике [8-9].

Методы исследований

Шихту, в состав которой входит не менее 75% зерен, размер которых составляет до 4 мкм и не более 3%, размер которых больше 10 мкм, использовали в данном исследовании. Также в соответствии с ТУ 6-09-4709-79 осч 9-2 использовали диоксид циркония ZrO_2, стабилизированный оксидом иттрия Y_2O_3 (4,6 мол. %). С помощью метода лазерной абляции были обработаны порошки ВК94-1 и ZrO_2. Сначала их измельчили, затем смешали с помощью волоконного лазера.

Наночастицы с высокой степенью чистоты можно получить методом лазерной абляции за счет удаления твердых материалов с помощью лазера. Однако сложной задачей остается контроль кристаллической структуры этих наночастиц и контроль их размеров. Состав мишени, плотность мощности, длина волны лазера, длительность импульса и внешние условиям – все это влияет на свойства получаемых наночастиц. В этом эксперименте использовали волоконный иттербиевый лазер, у которого длина волны составляет 1062 нм, а скорость его сканирования изменялась от 10 до 4000 мм/с.

Для анализа фазового состава и получения дифрактограммы, использовали РФ-анализатор TDM-20, у которого длина волны рентгеновского излучения составляет 0,2 нм. Просвечивающий микроскоп ТМ-12М и сканирующий электронный микроскоп SM-50X применялись для исследования микроструктуры порошков и картирования элементного состава.

Кажущуюся плотность и открытую пористость материалов после обжига определяли с помощью метода гидростатического взвешивания, а с помощью пикнометра определяли истинную плотность. Отношение средней плотности к истинной является показателем относительной плотности материала. На разрывной машине Р 50 определили механическую прочность на трехточечный изгиб, а для сравнения с твердостью керамики ВК94-1, была определена микротвердость по Виккерсу для полученных образцов с помощью микротвердомера ПМТ-3М.

Обсуждение результатов

После применения методов электронно-зондового микроанализа и сканирующей электронной микроскопии, было представлено распределение химических элементов в образце шихты марки ВК94-1, что видно на рисунке 1. Данные методики обеспечивают возможность детализированного отображения распределения интенсивности рентгеновского излучения, связанного с ключевыми элементами на уровне отдельных пикселей. Карта распределения интенсивности рентгеновского излучения демонстрирует участки с повышенной концентрацией элементов, что обусловлено прямой зависимостью интенсивности излучения от количества элементов в исследуемой области при одинаковых условиях электронного облучения.

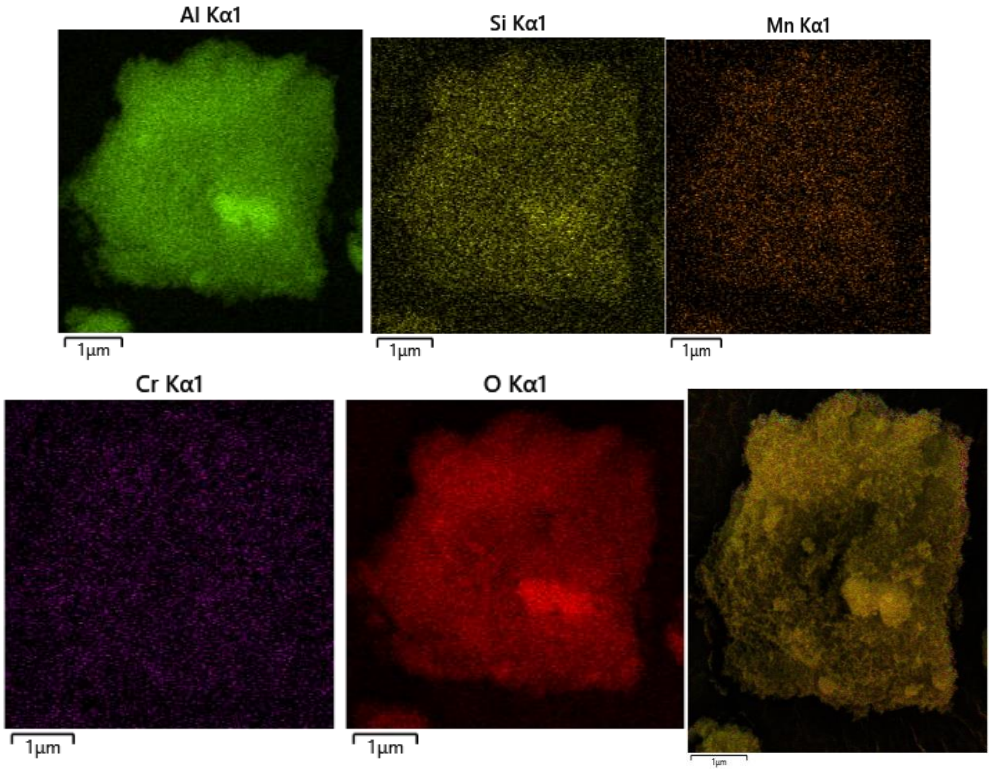


Рисунок 1. Картирование элементного состава ВК94-1, полученного лазерной абляцией

Figure 1. Mapping of the elemental composition of VK94-1 obtained by laser ablation

Неоднородное распределение химических элементов зафиксировано в образце шихты ВК94-1. Участки алюминия и кислорода соответствуют участкам с увеличенной концентрацией этих элементов, в связи с их повышенной интенсивностью окраски, как показал анализ.

На рисунке 2 показана микроструктура порошка ВК94-1, частицы которого имеют размеры от 0,5 мкм до 5,7 мкм.

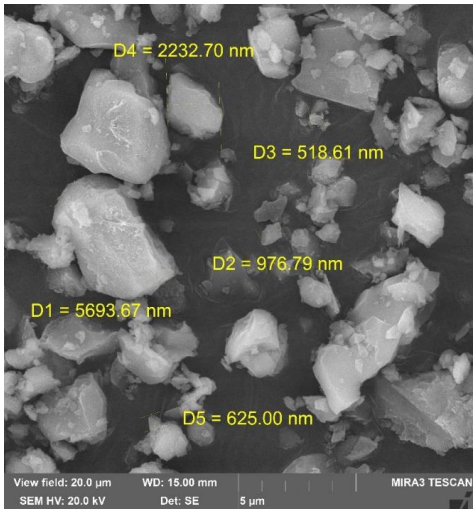


Рисунок 2. СЭМ-изображение шихты марки ВК94-1

Figure 2. SEM image of the VK94-1 charge

На технологический процесс спекания большое влияние оказывает размер частиц в порошковой смеси. Лишь небольшая часть частиц превышает размер в 5 мкм, в основном средний размер зерен варьируется от 1 до 3 мкм.

На рисунке 3 представлена микроструктура порошка ВК94-1 после лазерной абляции, где средний размер частиц составляет 150 нм.

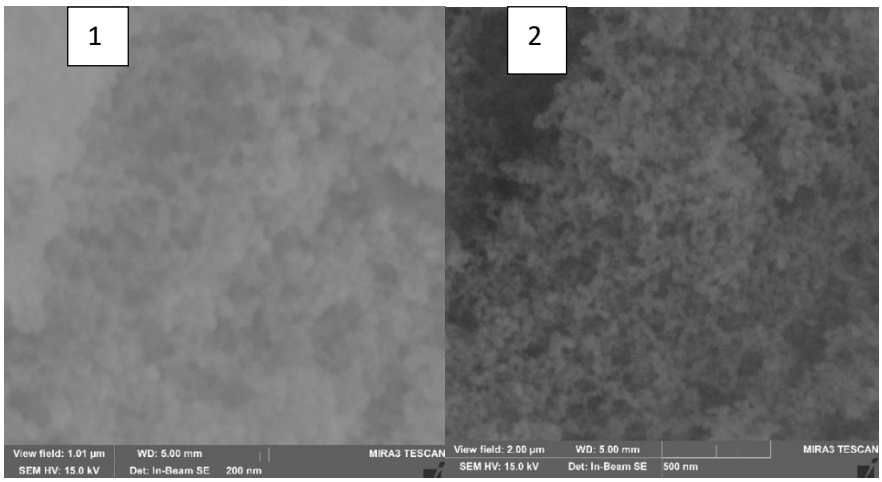


Рисунок 3. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) шихты ВК94-1, измельченной методом лазерной абляции при разных увеличениях: 1 – 20х, 2 – 50х

Figure 3. Scanning electron microscopy (SEM) of VK94-1 charge crushed by laser ablation at different magnifications: 1 – 20x, 2 – 50x

Лазерная абляция представляет собой высокоэффективную технологию, предназначенную для достижения среднедисперсного размера частиц в пределах 150 нанометров. Данный метод является предпочтительным при необходимости получения мелкодисперсных материалов в промышленных масштабах.

В соответствии с данными, представленными на рисунке 4, можно констатировать, что преобладающим компонентом является кубическая модификация оксида алюминия (Al_2O_3) в гамма-фазе.

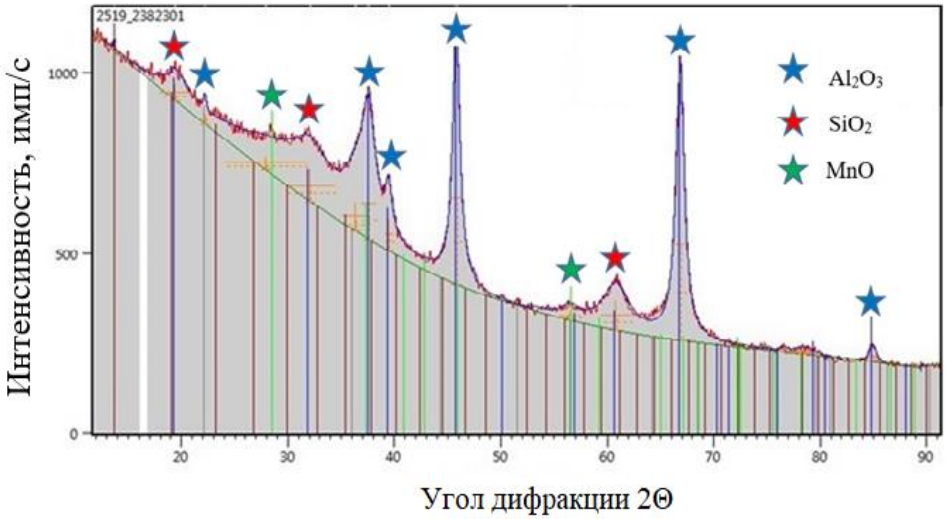


Рисунок 4. Рентгеновская дифрактограмма шихты ВК94-1, полученной методом лазерной абляции

Figure 4. X-ray diffraction pattern of VK94-1 mixture obtained by laser ablation

Кроме того, в ходе исследования были обнаружены тетрагональная модификация оксида марганца (II) (MnO) и гексагональная форма диоксида кремния (SiO_2). Отмечается, что фаза хрома (III) оксида (Cr_2O_3) не была выявлена в связи с её минимальным содержанием в образце, составляющим 0,49 мас.% в смеси ВК94-1.

Исходный порошок ВК94-1 имеет дисперсный состав с размером частиц в диапазоне от 0,5 до 5,7 микрометров. После проведения лазерной абляции наблюдается значительное снижение среднего размера частиц до 150 нанометров. Данный факт подтверждает эффективность метода лазерной абляции для производства материалов с высокой степенью дисперсности.

Также с помощью метода лазерной абляции был измельчен диоксид циркония ZrO_2, стабилизированный оксидом иттрия Y_2O_3. Далее этим же методом в разных соотношениях произвели смешивание шихты ВК94-1 с диоксидом циркония (с содержанием 4,6 мол. % Y_2O_3). В таблице 2 представлены смеси этих составов.

Таблица 2. Составы смесей ВК94-1-ZrO_2

Table 2. Composition of VK94-1-ZrO_2 mixtures

Состав смеси / Composition of the mixture	Концентрация исходных компонентов, мас. % / Concentration of starting components, wt.%	
	ВК94-1	ZrO_2 (Y_2O_3 4,6 мол. %)
А	90	10
Б	80	20
В	70	30

На рисунке 5 демонстрируется комплексное трехмерное распределение компонентов в исследуемом образце. Уровень интенсивности сигнала, зафиксированный на данной карте, соответствует чистому сигналу от элемента, полученному в результате исключения фоновых помех.

На рисунке 6 видна микроструктура исходных порошков и шихты после смешения методом лазерной абляции.

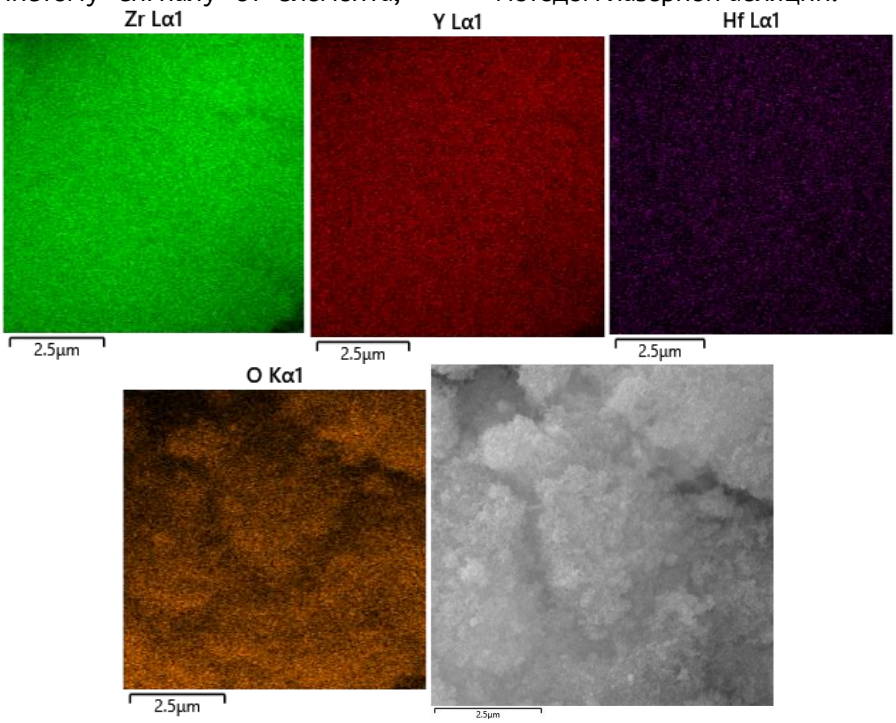


Рисунок 5. Картирование элементного состава ZrO_2, стабилизированного Y_2O_3

Figure 5. Mapping of the elemental composition of ZrO_2 stabilized by Y_2O_3

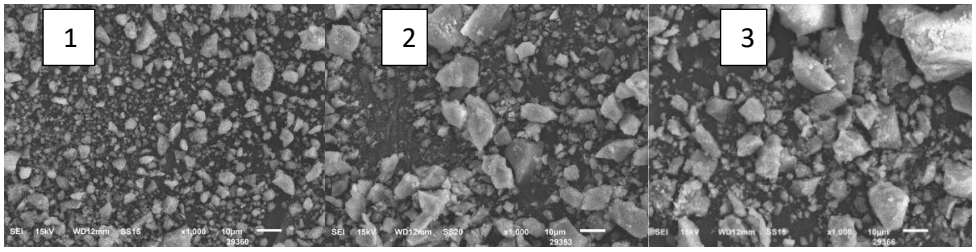


Рисунок 6. Фотографии микроструктуры порошков: 1 – А, 2 – Б, 3 – В

Figure 6. Photos of the microstructure of the powders: 1 – A, 2 – B, 3 – C

Средний размер агрегатов смесей ВК94-1 и ZrO_2 после измельчения составил 12,7 мкм из-за объединения частиц.

В состав смеси было включено временное технологическое связующее: поливиниловый спирт (ПВС) в количестве 25% от общей массы с целью повышения эффективности диспергирования порошковой фракции. Процесс введения ПВС осуществлялся до момента начала агломерации порошка, после чего материал подвергался процедуре просеивания через сито с размером ячеек 0,25 мм для удаления образовавшихся комков. Формование образцов проводилось методом изостатического прессования при давлении 150 МПа, что позволяло исключить последующую операцию выжига.

Процесс синтеза керамических композиций с высоким содержанием оксида алюминия, составляющим от 90 до 98 процентов, способствует образованию аморфной фазы. Данная фаза играет ключевую роль в регулировании процессов транспортировки массы и кристаллизации. Для обеспечения эффективного управления диффузионными процессами и улучшения эксплуатационных свойств конечного продукта, в состав керамики вводят диоксид циркония.

Обжиг во всех случаях был с выдержкой 3 часа при всех температурах: 1500, 1550 и 1600 °С. Были использованы три различные среды обжига: окислительная, вакуум (давление газа $5 \cdot 10^{-4}$ Па) и инертный газ (аргон).

Одним из главных свойств керамики, которое определяет его долговечность и износостойкость, является твердость. Поэтому была определена твердость полученной керамики по Виккерсу при двух нагрузках: 0,05 кгс и 0,1 кгс для данного исследования.

Максимальную микротвердость 2688 кгс/мм² продемонстрировал образец Б. Это говорит о том, что в его составе находится оптимальный и самый выгодный подбор компонентов. В отличие от него, у образца А более низкие значения микротвердости, что, скорее всего, связано с его составом: в нем находится низкое содержание диоксида циркония.

Выводы

При температуре обжига 1600°С значения открытой пористости образцов керамики ВК94-1 с добавкой различных концентраций диоксида циркония (10, 20 и 30 масс. %) показывают тенденцию к снижению. С увеличением добавки ZrO_2 до 30 масс. % $П_о$ уменьшается с 0,2 % до 0% на воздухе (в окислительной среде). Достигнуть нулевой открытой пористости не получилось при двух других температурах обжига: 1500 и 1550°С.

Из-за высокой плотности диоксида циркония (5,70-6,00 г/см^3) кажущаяся плотность керамики возрастает с увеличением его содержания. После обжига на воздухе, механическая прочность на изгиб оказалась самая большая и составила в среднем 350 МПа. Это связано с полным удалением временной технологической связки и зарастанием открытых пор, что и увеличивает механическую прочность.

При добавлении 20 масс.% ZrO_2 в керамику получились самые высокие показатели микротвердости. Это связано благодаря формированию наиболее однородной поверхности после обжига и оптимальным соотношением компонентов.

Наименее эффективные результаты при разных температурах были получены после обжига в вакуумной среде. Снижение механической прочности, а также кажущейся плотности и увеличение открытой пористости по сравнению с другими образцами, обожженными в других средах, стали причинами таких результатов, а также это привело к процессам вспучивания и миграции связующего вещества на поверхность образца.

По сравнению с обжигом в вакууме и в окислительной среде, результаты обжига в инертном газе (аргоне) получились средними по всем значениям. В этом случае, как и в вакууме, наблюдалось вспучивание ВТС и его выход на поверхность.

Неравномерное распределение временной технологической связки было зафиксировано при подготовке шихты материала. Механическая прочность обожженных образцов оказалась небольшой из-за неполного удаления связующего материала при обжиге в вакууме. Использование других ВТС, таких как парафин или полиэтиленгликоль предлагается использовать в дальнейшем для улучшения основных свойств. Также для полного удаления ВТС из образцов целесообразно добавление такой технологической операции как «выжиг» перед обжигом образцов.

Литература

1. Свирская С. Н., Панич А. А., Карюков Е. В. и др. Технологические варианты изготовления вакуумно-плотной керамики // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион.Технические науки. 2017. №4 (196). С.118-122.

2. Амелина О., Нестеров С. Вакуум-плотная корундовая керамика на основеультрадисперсных порошков // Наноиндустрия. 2010. №5 С.40-41

3. Дерябин Д. В., Алимова Е. А., Смирнов Г. А. и др. Качество слоя металлизации керамики марок ВК94, ВК95 // Надежностьи качество сложных систем. 2018. № 2 (22). С.55–60.

4. Батыгин В. Н., Метелкин И. И., Решетников А. М. Вакуумно-плотная керамика и ее спаи с металлами. Москва, «Энергия», 1973. 408 с.

5. Ермаков П. Н., Андрианов Н. Т. Влияние некоторых факторов на качество металлизационных покрытий керамики ВК94-1 // Электронная техника. 1982. сер. 14. С.22-24

6. Лукин Е. С., Попова Н. А., Здвижкова Н. И. и др. Прочная керамика на основе оксида

алюминия и диоксида циркония // Стекло и керамика. 1993. № 9-10. С. 25–30.

7. Макаров Н. А., Лукин Е. С., Попова Н. А. и др. Керамические материалы на основе оксида алюминия с добавками эвтектических составов // Материалы науч. - практ. конф.: Керамические материалы: производство и применение. М.: ВИМИ, 2003. С.10–12.

8. Лукин Е. С., Макаров Н. А. Особенности выбора добавок в технологии корундовой керамики с пониженной температурой спекания // Огнеупоры и техническая керамика. 1999. № 9. С. 10–13.

9. Евтеев А. А., Лемешев Д. О., Житнюк С. В., Макаров Н. А. Керамика в системе ZrO_2–Al_2O_3 с добавками эвтектических составов // Стекло и керамика. 2011. № 8. С. 23–27.

References

1. Svirskaya S. N., Panich A. A., Karyukov E. V., et al. Technological options for manufacturing vacuum-tight ceramics // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskiye nauki. 2017. No. 4 (196). Pp. 118-122.

2. Amelina O., Nesterov S. Vacuum-tight corundum ceramics based on ultrafine powders // Nanoindustriya. 2010. No. 5, pp. 40-41

3. Deryabin D. V., Alimova E. A., Smirnov G. A., et al. Quality of the metallization layer of VK94 and VK95 ceramics // Reliability and Quality of Complex Systems. 2018. No. 2 (22). Pp. 55–60.

4. Batygin V. N., Metelkin I. I., Reshetnikov A. M. Vacuum-tight ceramics and their joints with metals. Moscow, Energiya, 1973. 408 p.

5. Ermakov P. N., Andrianov N. T. Influence of some factors on the quality of metallization coatings of VK94-1 ceramics // Electronic engineering. 1982. ser. 14. P.22-24

6. Lukin E. S., Popova N. A., Zdvizhkova N. I., et al. Durable ceramics based on aluminum oxide and zirconium dioxide // Glass and Ceramics. 1993. No. 9-10. Pp. 25–30.

7. Makarov N. A., Lukin E. S., Popova N. A., et al. Ceramic materials based on aluminum oxide with additives of eutectic compositions // Materials of the Scientific Conference. - Practical Conference: Ceramic Materials: Production and Application. Moscow: VIMI, 2003, pp. 10-12.

8. Lukin, E. S., and Makarov, N. A. Features of Additive Selection in the Technology of Corundum Ceramics with Reduced Sintering Temperature. Refractories and Technical Ceramics. 1999. No. 9. Pp. 10–13.

9. Evteev A. A., Lemeshev D. O., Zhitnyuk S. V., Makarov N. A. Ceramics in the ZrO_2–Al_2O_3 system with additives of eutectic compositions // Glass and Ceramics. 2011. No. 8. Pp. 23–27.

Сведения об авторах

ФИО	*Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)*
Соколин Александр Андреевич	АО НПП «Исток» имени Шокина, alex-sokol@mail.ru
Макаров Николай Александрович	доктор технических наук, профессор, Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, makarov.n.a@muctr.ru ORCID 0000-0002-4215-1048 SPIN-код 6920-8924 SCOPUS 7005187022

Authors information

Last name, first name, patronymic	*Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)*
Sokolin Alexandr Andreevich	AO NPP «Istok» named after Shokin, alex-sokol@mail.ru
Makarov Nikolay Alexandrovich	D. I. Mendeleev Russian University of Chemistry and Technology, makarov.n.a@muctr.ru ORCID 0000-0002-4215-1048 SPIN-code 6920-8924 SCOPUS 7005187022

статья поступила в редакцию	одобрена после рецензирования	принята к публикации
14.10.2025	30.10.2025	12.11.2025

the article was submitted	approved after reviewing	accepted for publication
14.10.2025	30.10.2025	12.11.2025

Научная статья

УДК 662.749.33

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООКИСЛЕНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОДУКТОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КАРБОНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОДНОГО ПЕКА

Родион Юрьевич Ковалев✉ [1] kovaleviuhm@yandex.ru
Андрей Павлович Никитин [1] nikitinandreyp@yandex.ru

[1]ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН», пр-т Советский, 18, г. Кемерово, Кемеровская область – Кузбасс, 650000, Россия

Аннотация. Исследовано влияние термоокислительной модификации электродного пека марки В на его коксующиеся свойства. Целью работы являлось установление корреляции между длительностью термоокисления и выходом пекового карбонизата, полученного в процессе низкотемпературной карбонизации при 570 °С и 730 °С. Дополнительно изучено влияние введения неорганических добавок в пек на выход карбонизата. Показано, что комбинированное воздействие низкотемпературного термоокисления и химической модификации позволяет целенаправленно регулировать индекс сбрасывания получаемых пековых карбонизатов. Полученные результаты демонстрируют перспективность применения термоокисления для управления коксующимися свойствами пеков связующих с целью оптимизации выхода целевых продуктов карбонизации.

Ключевые слова: электродный пек, пек связующее, модификация пека, термоокисление, карбонизация, выход карбонизатов.

Для цитирования: Ковалев Р. Ю., Никитин А. П. Влияние термоокисления на прочностные характеристики продуктов низкотемпературной карбонизации электродного пека // Инженерные технологии. 2025. № 4 (12). С. 111-118.

Original article

EFFECT OF THERMO-OXIDATION ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF LOW-TEMPERATURE CARBONIZATION PRODUCTS FROM ELECTRODE PITCH

Rodion Yu. Kovalev✉ [1] kovaleviuhm@yandex.ru
Andrey P. Nikitin [1] nikitinandreyp@yandex.ru

[1]Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS, Sovetsky Ave., 18, Kemerovo, Kemerovo Region – Kuzbass, 650000, Russia

Abstract. The influence of thermal oxidation modification of electrode pitch grade B on its coking properties was investigated. The aim of this work was to establish a correlation between the duration of thermal oxidation and the yield of pitch-based carburate obtained via low-temperature carbonization at 570°C and 730°C. The effect of introducing inorganic additives into the pitch on the carburate yield was additionally studied. It is shown that the combined effect of low-temperature thermal oxidation and chemical modification allows for precise regulation of the dropping point index of the resulting pitch carburates. The obtained results demonstrate the potential of using thermal oxidation to control the coking properties of binder pitches to optimize the yield of target carbonization products.

Keywords: electrode pitch, heat treatment, thermal oxidation, carbonation, yield of carbonates, technical analysis of carbonates.

For citation: Kovalev R. Yu., Nikitin A. P. Effect of thermo-oxidation on the strength characteristics of low-temperature carbonization products from electrode pitch. Ingenernye tehnologii = Engineering technologies. 2025; (4 (12)): 111-118. (In Russ.).

Введение

Каменноугольный пек находит применение в качестве связующего при производстве электродов, анодной массы и доменных огнеупоров. Для электродов используют среднетемпературные и электродные пеки, для анодной массы – электродные пеки марок Б1, В и В1 [1], а также пеки с повышенной температурой размягчения ($T_р$ = 110–120°С) [2]. В случае доменных огнеупоров применяют высокотемпературные пеки [3].

Одним из эффективных направлений модификации свойств электродного пека является термическая обработка, которая, согласно исследованиям [4, 5], обеспечивает увеличение $T_р$ среднетемпературных пеков в широком диапазоне температур. В работе [5] показано, что обработка при 300 °С в течение 5 ч увеличивает выход карбонизата на 5 %. Частным случаем термической обработки является термоокисление (ТО) – обработка пека в среде кислорода воздуха [6, 7].

© 2025. Ковалев Р. Ю., Никитин А. П. / Kovalev R. Yu., Nikitin A. P.

Другим перспективным методом модификации является химическая обработка. Например, введение диоксида кремния (SiO_2) снижает выход летучих продуктов при температурах выше 400°C и уменьшает в их составе содержание метана с 26,8 до 21,2 % и смеси монооксида углерода с и этиленом с 22,9 до 2,4 % [8].

Значительное влияние на выход карбонизата оказывают и другие неорганические добавки. Так, введение в пек 2 мас.% $Fe_2(C_2O_4)_3 \cdot 5H_2O$ повышает выход карбонизата с 64 до 69% и снижает содержание водорода в нем с 1,59 до 1,40 % [9]. Аналогичный эффект по выходу карбонизата (до 69%) наблюдается при добавлении $Ni(CH_3COO)_2$ [9]. Согласно [10], добавка $Fe_2(C_2O_4)_3 \cdot 5H_2O$ подавляет выделение летучих веществ в интервале 200–300°C. В работе [11] показано, что данная добавка, введенная в шихту пека и кокса, снижает выход бенз[а]пирена в процессе карбонизации при 125–350°C.

Эффективность демонстрируют и другие модификаторы: введение 5% перхлората аммония (NH_4ClO_4) в электродный пек марки В с последующей термической обработкой (350°C, 1 ч) увеличивает выход карбонизата на 15% [12], а добавка 9% белой сажи – на 9% [13]. Введение $Ni(HCOO)_2 \cdot 2H_2O$ с термообработкой повышает выход карбонизата на 10% [13].

Настоящее исследование направлено на развитие технологии получения пековых полукоксов за счет изучения влияния низкотемпературного ТО электродного пека марки В и введения неорганических добавок на выход продукта его низкотемпературной карбонизации. Развитие данного подхода позволит повысить выход целевого продукта.

Научная новизна заключается в том, что впервые комплексно исследуется влияние добавок $Ni(HCOO)_2 \cdot 2H_2O$ и NH_4ClO_4 на выход карбонизата из электродного пека марки В без проведения термообработки, а также на его прочностные характеристики.

В соответствии с поставленной проблемой и научной новизной, сформулированы цели работы:

1. Получение продуктов низкотемпературной карбонизации исходного электродного пека и продуктов его ТО.

2. Установление влияния различных неорганических добавок на выход пекового карбонизата.

Материалы и методы исследования

Исследовали низкотемпературную карбонизацию электродного пека марки В (АО «Алтай-Кокс», г. Заринск) и продуктов его ТО, синтезированных при 260–300°C [14]. Исходный пек и продукты его модификации характеризовали по ключевым технологическим показателям (таблица 1). Пеки марок В1 и $П_{107}$ получены ТО исходного сырья продолжительностью 10 и 90 минут соответственно.

Таблица 1 Характеристики полученных продуктов термоокисления электродного пека марки В [14-15]

Table 1 Characteristics of the resulting thermo-oxidation products of electrode pitch grade C [14-15]

Показатель / Indicator	Электродный пек марки В / Electrode pitch grade B	Электродный пек марки В1 / Electrode pitch grade B1	Пек $П_{107}$ / Peck P_{107}
Температура размягчения $T_р$, °C	91,0	93,0	107,0
Содержание α-фракции, %	34,3	35,1	37,4
Содержание $α_1$-фракции, %	7,5	7,5	7,5

Процесс карбонизации проводили в муфельной печи с использованием двух режимов: 1 – изотермический отжиг при 570°C в течение 2 часов с последующим охлаждением на воздухе; 2 – градиентный нагрев от 570°C до 730°C со скоростью 160°C/ч, выдержкой при конечной температуре 30 мин и медленным охлаждением (17 ч).

Модификацию пека выполняли с использованием NH_4ClO_4 и $Ni(HCOO)_2 \cdot 2H_2O$. Исходное сырье измельчали до фракции <200 мкм, смешивали с добавкой (10 г пека + модификатор) в герметичном тигле и карбонизировали по режиму 2. Для количественной оценки результатов определяли выход карбонизата К (массовая доля продукта относительно исходного пека); зольность A^d по ГОСТ Р 55661-2013; индекс сбрасывания S_{10} (доля фракции >10 мм материала после механического воздействия (сбрасывание с h = 1,8 м).

Результаты и обсуждение

Влияние ТО на свойства карбонизатов. Анализ элементного состава продуктов ТО по данным работы [16] показал увеличение параметра ($N^a+S^a+O^a$) с ростом продолжительности окисления (рисунок 1), что свидетельствует о накоплении кислородсодержащих групп в модифицированных пеках.

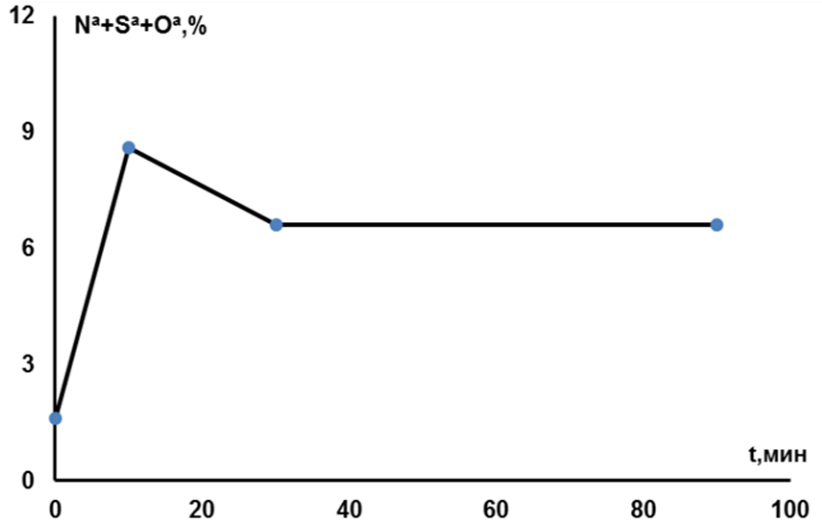


Рисунок 1 Зависимость содержания суммарного азота, серы и кислорода $N^a+S^a+O^a$, % в продуктах низкотемпературного ТО электродного пека марки В, в зависимости от длительности процесса [16]

Figure 1 Dependence of the content of total nitrogen, sulfur and oxygen $N^a+S^a+O^a$, % in products of low-temperature TO electrode pitch of category C depending on the duration of the process [16]

На рисунке 2 представлена зависимость выхода карбонизатов (К) от длительности предварительного ТО электродного пека марки В. Наблюдается устойчивый рост выхода продукта с увеличением времени окисления для обоих режимов карбонизации (570°С и 730°С). Этот эффект коррелирует с ростом содержания α-фракции в модифицированных пеках (таблица 1) и может быть объяснен увеличением доли высокомолекулярных компонентов, способствующих образованию карбонизата.

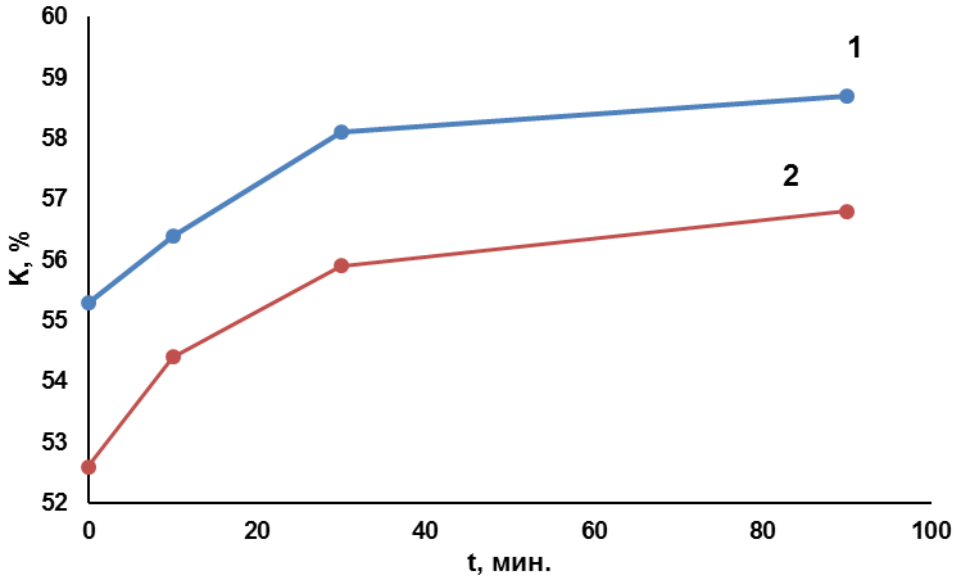


Рисунок 2. Зависимость К, от длительности низкотемпературного термоокисления электродного пека марки В. 1-для режима 1 при 570 °С; 2-для режима 2 при 730 °С

Figure 2. Dependence of K on the duration of low-temperature thermooxidation of electrode pitch grade C. 1-for mode 1 at 570 °C; 2-for mode 2 at 730 °C

Более высокие значения выхода при 570°С по сравнению с 730°С связаны с меньшей глубиной пиролиза при пониженной температуре. Анализ прочностных характеристик показал, что значения индекса сбрасывания S_{10} для всех исследованных образцов превышают 90%. Минимальное значение S_{10} = 93,8% зафиксировано для карбонизата, полученного при 570°С (режим 1) из пека марки В1 (рисунок 3), что может объясняться недостаточной температурой карбонизации для формирования прочной структуры при наличии кислородсодержащих групп.

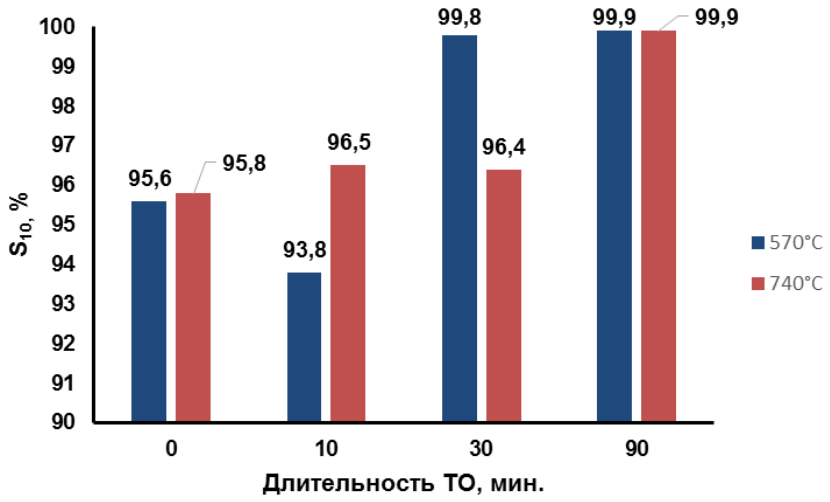


Рисунок 3. Зависимость индекса сбрасывания S_{10} пековых карбонизатов для различных длительностей ТО

Figure 3. Dependence of the S_{10} drop-off index of tar carbonizates for different TO durations

Для карбонизатов, полученных при 730°C (режим 2) из продуктов ТО (10 и 30 мин), значительного роста прочности не наблюдалось. Значение S_{10} = 99,8% достигнуто для образца из продукта ТО при τ = 30 мин, карбонизированного при 570°C с выдержкой 2 часа, что подтверждает эффективность длительной низкотемпературной карбонизации для получения высокопрочных материалов. Увеличение времени ТО до 90 минут значительного прироста в прочностных характеристиках кабронизатов не дало.

Влияние химической модификации на характеристики карбонизатов. Результаты исследований модифицированных пеков представлены в таблице 2. Введены следующие обозначения: П – исходный электродный пек марки В; П+ПА (X%) – пек с добавкой перхлората аммония; П+Ni (X%) – пек с добавкой $Ni(HCOO_2 \cdot 2H_2O$, где X – массовое содержание включений.

Таблица 2. Характеристики модифицированных пеков и карбонизатов

Table 2. Characteristics of modified pitches and carbonates

№	Название / Name	$K_{730°C}$%	S_{10}, %	A^d,%
1	Исходный пек	52,0	95,6	0,25
2	П+ПА (4,3 %)	57,2	96,8	1,64
3	П+Ni (4,1%)	58,9	99,6	2,31

Добавка перхлората аммония увеличивает выход карбонизата на 5,2% и прочность на 1,2%. Согласно литературным данным [17, 18], термическое разложение NH_4ClO_4 при T > 200°C сопровождается выделением кислорода, который может участвовать в реакциях сшивания углеводородных молекул пека с образованием высокомолекулярных структур [19], что приводит к увеличению выхода карбонизата.

Введение формиата никеля повышает выход карбонизата на 6,9% и прочность на 4,0%. При карбонизации $Ni(HCOO)_2 \cdot 2H_2O$ разлагается с образованием CO, CO_2 и H_2 [20, 21]. Продукты разложения участвуют в процессах полимеризации, способствуя образованию высокомолекулярных компонентов и увеличению выхода карбонизата.

Выводы

В результате комплексного исследования процессов низкотемпературной карбонизации электродного пека марки В и его модифицированных форм установлены закономерности влияния ТО обработки и химической модификации на выход и прочностные характеристики карбонизатов. Экспериментально подтверждено:

– предварительное ТО пека приводит к статистически значимому увеличению выхода карбонизата на 5-8% по сравнению с исходным сырьем, что коррелирует с ростом содержания α-фракции в модифицированных материалах. При этом максимальные значения индекса сбрасывания достигаются при карбонизации продуктов 30-минутного термоокисления в режиме 570°C с двухчасовой выдержкой;

– химическая модификация неорганическими добавками демонстрирует дифференцированное влияние на характеристики карбонизатов. Введение 4.3% перхлората аммония увеличивает выход карбонизата до 57.2% (прирост 5.2%) и индекс сбрасывания до 96.8%. Использование 4.1% формиата никеля обеспечивает максимальный выход карбонизата 58.9% (прирост 6.9%) и прочностные показатели S_{10} = 99.6%;

– установлены механизмы модифицирующего действия: для перхлората аммония – окислительное сшивание макромолекул пека под действием выделяющегося кислорода; для формиата никеля – каталитическая полимеризация в восстановительной среде продуктов разложения с образованием высокомолекулярных структур.

Полученные результаты представляют практическую ценность для оптимизации технологий получения углеродных материалов с заданными структурно-механическими характеристиками.

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания ИУХМ ФИЦ УУХ СО РАН №124041100047-4.

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Chemistry and Mathematics of the Federal Research Center of Chemistry and Mathematics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences No. 124041100047-4.

Литература

1. Уткин Ю.А. Об оценке качества каменноугольного пека как связующего в производстве анодов / Ю. А. Уткин, Э. А. Янко, Э. Я. Соловейчик, В. М. Страхов // Кокс и химия. – 2012. – № 9. – С. 17-21.

2. Ицков М.Л, Свобода Р.В., Фролов В.И. Влияние температуры размягчения связующих материалов на эксплутационные характеристики анодной массы// Цветные металлы. –1983. –12. –С.33-35.

3. Базегский, А. Е. Исследование процесса термического растворения угля с целью получения связующего для огнеупорных масс. Сообщение 1. Получение связующего / А. Е. Базегский, М. Б. Школлер // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2016. – Т. 59, № 8. – С. 517-522.

4. Ковалев, Р. Ю. Термообработка среднетемпературных электродных каменноугольных пеков / Р. Ю. Ковалев, Т. М. Наймушина, А. П. Никитин // Материалы во внешних полях : труды XIII Международного онлайн-симпозиума, Новокузнецк, 20 марта 2024 года. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2024. – С. 89-91.

5. Ковалев, Р. Ю. Исследование влияния термообработки электродных пеков на выход продуктов карбонизации / Р. Ю. Ковалев, А. П. Никитин // Химия в интересах устойчивого развития. – 2024. – Т. 32, № 6. – С. 839-844.

6. Сидоров, О. Ф. Современные представления о процессе термоокисления каменноугольных пеков. Ч. 3. Влияние условий окисления на характер термохимических превращений и структуру пека / О. Ф. Сидоров // Кокс и химия. – 2004. – № 6. – С. 24-31.

7. Ковалев, Р. Ю. Исследование влияния термообработки среднетемпературного электродного пека на выход карбонизата / Р. Ю. Ковалев // От химии к технологии шаг за шагом. – 2024. – Т. 5, № 4. – С. 35-42.

8. Ефимова, О. С. Термопревращение каменноугольного пека в присутствии соединений кремния / О. С. Ефимова, Г. П. Хохлова, Ю. Ф. Патраков // Химия твердого топлива. – 2010. – № 1. – С. 7-14.

9. Хохлова, Г.П. Влияние природы и количества катализатора на фазовую структуру углеродного материала, полученного низкотемпературной каталитической графитацией каменноугольного пека / Г. П. Хохлова, В. Ю. Малышева, Ч. Н. Барнаков, А. Н. Попова, З. Р. Исмагилов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013. – Т.99, № 5. С. – 21-24.

10. Хохлова, Г.П. Особенности термопревращения каменноугольного пека в условиях низкотемпературной каталитической графитации при разных режимах термообработки / Г. П. Хохлова, Ч. Н. Барнаков, Л. М. Хицова и др. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – № 1(101). – С. 89-94.

11. Барнаков Ч.Н., Козлов А.П., Малышева В.Ю., Сеит-Аблаева С.К., Романенко А.И., Ануфриенко В.Ф., Исмагилов З.Р. Способ удаления бензпирена при производстве анодного углеродного материала, в том числе и при производстве графита// Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2010. –Т. 53, вып. 10. С. –115-121.

12. Ковалев, Р. Ю. Исследование термообработки электродного пека с добавками перхлората аммония / Р. Ю. Ковалев // Физико-химия и технология неорганических материалов : Сборник трудов XXI Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов с международным участием, Москва, 15–18 октября 2024 года. – Москва, 2024. – С. 230-231

13. Ковалев, Р. Ю. Влияние химической модификации электродного пека на выход карбонизата / Р. Ю. Ковалев // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия. – 2025. – № 1(59). – С. 106-118.

14. Kovalev, R.Yu. Thermal Oxidation of Electrode Coal Pitch / R. Yu. Kovalev, O. M. Gavriljuk, A. P. Nikitin, Z. R. Ismagilov // Coke and Chemistry. – 2023. – Vol. 66, No. 7. – P. 351-354.

15. Ковалев Р.Ю., Никитин А.П. Исследование свойств продуктов низкотемпературного термоокисления электродного каменноугольного пека/ Р. Ю. Ковалев, А. П. Никитин // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. – 2024. – Т. 15. – № 1. – С. 221-227.

16. Ковалев, Р. Ю. Изменение химического состава продуктов низкотемпературного термоокисления пека // Инновационные технологии и решения в промышленности: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), Ишимбай, 16–18 апреля 2024 года. – Ишимбай-Стерлитамак: ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», 2024. – С. 353-356.

17. Heath G. A. Mass spectrometric study of the thermal decomposition of ammonium perchlorate/ G. A. Heath, J. R. Majer // Transactions of the Faraday Society. -1964.- V. 60.- C. 1783-1791.

18. Keenan, A. G., Siegmund R.F. Thermal decomposition of ammonium perchlorate/ A. G. Keenan, R.F. Siegmund// Q. Rev. Chem. Soc. - 1969. – V. 23. –C. 430-452.

19. Choi, K. H. Molecular-level investigation of coal-tar pitch treated by air blowing: Revealing the restructure of aromatic compounds via radical reactions / K. H. Choi, S. Y. Lee, I. Hong [et al.] // Carbon. – 2023. – Vol. 203. – P. 377-385.

20. Zhou B, Hermans S., Somorjai G. A. Nanotechnology in Catalysis. NY: Plenum Publisher. 2004. T. 1. p.584.

21. Kotz J., Treichel P., Townsend, J. Chemistry and Chemical Reactivity, Enhanced Edition. P.1298.

References

1. Utkin, Yu. A. On the Assessment of the Quality of Coal Tar as a Binder in the Production of Anodes / Yu. A. Utkin, E. A. Yanko, E. Ya. Soloveichik, and V. M. Strakhov // Coke and Chemistry. – 2012. – No. 9. – Pp. 17-21. (In Russ.)

2. Itskov M.L., Svoboda R.V., Frolov V.I. Influence of the softening temperature of binding materials on the operational characteristics of anodic mass// Non-ferrous metals. –1983. –12. –C.33-35. (In Russ.).

3. Bazegsky, A. E. Research of the process of thermal dissolution of coal in order to obtain a binder for refractory masses. Message 1. Obtaining a binder / A. E. Bazegsky, M. B. Shkoller // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya. – 2016. – Vol. 59, No. 8. – Pp. 517-522.1. Efimova, O. S. Thermal transformation of coal tar in the presence of silicon compounds / O. S. Efimova, G. P. Khokhlova, Yu. F. Patrakov // Chemistry of solid fuels. - 2010. – No. 1. – pp. 7-14. (In Russ.).

4. Kovalev, R.Yu. Heat treatment of medium–temperature electrode coal pitches/ R. Yu. Kovalev, T. M. Naimushina, A. P. Nikitin// In the book: Materials in external fields. Proceedings of the XII International Online Symposium. – Novokuznetsk. SibGIU Publishing Center, 2024. –pp.88-90. (In Russ.).

5. Kovalev, R. Yu. Investigation of the Effect of Electrode Pitch Heat Treatment on the Yield of Carbonisation Products / R. Yu. Kovalev, A. P. Nikitin // Chemistry for Sustainable Development. – 2024. – Vol. 32, No. 6. – P. 817-822.

6. Sidorov, O. F. Modern Concepts of the Thermoxidation Process of Coal Tar. Part 3. Influence of Oxidation Conditions on the Nature of Thermochemical Transformations and the Structure of Tar / O. F. Sidorov // Coke and Chemistry. – 2004. – No. 6. – Pp. 24-31. (In Russ.).

7. Kovalev, R. Yu. Research of the Influence of Heat Treatment of Medium-Temperature Electrode Tar on the Yield of Carbonizate / R. Yu. Kovalev // From Chemistry to Technology Step by Step. – 2024. – Vol. 5, No. 4. – Pp. 35-42. (In Russ.).

8. Efimova, O. S. Thermoprecipitation of Coal Tar in the Presence of Silicon Compounds / O. S. Efimova, G. P. Khokhlova, and Yu. F. Patrakov // Solid Fuel Chemistry. – 2010. – No. 1. – Pp. 7-14. (In Russ.).

9. Khokhlova, G. P. Influence of the Nature and Amount of the Catalyst on the Phase Structure of the Carbon Material Obtained by Low-Temperature Catalytic Graphitization of Coal Tar / G. P. Khokhlova, V.

Yu. Malysheva, Ch. N. Barnakov, A. N. Popova, and Z. R. Ismagilov // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. – 2013. – T.99, No. 5. Pp. – 21-24. (In Russ.).

10. Khokhlova, G.P. Features of the Thermal Transformation of Coal Tar under Conditions of Low-Temperature Catalytic Graphitization under Different Thermal Treatment Regimes / G. P. Khokhlova, Ch. N. Barnakov, L. M. Khitsova, et al. // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. – 2014. – No. 1(101). – Pp. 89-94. (In Russ.).

11. Barnakov Ch.N., Kozlov A.P., Malysheva V.Yu., Seit-Ablaeva S.K., Romanenko A.I., Anufrienko V.F., Ismagilov Z.R. Method of removing benzpyrene in the production of anodic carbon material, including in the production of graphite// News of higher educational institutions. Chemistry and chemical technology. - 2010. –T. 53, vol. 10. Pages 115-121. (In Russ.).

12. Kovalev, R. Yu. Study of the Thermal Treatment of Electrode Tar with Ammonium Perchlorate Additives / R. Yu. Kovalev // Physical Chemistry and Technology of Inorganic Materials : Collection of Papers of the XXI Russian Annual Conference of Young Researchers and Postgraduate Students with International Participation, Moscow, October 15–18, 2024. – Moscow, 2024. – P. 230-231. (In Russ.).

13. Kovalev, R. Yu. The Influence of Chemical Modification of Electrode Tar on the Yield of Carbonizate / R. Yu. Kovalev // Bulletin of Tver State University. Series: Chemistry. – 2025. – No. 1(59). – Pp. 106-118. (In Russ.).

14. Kovalev, R. Yu. Thermal Oxidation of Electrode Coal Pitch / R. Yu. Kovalev, O. M. Gavriljuk, A. P. Nikitin, Z. R. Ismagilov // Coke and Chemistry. – 2023. – Vol. 66, No. 7. – P. 351-354.

15. Kovalev, R.Yu. Research of the Properties of Products of Low-Temperature Thermal Oxidation of Coal Electrode Tar Pitch// R. Yu. Kovalev, A. P. Nikitin // Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Technical Sciences. – 2024. – Vol. 15. – No. 1. – Pp. 221-227. (In Russ.).

16. Kovalev, R. Yu. Change in the chemical composition of the products of low-temperature thermo-oxidation of pitch / R. Yu. Kovalev, A. P. Nikitin // Innovative Technologies and Solutions in Industry: Collection of Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference (with International Participation), Ishimbay, April 16–18, 2024. – Ishimbay-Sterlitamak: Ufa University of Science and Technology, 2024. – Pp. 353-356. (In Russ.).

17. Heath, G. A. Mass spectrometric study of the thermal decomposition of ammonium perchlorate/ G. A. Heath, J. R. Majer // Transactions of the Faraday Society. -1964.- V. 60.- C. 1783-1791.

18. Keenan, A. G., Siegmund R.F. Thermal decomposition of ammonium perchlorate/ A. G. Keenan, R.F. Siegmund// Q. Rev. Chem. Soc. - 1969. – V. 23. –C. 430-452.

19. Choi, K. H. Molecular-level investigation of coal-tar pitch treated by air blowing: Revealing the restructure of aromatic compounds via radical reactions / K. H. Choi, S. Y. Lee, I. Hong [et al.] // Carbon. – 2023. – Vol. 203. – P. 377-385.

20. Zhou B, Hermans S., Somorjai G. A. Nanotechnology in Catalysis. NY: Plenum Publisher. 2004. T. 1. p.584.

21. Kotz J., Treichel P., Townsend, J. Chemistry and Chemical Reactivity, Enhanced Edition. P.1298.

Сведения об авторах

ФИО	*Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)*
Ковалев Родион Юрьевич	кандидат физико-математических наук, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, научный сотрудник, kovaleviuhm@yandex.ru SPIN-код 8244-8479 ORCID 0009-0001-7776-7440 Scopus ID 57191203800
Никитин Андрей Павлович	кандидат физико-математических наук, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, старший научный сотрудник, nikitinandreyp@yandex.ru SPIN-код 2980-7637 ORCID 0000-0003-2187-2281 Scopus ID 57196531441

Authors information

Last name, first name, patronymic	*Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)*
Kovalev Rodion Yuryevich	candidate of physical and mathematical sciences, Federal research center for coal and coal chemistry of the iberian branch of the russian academy of sciences, research fellow, kovaleviuhm@yandex.ru SPIN-code 8244-8479 ORCID 0009-0001-7776-7440 Scopus ID 57191203800
Nikitin Andrey Pavlovich	candidate of physical and mathematical sciences, Federal research center for coal and coal chemistry of the siberian branch of the russian academy of sciences, senior researcher, nikitinandreyp@yandex.ru SPIN-code 2980-7637 ORCID 0000-0003-2187-2281 Scopus ID 57196531441

статья поступила в редакцию	одобрена после рецензирования	принята к публикации
18.12.2025	25.12.2025	29.12.2025

the article was submitted	approved after reviewing	accepted for publication
18.12.2025	25.12.2025	29.12.2025

Обзорная статья

УДК 66.0

ХИМИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА

Инна Николаевна Пугачева eco-inna@ya.ru

Воронежский государственный университет инженерных технологий, проспект Революции, д. 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Обзор докладов, представленных на Всероссийской конференции с международным участием «Проблемы и инновационные решения в химической технологии» состоявшейся 2-3 октября 2025 г.

Ключевые слова: конференция, обзор, технологический суверенитет, химическая промышленность.

Для цитирования: Пугачева И. Н. Химическая промышленность в условиях технологического суверенитета // Инженерные технологии. 2025. № 4 (12). С. 119-121.

Review article

THE CHEMICAL INDUSTRY IN THE CONTEXT OF TECHNOLOGICAL SOVEREIGNTY

Inna N. Pugacheva eco-inna@ya.ru

Voronezh State University of Engineering Technologies, 19, Revolution Avenue, Voronezh, 394036, Russia

Abstract. Review of papers presented at the All-Russian Conference with International Participation "Problems and Innovative Solutions in Chemical Technology" held on October 2-3, 2025.

Keywords: conference, review, technological sovereignty, chemical industry.

For citation: Pugacheva I. N. The chemical industry in the context of technological sovereignty. Ingenernye tehnologii = Engineering technologies. 2025; (4 (12)): 119-121. (In Russ.).

В настоящее время одним из векторов развития Российской Федерации является курс на импортозамещение на фоне роста производственных мощностей во всех отраслях промышленности. Такое наращивание темпов промышленных производств позволит достичь технологического суверенитета. В утвержденной Указом президента РФ от 28 февраля 2024 года Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации отмечается: «В современных внешних условиях научно-технологическое развитие предполагает формирование и реализацию собственной повестки, опирающейся на национальную технологическую базу и направленной на первостепенное обеспечение технологического суверенитета страны». Еще одним стратегически важным документом является Концепция технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации № 1315-р от 20 мая 2023 г.), которая направлена на развитие высокотехнологичных отраслей российской экономики.

Поставленные задачи не простые, но в условиях нестабильной геополитической обстановки являются крайне важными для обеспечения устойчивого экономического и социального развития Российской Федерации. Обеспечение технологического лидерства будет реализовываться на основе восьми профильных национальных проектов:

- «Новые материалы и химия»;
- «Средства производства и автоматизации»;
- «Новые атомные и энергетические технологии»;
- «Промышленное обеспечение транспортной мобильности»;
- «Беспилотные авиационные системы»;
- «Технологическое обеспечение продовольственной безопасности»;
- «Новые технологии сбережения здоровья»;
- «Развитие многоспутниковой орбитальной группировки».

Одним из ключевых национальных проектов является «Новые материалы и химия». Он направлен на развитие химической промышленности и создание инновационных материалов и технологий для ключевых сфер экономики. К основным его задачам относят:

- к 2030 году производство химической отрасли должно превысить 11 трлн рублей, что позволит снизить зависимость от импорта и усилить позиции российских производителей на внешних рынках;
- до 2030 года в стране должно появиться более 130 новых высокотехнологичных производств;
- до 2030 года в России должно начаться производство более 700 востребованных

© 2025. Пугачева И. Н. / Pugacheva I. N.

химических продуктов для различных отраслей промышленности.

Однако необходимо помнить о вновь присоединённых территориях, на которых развитие химической промышленности затрудненно по ряду причин. С целью улучшения и наращивания темпов развития различных сфер таких территорий было создано Содружество «Донбасс», в которое вошли: Воронежская область, Ростовская область, Донецкая Народная Республика, Луганская Народная Республика.

Воронежский государственный университет инженерных технологий в рамках Всероссийской конференции с международным участием «Проблемы и инновационные решения в химической технологии» состоявшейся 2-3 октября 2025 г. провел Форсайт-сессию в виде круглого стола «Национальные проекты как драйвер развития химической промышленности». В мероприятии приняли участие представители высшего образования (Белорусский государственный технологический университет, Институт химической физики имени Н. Н. Семёнова РАН, Сибирский государственный университет науки и технологий, Волгоградский государственный технический университет, Воронежский государственный университет, Воронежский государственный медицинский университет имени Н.Н. Бурденко, Институт общей и неорганической химии имени Н. С. Курнакова РАН, Ярославский государственный технический университет), научно-исследовательских институтов (Научно-исследовательский институт синтетического каучука имени академика С. В. Лебедева (Воронежский филиал), Научно-исследовательского института эластомерных материалов и изделий (НИИЭМИ)), органов власти (Институт стратегического развития) и бизнеса (АО «Воронежсинтезкаучук»/ СИБУР, ООО ПСК «Биосинтез», АО «Управляющая компания БХХ «Оргхим», АО «Минудобрения», АО «Росхим», ФПК «Космос-нефть-газ», ООО «Вектор Полимир», АО «Газпроектинжиниринг», АО «ЦЕМРОС», ООО «КБ МКС», ООО НПК «Декор», ПолиЛаб Воронеж, АО «Кимрская фабрика им. Горького», АО «СКБ «ИСТРА»). Также хотелось отметить, что представители регионов, входящих в Содружество «Донбасс» - Ростовской области (Южный федеральный университет), и Луганской Народной Республики (Луганский государственный университет имени Владимира Даля) приняли участие в работе круглого стола. Были обсуждены вопросы развития химической промышленности в условиях стратегических задач развития России и вектора на достижение ею технологического лидерства. Рассмотрены такие инструменты развития, как национальные проекты, пути их реализации, в том числе на территории Донецкой Народной Республики и Луганской Народной Республики. Один из вопросов касался подготовки высококвалифицированных инженерных кадров для химической промышленности, как раз той сферы, где образовательные учреждения играют ключевую роль.

Заведующий кафедрой технологии органических соединений и переработки полимеров Воронежского государственного университета инженерных технологий Карманова О.В. (д.т.н., профессор), заместитель руководителя Воронежского научного центра Российской инженерной академии, рассказала о тенденциях и перспективах развития химической промышленности в регионе и в целом Российской Федерации.

Карманова О.В., ВГУИТ, г. Воронеж

В обсуждении приняли участие заведующий кафедрой Распопова Е.А. декан химического факультета Южного федерального университета (к.х.н., доцент), Домниченко Р.Г. старший преподаватель кафедра товароведения и экспертизы товаров Луганский государственный университет имени Владимира Даля (к.т.н.), которые подчеркнули, что существенный вклад в инновационный рост химической отрасли вносят университеты, которые специализируются на подготовке высококвалифицированных инженерных кадров, обладающих мультифункциональными компетенциями.

Распопова Е.А., ЮФУ, г. Ростов

Домниченко Р.Г., ЛГУ им. Владимира Даля, ЛНР

Однако, как отметили представители бизнеса – технический директор ООО «ВекторПолимир» Протасов А.В. (к.т.н., доцент) и главный технолог АО «Воронежсинтезкаучук» Емельянов С.М. подготовка таких кадров должна происходить в тесной взаимосвязи с предприятиями, чтобы выпускаемые университетами специалисты могли с первых дней включиться в решение производственных задач. Именно, на это направлен новый проект, реализуемый Воронежским государственный университетом инженерных технологий – «Прогрессивные инженерные школы» (ПИШ ВГУИТ). Студенты, обучающиеся в таких школах, уже с первого курса проходят часть обучения на предприятии, и учебный план модифицирован под кадровые потребности предприятия. Таким образом, предприятие осуществляет уникальный подход к подготовке мультифункционального сотрудника, обладающего широким спектром компетенций, и способного в дальнейшем обеспечивать достижение технологического лидерства. Директор Воронежского филиала ФГБУ «ВНИИСК» к.т.н. Игуменова Т.И. в своем выступлении отметила, что кадровый состав ВНИИСК составляет значительный процент выпускников ВГУИТ направления подготовки «Химическая технология». Но существует потребность в выпускниках и других направления, таких как «Аналитическая химия», «Автоматизация технологических процессов и производств», а также целесообразно обучение по дополнительным образовательным программам для расширения компетенций сотрудников.

Генеральный директор Научно-исследовательского института эластомерных материалов и изделий (НИИЭМИ) Резниченко Д.С. отметил, что только в коллаборации «образование – наука – производство», возможно достижение тех задач, которые поставлены государством перед химической промышленностью. В связи с этим предложено проработать варианты сотрудничества между всеми участниками Форсайт-сессии из различных областей, с последующим созданием совместных проектов, направленных на развитие химической отрасли.

Сведения об авторах

ФИО	*Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)*
Пугачева Инна Николаевна	доктор технических наук, доцент, Воронежский государственный университет инженерных технологий, заведующий кафедрой Промышленной экологии и техносферной безопасности, eco-inna@ya.ru SPIN-код 2326-8420 ORCID 0000-0001-5850-2861 Researcher ID E-2258-2014 Scopus Autor ID 55442878000

Authors information

Last name, first name, patronymic	*Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)*
Pugacheva Inna Nikolaevna	DSc, associate professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, head of the Department of Industrial Ecology and Technosphere Safety, eco-inna@ya.ru SPIN-code 2326-8420 ORCID 0000-0001-5850-2861 Researcher ID E-2258-2014 Scopus Autor ID 55442878000

статья поступила в редакцию	одобрена после рецензирования	принята к публикации
31.10.2025	06.11.2025	14.11.2025

the article was submitted	approved after reviewing	accepted for publication
31.10.2025	06.11.2025	14.11.2025

Обзорная статья

УДК 66.0

ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ «ПРОБЛЕМЫ И ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ» (ПИРХТ-2025)

Ольга Викторовна Карманова karolga@mail.ru

Воронежский государственный университет инженерных технологий, проспект Революции, д. 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Пост-релиз всероссийской конференции с международным участием «Проблемы и инновационные решения в химической технологии» (ПИРХТ - 2025). Приведены основные направления научной программы, представлен обзор докладов.

Ключевые слова: конференция, химическая технология, полимеры, композиты, ресурсосбережение, биологически активные вещества, аналитический контроль.

Для цитирования: Карманова О. В. Всероссийская конференция с международным участием «проблемы и инновационные решения в химической технологии» (ПИРХТ-2025) // Инженерные технологии. 2025. № 4 (12). С. 122-130.

Review article

ALL-RUSSIAN CONFERENCE WITH INTERNATIONAL PARTICIPATION "PROBLEMS AND INNOVATIVE SOLUTIONS IN CHEMICAL ENGINEERING" (PIRKHT-2025)

Olga V. Karmanova karolga@mail.ru

Voronezh State University of Engineering Technologies, 19, Revolution Avenue, Voronezh, 394036, Russia

Abstract. Post-release of the All-Russian Conference with International Participation "Problems and Innovative Solutions in Chemical Engineering" (Voronezh, October 2–3, 2025). The main directions of the scientific program are given, as well as a summary of the reports.

Keywords: conference, chemical technology, polymers, composites, resource conservation, biologically active substances, analytical control.

For citation: Karmanova O. V. All-russian conference with international participation "problems and innovative solutions in chemical engineering" (PIRKHT-2025). Ingenernye tehnologii = Engineering technologies. 2025; (4 (12)): 122-130. (In Russ.).

2-3 октября 2025 года в г. Воронеже проходила Всероссийская конференция с международным участием «Проблемы и инновационные решения в химической технологии» (ПИРХТ - 2025), организованная ВГУИТ при поддержке Российской инженерной академией (РИА). Мероприятие, посвященное 95-летию ВГУИТ и 35-летию Российской инженерной академии объединило ведущих экспертов для обсуждения актуальных исследований и поиска инновационных решений для устойчивого развития химической отрасли.

Конференция стала важной экспертной площадкой, собрав представителей науки, промышленности и власти для обсуждения актуальных научных вопросов, связанных с химической технологией неорганических и органических веществ, полимерных и композитных материалов, а также проблем экологической безопасности и ресурсосбережения.

Президент РИА, член-корреспондент РАН, заслуженный деятель науки РФ Гусев Борис Владимирович в своем приветствии подчеркнул, что для эффективного развития приоритетных направлений экономики России необходимо тесное сотрудничество промышленности и университетов. Взаимодействие РИА с университетами и предприятиями реального сектора экономики позволяет создать единое научно-информационное пространство и сформировать системный подход к интеграции ученых, инженеров и промышленников. В заключении Гусев Б.В. пожелал участникам содержательных дискуссий, позитивного обмена опытом, рождения гениальных идей, новых свершений, формирования крепких научных связей и выразил уверенность, что Конференция даст новый импульс развитию Российской инженерной науки и химической технологии, будет способствовать разработке и внедрению инновацион-

© 2025. Карманова О. В. / Karmanova O. V.

ных технологий, практическому применению исследований в реальном секторе экономики.

Директор автономного учреждения Воронежской области «Институт стратегического развития» Сухачева Валентина Ивановна отметила растущую роль конференции и расширение ее тематики в контексте решения задач химической промышленности региона.

Приветственное слово – Сухачева В.И.

О тесной связи ВГУИТ и «Воронежсинтезкаучук» (ПАО «Сибур холдинг») рассказал главный технолог завода Емельянов Сергей Михайлович. Многолетнее сотрудничество предприятия у университетом, включающее прохождение на предприятии производственной практики студентов ВГУИТ, трудоустройство выпускников вуза, организацию экскурсий и лекций для обучающихся, направление сотрудников предприятия на курсы повышения квалификации в университет выходит на новый уровень двустороннего научно-индустриального партнерства по реализации совместных проектов, направленных на решение актуальных задач предприятия и химической промышленности в целом. В рамках партнерства мы приступили к совместной реализации образовательных программ, активному привлечению ведущих специалистов компании к учебному процессу в университете, организации чемпионатов, олимпиад, хакатонов, акселерационных программ и мероприятий по карьерному развитию. Особый акцент будет сделан на создании условий для качественной практической подготовки учащихся на производственных площадках компании Сибур. Ключевым направлением станет выполнение совместных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Это открывает новые перспективы для интеграции образования, науки и промышленности.

Главный технолог «Воронежсинтезкаучук» (ПАО «Сибур холдинг») Емельянов С. М.

В своем приветственном слове участникам конференции Председатель оргкомитета, Ректор ВГУИТ Репников Николай Иванович подчеркнул важность этой связи, особенно в рамках проекта «Прогрессивные инженерные школы» (ПИШ «ХимИнТех»), который уже второй успешно реализуется на факультете экологии и химической технологии при поддержке ведущих индустриальных партнеров: «Сибур», «Росхим», «Цемрос», «Фарбен», где студенты под руководством наставников разрабатывают актуальные решения для реальных задач производства. Растущая репутация ВГУИТ в международном научно-техническом пространстве обеспечила в этом году участие наших партнеров из Азербайджана, Беларуси, Китая и Турции. Их участие расширяет рамки международного сотрудничества университета по наиболее важным для страны направлениям научных исследований в области химии и химической технологии, прежде всего в части разработки перспективных технологий производства полимерных материалов и композитов.

Ректор Репников Н.И. выступает с приветственным словом

Особо ректор отметил большой интерес молодых ученых к конференции ПИРХТ, так как именно они представляют собой основу для формирования инженерного кадрового состава – ключевого элемента технологического лидерства страны. Практическая направленность профессиональной подготовки, современные образовательные технологии, инновационные проекты, реализуемые ВГУИТ в сотрудничестве с индустриальными партнерами, позволяют нам уверенно идти в ногу со временем.

В работе конференции приняли участие 150 ученых из России и других стран. Более 40 участников представлены молодыми учеными.

Основные направления научной программы включали теоретические основы химической технологии; задачи и методологии решения проблем современных химических производств; технологии получения неорганических, органических, биологически активных веществ, полимерных материалов и композитов, современные подходы к оптимизации химико-технологических процессов, энергоэффективные, малоотходные и ресурсосберегающие технологии; цифровые технологии в химическом производстве; математическое моделирование в анализе, оптимизации и синтезе химико-технологических процессов; новые подходы, методы и средства аналитического контроля качества сырья и продукции.

Работа конференции проводилась в трех секциях: «Химическая технология неорганических веществ и материалов», «Химия и технология органических соединений, полимеров и композитов», «Экологическая безопасность и ресурсосбережение в химической технологии».

Всего было сделано 4 пленарных доклада, 25 устных и 23 стендовых докладов. Проведено их всестороннее обсуждение, 59 авторов прислали тезисы для заочного участия в конференции. Результаты работы отражены в изданном сборнике трудов конференции, всего в сборнике опубликовано 105 тезисов докладов. Представленные на конференции доклады и сообщения отличались высоким научным уровнем и объемом теоретической и практической информации и вызывали большой интерес участников конференции.

В пленарной сессии приняли участие Ваниев М.А., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Химия и технология переработки эластомеров», Волгоградский государственный технический университет; Шутилин Ю.Ф. д.т.н., профессор кафедры технологии органических соединений и переработки полимеров, Воронежский государственный университет инженерных технологий; Игуменова Т.И.. к.т.н., директор Воронежского филиала ФГБУ «Ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени Научно-исследовательский институт синтетического каучука им. академика С.В. Лебедева»; Гашо Е.Г., д.т.н., профессор, Национальный исследовательский университет «МЭИ», академик РИА (г. Москва).

В докладе проф. Ваниева М.А. «Опыт реализации стратегического проекта «Малотоннажная химия и специальные полимеры» по программе «ПРИОРИТЕТ-2030» представлена информация о реализации стратегического проекта ВолгГТУ «Малотоннажная химия и специальные полимеры», который ориентирован на создание продуктов, направленных на решение общественно значимой проблемы, связанной с обеспечением технологической независимости страны. Отмечается, что реализация проекта является ответом на внешний вызов, который проявляется в усиливающейся санкционной политике, что, в свою очередь, детерминирует амбициозность задачи, заключающейся в разработке технологии и постановке на производство линейки критически важных продуктов: мономеров, реакционноспособных смол, а также специальных каучуков и пластиков. Приводятся примеры взаимодействия университета с индустриальными партнерами, с которыми ведутся работы над продуктами/технологиями, находящимися на разных уровнях технологической готовности. Акцентируется взаимосвязь стратегического проекта с образовательной политикой и политикой технологического предпринимательства университета.

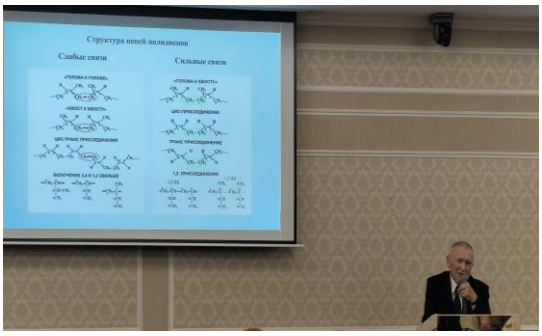
Проф. Шутилин Ю.Ф. в докладе «Динамические, прочностные свойства резин и полихроматические, полихронные и полисхематические превращения разнозвенных ансамблей полидиенов при термообработках» представил результаты исследований термомодификации резин на основе полидиенов и обоснование молекулярных причин повышения регулярности этих полимеров. Сделан вывод, что в отличие от общепринятых повышенных температур модификации, вулканизации и других способов улучшения свойств эластомеров, для увеличения регулярности полибутадиенов и бутадиенсодержащих каучуков необходимо воздействие пониженных

температур (и энергий, например, облучения) для снижения энергии макрорадикалов и предотвращения сшивания подобных ВМС.

В докладе «Основные направления развития химической отрасли синтеза полимеров» Игуменова Т.И. подчеркнула важную роль развития полимерной отрасли в разрезе «Стратегических направлений развития химической отрасли и «Концепции технологического развития РФ на период до 2030 года» и отметила положительную тенденцию снижения доли импорта полимеров, что тормозило возможности синтеза и переработки полимеров и глубокую переработку нефтехимического сырья. Несмотря на то, что сегодня российская химическая отрасль демонстрирует стабильный рост в среднем на 4-6% ежегодно, в области малотоннажной химии, сохраняется определенная зависимость от импорта. Несмотря на это в стране активно формируются новые технологические цепочки, создаются собственные материалы и технические решения.

Доклад проф. Гашо Е. Г. «Увязка энерготехнологических и хемотермических процессов для повышения энергетической и экологической эффективности энергоемких производств. Наилучшие доступные технологии» посвящен решению задач создания альтернативных экологически чистых, эффективных и ресурсосберегающих способов производства электрической и тепловой энергии, которые возникают вследствие проблем климата, экологии, перераспределения топливных ресурсов, политики и экономики. Подчеркивается, что весьма эффективными и успешными могут оказаться новые энерготехнологические симбиозы, обладающие свойством «природоподобности», например, атомно-водородные комплексы на основе высоко-температурных газоохлаждаемых атомных реакторов (ВТГР). Интеграция энергоемких энерготехнологических комплексов с возможностями хемотермических процессов открывает широкие возможности для нового энергетического уклада, отработки целого спектра энерготехнологий, по праву относящихся к области наилучших доступных технологий. Первый в РФ атомно-энерготехнологической комплекс на основе ВТГР начал проектироваться и строиться в Татарстане.

Пленарное заседание



Профессор Шутилин Ю.Ф.

В рамках конференции также состоялась Форсайт-сессия в формате круглого стола на тему: «Национальные проекты как драйвер развития химической промышленности», где представители бизнеса, науки и образования обсудили стратегические направления и государственную поддержку инноваций в химической промышленности. В работе мероприятия впервые приняли участие представители организации «Содружество «Донбасс». В рамках партнёрства удалось рассмотреть вопросы, касающиеся развития химической промышленности в условиях стратегических задач развития России и вектора на достижение ею технологического лидерства, а также национальные проекты, являющиеся инструментом развития, пути их реализации, в том числе на территории ДНР и ЛНР.

Работа конференции продолжилась в тематических секциях, где обсуждались вопросы химии органических и неорганических соединений, экологической безопасности и ресурсосбережения.

В секции «Химия и технология органических соединений, полимеров и композитов» заслушано 12 докладов В начале выступил заведующий кафедрой полимерных композиционных материалов Белорусского государственного технологического университета, к.т.н., Касперович А.В. с докладом «Антиадгезионный импортозамещающий состав для изоляции

листованных и гранулированных маточных резиновых смесей при производстве автомобильных шин и резинотехнических изделий». Представлены результаты исследования влияния типа пеногасителя на свойства коллоидных растворов антиадгезионных составов, минеральных наполнителей, ПАВ и других функциональных добавок на показатели качества атиадгезивов.

От имени группы ученых научно-исследовательского центра компании «Альфа(Фуцзянь) Био Технолоджи Ко., Лтд», КНР выступили Ян Чжоу и Фу Юйин с докладом «Научные достижения в области активных полисахаридов в современной традиционной китайской медицине», в котором осветили последние разработки по получению и применению фитоэкстрактов в фармакологии.

Ву Мань Хунг (аспирант Волжского политехнического института (филиал ВолгГТУ) в своем докладе «Улучшение свойств огнезащитных покрытий на основе этиленпропилендиеновых эластомеров, содержащих стеклянные микросферы за счет использования фосфорсодержащих производных метил(мет)акрилата» (соавторы Гайдадин А.Н., Каблов В. Ф.) показал возможность применения микросфер в качестве функциональных наполнителей, позволяющих регулировать теплофизические показатели покрытия, влияние олигомера ФОЕМ-1 на эксплуатационные свойства огнетеплозащитных покрытий при воздействии высокотемпературного газопламенного потока. Установлено, что комбинированное использование олигомера значительно повышает эффективность модифицированных эластомерных композиций.

Доклад «Получение ультратонких волокон на основе полиэфиров методом электроформования» сделан от имени группы авторов Ольхов А. А,, Бемов Д.Н., Курносов А.С., Хан О.И., Иорданский А.Л. из нескольких организаций (РЭУ им. Г. В. Плеханова, ФИЦ ХФ им. Н. Н. Семенова РАН, ИБХФ им. Н. М. Эмануэля РАН, Москва; АО «Кимрская фабрика им. Горького», Кимры). Изучено влияние структуры ультратонких волокон из аполи-(3-гидроксибутират) молекулярной массой 460 кДа и полилактида ПЛА 250 кДа на морфологию и сорбционные свойства нетканых волокнистых материалов, предназначенных для очистки от нефтяных загрязнений, в том числе двухкомпонентных систем нефть–вода, возникающих при аварийных разливах нефти на поверхности рек и озер.

Д.т.н., проф. Ворончихин В.Д. (СГУНиТ им. Ак. М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, соавторы Дубков К.А., Иванов Д.П., Семиколенов С.В.) в докладе «Эффективность применения функциональных олигодиенов в резинокордных системах» представил результаты применения функционализированных низкомолекулярных диеновых каучуков в качестве модификатора резинокордных систем и показал их эффективность при изготовлении обкладочных смесей для улучшения диспергирования технического углерода, повышения адгезионного взаимодействия с армирующими элементами.

Доклад к.т.н. Кочеткова В.Г. «Разработка и исследование эластомерных огнетепло-защитных материалов, содержащих функционально-активные гетерогенные структуры» (соавторы Каблов. В.Ф., Кейбал Н.А., Новопольцева О.М., Крюкова Д.А., Уржумов Д.А., ФГБОУ ВО «ВолгТУ», г. Волгоград) посвящен разработке высоко-эффективных эластомерных огнетепло-защитных материалов (ОТЗМ) с улучшенными теплофизическими и огнетеплозащитными свойствами. В работе впервые для повышения огнетеплозащитной эффективности ОТЗМ получены синергические функционально-активные структуры на основе микросфер, микроволокон и синтезированных фосфорборазотсодержащих модификаторов, обеспечивающих повышение эксплуатационной стойкости эластомерного материала за счет протекания адаптационных физико-химических превращений во всем сечении материала при прохождении теплового потока.

В докладе «Мультисенсорная система на основе новых привитых сульфополимеров для анализа ротовой жидкостидетей с разным уровнем кариесрезистентности эмали», сделанном от группы авторов (Жучков Т.Р., Какунина И.В., Ельникова А.С., Юрова П.А., Рассказова Ю.С., Ипполитов Ю.А., Паршина А.В., Бобрешова О.В., ВГУ, ВГМУ, Воронеж; ИОНХ Москва) представлены результаты по разработке массива перекрестно чувствительных ПД-сенсоров, аналитическим сигналом которых является потенциал Доннана, на основе лабораторных и коммерческих фторполимерных сульфокатионообменных мембран для оценки кариесрезистентности зубной эмали у детей посредством анализа ротовой жидкости.

К.т.н. Власов В.В. (ЯГТУ, г. Ярославль, соавтор Пушница А.С.) представил доклад «Применение термоэластопласта СБС-Р в эластомерных композициях на основе каучука БНКС-40АМН», где рассмотрел свойства

композиций на основе бутадиен-нитрильного каучука при введении стирол-бутадиен-стирольного термоэластопласта СБС-Р с целью улучшения низкотемпературных характеристик.

Представитель АО «Воронежсинтезкаучук», ПолиЛаб-Воронеж Толкачева Е.С. сделала доклад на тему «Повышение транспортно-эксплуатационных характеристик дорожных покрытий за счет применения модификатора СБС для битумных вяжущих» (соавтор Одноралов Е.М.), в котором представлены результаты исследования влияния СБС-модификатора битумных вяжущих на устойчивость к многократным сдвиговым нагрузкам.

В докладе Пьяниковой П.Ю. «Сравнительная характеристика растворных дивинил-стирольных синтетических каучуков, полученных с использованием различных биомасел» (АО «Воронежсинтезкаучук», ПолиЛаб-Воронеж, соавтор Лагунова С.А.) представлены результаты исследования по замене масла нефтяного происхождения типа TDAE на масла растительного происхождения или сопутствующие продукты дерево-обрабатывающей промышленности (пластификаторы на основе таллового масла) в составе маслонаполненного каучука ДССК-2560-М27 производства АО «Воронежсинтезкаучук».

Аспирант ВГУИТ Бердников В.В. в докладе «Модификация синтетического бутадиен-стирольного каучука (ДССК) азометинами» (соавторы Карманова О.В., ВГУИТ; Фирсова А.В., Харитонов А.Г., Полухин Е.Л., Кулигина М.А., Вф ФГБУ НИИСК) представил результаты исследования влияния азометинов на свойства вулканизатов синтетического бутадиен-стирольного каучука (ДССК-2560), полученного с применением алкиллитиевого катализатора. Показано, что ведение азометинов в ДССК обусловливает повышение когезионной прочности каучука, физико-механических показателей вулканизатов и не требует внесения изменений в существующую технологию получения и выделения каучука.

В докладе «Исследование зависимости ионной проводимости от молекулярной массы поливинилиденфторида в твёрдых полимерных электролитах», представленном сотрудниками Волгоградского технического университета (Плякин Т. В,. Чентемиров Т. Б, Иванов И. Д., Гайдадин А. Н.) представлены результаты исследований по применению твердотельных электролитов в литий-ионных аккумуляторах, что позволяет увеличить их ёмкость и мощность. В роли твердотельного электролита выступал твёрдый полимерный электролит, для повышения ионной проводимости предлагается использовать смесь из двух полимеров: поливинилиденфторида и гидрированного бутадиен- нитрильного каучука.

Участники конференции ПИРХТ-2025

Работа секции 1. Профессор Ваниев М.А. задает вопросы

В секции «Химическая технология неорганических веществ и материалов» заслушано и обсуждено 6 докладов.

Международный коллектив авторов Sinan Mehmet TURP, Guldane Asli TURP, Salim Ozdemir, Rasim Alosmanov (Университет Битлис Эрен, Турция; Университет Сакарья, Турция; Бакинский государственный университет, Азербайджан) представил доклад «Контроль загрязнения в водных системах с помощью устойчивых методов».

Хейн ТхуАунг (РХТУ им. Д.М. Менделеева, Москва), представил доклад «Электрофлотация в очистке водных сред от тяжелых металлов».

В докладе Узбекова Р.Ш. (РХТУ им. Д.М. Менделеева, Москва) «Применение методов многосценарной оптимизации для проектирования химико-технологических процессов в условиях неопределенности» предложена методология, которая позволяет принципиально изменить подход к проектированию энергоемких процессов, перейдя от поиска узко-оптимальных решений к поиску устойчивых к различным отклонениям и работающим в условиях неопределённости решениям.

В докладе «Комплексообразование ионов металлов с хелатообразующими ионообменниками в присутствии аминокислот» (авторы к.х.н. Астапова А.В., ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»; к.х.н. Бондарева Л.П., ВГУИТ) представлены результаты изучения взаимодействие ионов Cu^{2+} и Ni^{2+} с иминодиуксусным хелатообразующим ионообменником АНКБ-35, аналогами которого являются Hydorlite ZGD851 (KHP) и Purolite S930 (США), в присутствии анионов глицина (Gly^-) и глутаминовой кислоты (Glu^{2-}). В результате исследований установлен состав и константы устойчивости комплексов, образующихся в фазе иминодиуксусного ионита.

В докладе «Синтез и исследование люминесцентных свойств тройной системы SiO_2-Gd_2O_3-Eu_2O_3» (авторы д.х.н., проф. Нифталиев С. И., к.х.н. Кузнецова И.В., Чан Ньат Ань, ВГУИТ) представлены данные по получению диоксида кремния, модифицированного оксидами Gd и Eu и исследованию его свойств. Установлено, что материал может быть использован как источник люминесценции в медицине и при создании сенсоров.

В докладе «Эффективность извлечения витамина B12 из водных растворов» (авторы Игумнов М.С., д.х.н. Нифталиев С.И., ВГУИТ; д.х.н. Мокшина Н.Я., ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина») представлены результаты работы по исследованию эффективности применения лантан-модифицированного бентонита для извлечения витамина B_{12} из водных систем. Подчеркивается важность оптимизации кислотно-основных условий при реализации сорбционных технологий.

Лыгина Л.В. открывает работу секции 2

В секции «Экологическая безопасность и ресурсосбережение в химической технологии» заслушано и обсуждено 7 докладов.

Доклад «Роль Роспотребнадзора в обеспечении санитарно-гигиенической и экологической безопасности химических производств (с примерами по Воронежской области) представила Е.М. Студеникина (ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Воронежской области). Проведена оценка ситуации на территории Воронежской области, где осуществляют производственную деятельность 4632 организации и представлен анализ данных территориального Управления Роспотребнадзора.

Дроздовой Е.В. в докладе «Возможности анализа изделий на основе полимеров без разрушения» (соавтор д.х.н. Кучменко Т.А., ВГУИТ) освещены вопросы по разработки и апробации способов оценки уровня эмиссии токсичных соединений из полимерных материалов с применением системы «Электронный нос» на основе пьезосенсоров с различными сорбционными покрытиями. Данные способы позволяют проводить оценку безопасности изделий из различного пластика (на основе поливинилхлорида и полистирола, с добавлением фенолформальдегидных смол в качестве связующих компонентов), листовых композици как с разрушением образца в лабораторных условиях, так и в режиме «на месте», с высокой производительностью. Каркасные наноструктурированные модификаторы высокочувствительных пьезовесов на основе квантовых точек показали перспективность создания новых быстрых детекторов для анализа полимеров.

В докладе «Определение массовой концентрации 1,1-диметилгидразина в растительных объектах» (авторы Маслова Н.В., Сатуров А.С., Суханов П.Т., ВГМУ им. Н.Н. Бурденко, ВГЛУ им. Г.Ф. Морозова, ВГУИТ) описан разработанный авторами способ определения массовой концентрации 1,1- диметилгидразина и продуктов его деградации в пробах растений, применяемый для оценки экологических рисков при эксплуатации жидкостных ракетных двигателей, где применяется несимметричный диметилгидразин (НДМГ) в качестве ракетного топлива (загрязнение воздуха и вод продуктами сгорания; долговременное загрязнение почв; физические и шумовые воздействия; радиационные риски; накопление твердых отходов).

В докладе «Снижение доли невозвратных отходов при глубокой переработке отработанных аккумуляторных батарей» (авторы Варнаков М.А., Шубабко О.Э., Вартанян М.А., РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва) представлены результаты исследования альтернативного применения отходов, образующихся в процессе переработки свинцовых аккумуляторов, с целью получения более ценных химических соединений. Описан метод переработки сульфата натрия после нейтрализации электролита из аккумуляторов и оксидной пасты, а также способы его коммерциализации.

Комротов И.С. (РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва) представил доклад «ВЭЖХ-МС как метод идентификации маркеров нефти для дальнейшего прогнозирования качества».

Доклад «Применение биологически активных веществ для получения новых медицинских препаратов» представлен группой авторов (Кузьменко Г. А., Вагизов Р.Р., Енькова Е. В., Кузьменко А. В., Обернихин К.И., ВГМУ, Воронеж; Комарова Е.В., Болотов В.М., ВГУИТ). Обоснована целесообразность использования растительных компонентов (каротиноидов), обладающих широким спектром терапевтического действия и низкой токсичностью, в качестве субстрата для создания лекарственных средств.

Аспирант Моргачева Е.А. в докладе «Решение экологических вопросов в производстве синтетических каучуков., (соавторы д.т.н. Пугачева И.Н., к.х.н. Санникова Н.Ю., д.т.н. Никулин С.С., к. ф-м. н. Репников Н.И., ВГУИТ), обобщила результаты по получению волокнистой добавки из отходов текстиля для каучуков.

Молодые ученые и аспиранты представили свои исследования на стендовой сессии. Представлено 23 доклада, в обсуждении которых приняли участники конференции.

Стендовая сессия

Конференция ПИРХТ-2025 стала эффективной площадкой для взаимодействия, обмена опытом и формирования нового видения решения задач, стоящих перед отечественной химической промышленностью.

Сведения об авторах

ФИО	*Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)*
Карманова Ольга Викторовна	доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», заведующий кафедрой «Технологии органических соединений и переработки полимеров», karolga@mail.ru SPIN-код 6289-1989 ORCID 0000-0003-2226-6582 Researcher ID D-7259-2014 Scopus Autor ID 6506895263

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information *(academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)*
Karmanova Olga Victorovna	DSc, professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, Head of the Department of Technology of Organic Compounds and Polymer Processing, karolga@mail.ru SPIN-code 6289-1989 ORCID 0000-0003-2226-6582 Researcher ID D-7259-2014 Scopus Autor ID 6506895263

статья поступила в редакцию	одобрена после рецензирования	принята к публикации
20.10.2025	30.10.2025	10.11.2025

the article was submitted	approved after reviewing	accepted for publication
20.10.2025	30.10.2025	10.11.2025