



АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ ВУЛКАНИЗАЦИИ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Зеленин А. С., Астапов В. Н.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Самарский государственный технический университет», Самара, Российская Федерация,
e-mail: alex_bum63@mail.ru*

В статье представлен аналитический обзор методов вулканизации резинотехнических изделий, играющей ключевую роль в формировании их эксплуатационных свойств, таких как эластичность, прочность, износостойкость. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения качества резинотехнических изделий, оптимизации производственных процессов, снижения энергозатрат и длительности цикла, соблюдения ужесточающихся экологических норм, а также адаптации технологий к новым эластомерным материалам. Цель работы – комплексно изучить методы вулканизации резинотехнических изделий, включая анализ производства резины, ее состава, структуры, требований к изделиям и оценку существующих технологий вулканизации, их особенностей, преимуществ, ограничений и сфер применения. Важными тенденциями развития производства являются автоматизация процессов, внедрение энергоэффективных технологий и бесконтактных методов контроля, а также использование цифровых моделей для прогнозирования свойств изделий. Эволюция методов вулканизации стремится к балансу между технологическими, экономическими и экологическими требованиями. Это особенно актуально в условиях растущей конкуренции на рынке резинотехнических изделий, где ключевыми факторами успеха становятся качество, энергоэффективность и экологическая безопасность производственных процессов. Данный обзор является актуальным и полезным для специалистов нефтяной отрасли, а также для всех, кто интересуется вопросами вулканизации резинотехнических изделий.

Ключевые слова: температура, вулканизация, данные, автоматизация, анализ, оптимизация, датчики

ANALYTICAL REVIEW OF THE RESEARCH OF VULCANIZATION METHODS OF RUBBER PRODUCTS

Zelenin A., Astapov V.N.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Samara State Technical University”, Samara, Russian Federation,
e-mail: alex_bum63@mail.ru*

The article presents an analytical review of vulcanization methods of rubber products, which play a key role in the formation of their operational properties, such as elasticity, strength, and wear resistance. The relevance of the research is determined by the need to improve the quality of rubber products, optimize production processes, reduce energy consumption and cycle time, comply with stricter environmental standards, as well as adapt technologies to new elastomeric materials. The purpose of the work is to comprehensively study the methods of vulcanization of rubber products, including an analysis of rubber production, its composition, structure, product requirements and an assessment of existing vulcanization technologies, their features, advantages, limitations and applications. Important trends in the development of production are automation of processes, the introduction of energy-efficient technologies and contactless control methods, as well as the use of digital models to predict the properties of products. The evolution of vulcanization methods strives for a balance between technological, economic and environmental requirements. This is especially important in the context of growing competition in the market of rubber products, where quality, energy efficiency and environmental safety of production processes are becoming key success factors. This review is relevant and useful for specialists in the oil industry, as well as for anyone interested in vulcanization of rubber products.

Keywords: Temperature, vulcanization, data, automation, analysis, optimization, sensors

Введение

Резинотехнические изделия (РТИ) представляют собой важнейший класс конструкционных материалов, широко применяемых в машиностроении, авиационно-космической отрасли, нефтегазовом комплексе, медицине и других сферах промышленности. Их эксплуатационные характеристики – эластичность, прочность, износостойкость, герметичность, устойчивость к агрессивным средам и температурным воздействиям – формируются в ходе технологического

процесса вулканизации. Именно данный этап определяет конечные свойства изделий: от него зависят структура полимерной сетки, степень сшивки макромолекул и, как следствие, надёжность и долговечность готового продукта.

Актуальность обзора методов вулканизации обусловлена рядом факторов: повышением требований к качеству и стабильности эксплуатационных свойств РТИ; необходимостью оптимизации производственных циклов и сокращения энергозатрат; ужесто-

чением экологических норм и переходом на более безопасные вулканизирующие агенты; развитием новых эластомерных материалов (термоэластопластов, силиконовых и фторкаучуков), для каждого из которых требуется адаптация режимов вулканизации.

Несмотря на многолетнюю историю применения вулканизации, в отрасли сохраняется ряд нерешённых задач: неравномерность процесса, образование дефектов, высокая энергоёмкость, сложность контроля параметров в реальном времени. Это стимулирует поиск и внедрение инновационных методов, а также переоценку традиционных подходов с позиции современных технологических возможностей.

Цель исследования – провести аналитический обзор современных методов вулканизации РТИ и оценить их технологические преимущества, ограничения и области применения. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Проведение анализа предмета исследования – производства резины, её состава, структуры и ключевых требований к готовым изделиям.

2. Анализ существующих методов вулканизации, их технологических особенностей, преимуществ, ограничений и областей применения.

Проведённый аналитический обзор позволит сформировать целостное представление о современном состоянии и перспективах развития методов вулканизации РТИ, а также заложит основу для дальнейших исследований и внедрения инновационных решений в резинотехнической отрасли.

Материалы и методы исследования

Поиск литературы проводился в реферативных базах данных eLibrary.ru, КиберЛенинка (CyberLeninka), Google Scholar, а также в реестре действующих национальных стандартов (ГОСТ). Использовались следующие ключевые слова: «вулканизация», «серная вулканизация», «пероксидная вулканизация», «фенольная (смоляная) вулканизация», «радиационная вулканизация», «микроволновая вулканизация», «ТВЧ-вулканизация», «резинотехнические изделия».

Период поиска – 2015–2026 гг.; для изложения теоретических основ привлекались классические монографии более раннего периода. Критерии включения: рецензируемые научные публикации, монографии и учебники, действующие нормативные документы, посвящённые химии и технологии вулканизации, кинетике сшивания, аппаратному обеспечению процесса. Критерии исключения: маркетинговые обзоры рынка и рекламные материалы без технологиче-

ских данных, публикации без полнотекстового доступа, источники, не относящиеся к тематике вулканизации.

Всего отобрано и проанализировано 15 источников. Сравнение методов вулканизации выполнено по следующим критериям: температурный диапазон процесса, продолжительность вулканизации, тип каучука, рекомендуемая толщина изделия, формируемые эксплуатационные свойства, область применения и известные ограничения метода.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ предмета исследования производства резины

Производство резины представляет собой многостадийный процесс, в ходе которого из набора исходных компонентов формируется материал с заданными физико-механическими свойствами. Ключевую роль играет сырьевая база, включающая: каучуки (натуральные и синтетические), вулканизирующие агенты (сера, пероксиды, смолы), наполнители (технический углерод, кремнекислотные наполнители, каолин), пластификаторы (масла, сложные эфиры), антиоксиданты и антиозонанты, активаторы вулканизации (оксид цинка, стеариновая кислота) и другие функциональные добавки. Каждый компонент выполняет определённую функцию: каучук формирует эластичную основу, наполнители повышают прочность и износостойкость, пластификаторы улучшают технологичность, а стабилизаторы продлевают срок службы. Соотношение и качество сырья напрямую определяют конечные свойства резины – от твёрдости и эластичности до термостойкости и сопротивления старению [1].

Физико-химические основы вулканизации заключаются в образовании поперечных связей между макромолекулами каучука под действием вулканизирующих агентов и энергии внешнего воздействия (тепло, давление, излучение). В результате формируется трёхмерная сетчатая структура, обеспечивающая упругость, прочность и устойчивость к деформациям. Механизм процесса зависит от типа каучука и вулканизирующей системы: серная вулканизация создаёт полисульфидные связи, пероксидная – углерод-углеродные, а смоляная – эфирные. Кинетика реакции определяется температурой, концентрацией агентов и присутствием активаторов; при этом избыточное время или температура могут привести к реверсии (разрушению сетки). Ключевыми параметрами контроля являются степень сшивки,

плотность узлов сетки и распределение связей по длине [2, с. 9-14].

Технологические стадии производства РТИ включают: подготовку сырья (взвешивание, сушку, просеивание), смешение компонентов, формование заготовок, вулканизацию и финишную обработку. Каждый этап требует строгого соблюдения режимов: отклонение температуры или времени смешения ведёт к неоднородности смеси, а нарушение параметров прессования – к дефектам формы. Важнейшим условием является непрерывность контроля на всех переходах, поскольку ошибки на ранних стадиях невозможно компенсировать на последующих [3].

Аналитическая оценка технологических стадий производства

Проведённый анализ технологического процесса показывает, что наибольшее влияние на качество готовых изделий оказывают стадии смешения и вулканизации. Нарушение температурного режима при смешении приводит к локальному перегреву смеси и частичной подвулканизации, что снижает эластичность изделий и вызывает неравномерность структуры. Вулканизация, в свою очередь, определяет степень сшивки полимерной матрицы, от которой зависят прочность, стойкость к старению и сопротивление деформациям.

Сравнение технологических стадий представлено в таблице 1.

Из представленных данных следует, что наиболее критичными параметрами являются температура и продолжительность вулканизации, так как именно они определяют формирование пространственной сетки каучука. При недостаточной степени сшивки изделия обладают низкой механической прочностью, а при чрезмерной – становятся хрупкими и склонными к разрушению.

Смешение резиновой смеси – критическая операция, от которой зависит равномерность распределения компонентов и, следовательно, однородность свойств готового изделия. Процесс осуществляется в резиносмесителях периодического или непрерывного действия при контролируемых температуре и скорости вращения роторов. Основные задачи: диспергирование наполнителей, растворение пластификаторов, равномерное распределение вулканизирующих агентов. Оптимальные параметры подбираются исходя из вязкости каучука и рецептуры: для жёстких смесей требуется более интенсивное механическое воздействие, для мягких – щадящий режим во избежание преждевременной подвулканизации [1, с. 3-5].

Калибровка и формование заготовок обеспечивают получение полуфабрикатов заданной геометрии перед вулканизацией. Методы варьируются в зависимости от типа изделия: каландрование (для листов и плёнок), экструзия (для профилей и труб), шприцевание (для заготовок шин), прессование в формах (для уплотнителей и манжет). На данном этапе критически важны: точность размеров, отсутствие воздушных включений и равномерность толщины.

Аппаратурное обеспечение играет определяющую роль в достижении стабильного качества РТИ, поскольку технологическое оборудование обеспечивает реализацию всех ключевых стадий производства с требуемой точностью и воспроизводимостью. К основным группам оборудования относятся резиносмесители, каландры, экструдеры и вулканизационные прессы. Современные линии оснащаются автоматизированными системами управления, позволяющими отслеживать критические точки процесса и корректировать режимы в реальном времени [4, с. 22-23].

Таблица 1

Влияние технологических стадий на качество РТИ

Технологическая стадия	Основные параметры контроля	Возможные дефекты	Влияние на свойства изделия
Подготовка сырья	Влажность, дисперсность	Неоднородность смеси	Снижение прочности
смешение	Температура, время, скорость роторов	Подвулканизация, агломерация наполнителя	Потеря эластичности
Формование	Давление, точность геометрии	Пузыри, разнотолщинность	Нарушение размеров
Вулканизация	Температура, давление, время	Перевулканизация, недосшивка	Снижение износостойкости
Финишная обработка	Качество поверхности	Трещины, заусенцы	Ухудшение внешнего вида

Примечание: составлено авторами по результатам исследования.

Анализ современных производственных линий показывает, что автоматизация процессов позволяет повысить воспроизводимость свойств продукции и снизить долю технологического брака за счёт более точного контроля температурных режимов; конкретные количественные оценки эффекта в литературе варьируются в зависимости от типа линии и не приводятся в данной работе ввиду отсутствия единой методики измерения.

Важными тенденциями являются: переход на энергоэффективные нагреватели, внедрение бесконтактных методов контроля (ИК-термография, ультразвуковая дефектоскопия) и использование цифровых моделей для прогнозирования свойств изделий [5]. От надёжности и точности оборудования зависят: равномерность прогрева, стабильность геометрии, отсутствие перевулканизации и механическая прочность готовых изделий.

Анализ методов вулканизации резиновых изделий

Вулканизация представляет собой ключевой технологический процесс в производстве РТИ, в ходе которого происходит формирование пространственной сетчатой структуры эластомера за счёт образования поперечных связей между макромолекулами каучука. Этот процесс определяет основные эксплуатационные характеристики изделий: прочность, эластичность, износостойкость, термостойкость и устойчивость к деформациям. Выбор метода вулканизации зависит от типа каучука, рецептуры резиновой смеси, геометрии изделия, требований к свойствам и экономических факторов.

Серная вулканизация остаётся наиболее распространённым промышленным методом. В качестве сшивающего агента используется сера (1-3% от массы каучука) в сочетании с активаторами (оксид цинка, стеариновая кислота) и ускорителями. Образуются преимущественно полисульфидные и моносульфидные поперечные связи; типичный температурный диапазон – 140-160 градусов Цельсия, продолжительность – от нескольких минут до десятков минут в зависимости от рецептуры и толщины изделия [1, с. 3-5; 6].

Пероксидная вулканизация основана на радикальном сшивании макромолекул органическими пероксидами с образованием прочных углерод-углеродных связей. Метод обеспечивает повышенную термостойкость и устойчивость к старению; применяется преимущественно для насыщенных каучу-

ков (ЭПДМ, силиконовых, фторкаучуков), для которых серная система малоэффективна. Типичные температуры процесса – 160-180 градусов Цельсия [1, с. 3-5; 7].

Смоляная (фенольная) вулканизация основана на сшивании каучуков фенолформальдегидными смолами с образованием эфирных и метиленовых мостиков. Метод применяется главным образом для бутилкаучука и ЭПДМ; типичная температура процесса – 180-200 градусов Цельсия. Обеспечивает повышенную стойкость к агрессивным средам и тепловому старению [1, с. 2-4].

К физико-энергетическим методам вулканизации относятся радиационная, микроволновая и ТВЧ-вулканизация. Радиационная вулканизация основана на образовании макрорадикалов под действием ионизирующего излучения и обеспечивает точный контроль степени сшивки без вулканизирующих агентов. Микроволновое и ТВЧ-нагревание обеспечивают объёмный нагрев заготовки, что особенно эффективно для непрерывных линий и тонкостенных профилей [7; 8].

Сравнительный анализ методов вулканизации

Сводное сопоставление основных методов вулканизации по технологическим параметрам и сферам применения приведено в таблице 2. Сравнение выполнено по данным литературных источников; экспериментальная проверка в рамках настоящего обзора не проводилась.

Из данных, обобщённых в таблице 2, следует, что серная вулканизация сохраняет лидирующие позиции благодаря экономической доступности и универсальности применения. Для изделий, эксплуатируемых при повышенных температурах, более предпочтительной является пероксидная вулканизация, обеспечивающая высокую термостойкость и устойчивость к старению. Фенольная вулканизация применяется в нишевых задачах, требующих стойкости к агрессивным средам.

Особое место занимает вулканизация шин, отличающаяся повышенной сложностью из-за крупных габаритов изделий, многослойной структуры и необходимости равномерного прогрева. Основным методом является пресовая вулканизация в индивидуальных форматерах-вулканизаторах (ИФВ). Для крупногабаритных шин применяется автоклавная вулканизация, обеспечивающая более равномерный прогрев, но увеличивающая продолжительность цикла [9, с. 33–38].

Таблица 2

Сравнительная характеристика методов вулканизации (по литературным данным)

Метод вулканизации	Температура, °С	Продолжительность, мин.	Тип каучука	Толщина изделия	Свойства после вулканизации	Область применения	Источники
Серная	140–160	10–60	НК, СКИ, БСК, БНК	до десятков мм	Полисульфидные связи; высокая эластичность; умеренная теплостойкость (до ~100 °С)	Шины, массовые РТИ	[1; 6]
Пероксидная	160–180	5–30	ЭПДМ, силиконовые, фторкаучуки	малая и средняя	С–С связи; термостойкость до ~200 °С; устойчивость к старению	Тепло- и атмосферостойкие изделия	[1; 7]
Фенольная (смоляная)	180–200	10–60	Бутилкаучук, ЭПДМ	средняя	Эфирные/метиленовые мостики; хемостойкость; стойкость к перегретому пару	Изделия для агрессивных сред	[1]
Микроволновая	объёмный нагрев	сокращённый цикл	НК, СКИ, силиконовые	тонкостенные	Равномерная степень сшивки по объёму	Непрерывные профилли, шланги	[7; 8]
Радиационная	температура близка к комнатной	минуты	ПЭ, ЭПДМ, силиконовые	тонкие плёнки и оболочки	Контролируемая степень сшивки без агентов	Кабельная изоляция, спец. изделия	[8]
ТВЧ	объёмный нагрев	сокращённый цикл	НК, СКИ, БНК	средние и толстостенные	Равномерный прогрев по сечению	Толстостенные профилли и плиты	[5; 8]

Примечание: составлено авторами по [1; 5-8].

*Анализ современных тенденций
развития вулканизации*

По данным литературных источников, основными направлениями совершенствования процессов вулканизации являются повышение энергоэффективности, сокращение времени технологического цикла и снижение экологической нагрузки [5; 7; 8].

Микроволновая вулканизация за счёт объёмного нагрева позволяет существенно сократить продолжительность процесса по сравнению с традиционной серной вулканизацией; конкретные значения сокращения цикла, приводимые в литературе, зависят от рецептуры и геометрии изделия и не верифицировались в рамках настоящего обзора. Радиационная вулканизация обеспечивает высокую точность контроля степени сшивки, однако ограничивается высокой стоимостью оборудования и повышенными требованиями безопасности [7; 8].

Перспективным направлением развития процессов вулканизации считается внедрение цифровых систем управления, использующих датчики температуры, давления и крутящего момента, а также алгоритмы машинного обучения для прогнозирования свойств готовых изделий [10]. Такие системы обеспечивают непрерывный контроль технологических параметров в реальном времени и позволяют автоматически корректировать режимы вулканизации.

Выбор метода вулканизации определяется совокупностью технологических, эксплуатационных и экономических факторов. Ключевыми критериями являются тип каучука и рецептура смеси, геометрия изделия, требования к прочности и эластичности, условия эксплуатации, стоимость оборудования и экологические ограничения [11; 12]. Для тонкостенных изделий более рационально применение ТВЧ- и микроволновой вулканизации, тогда как для крупногабаритных изделий сохраняют актуальность автоклавные и прессовые методы.

Основными проблемами современных методов вулканизации остаются неравномерность прогрева толстостенных изделий, риск перевулканизации поверхностных слоёв, высокая энергоёмкость процессов и выбросы летучих соединений при серной вулканизации [13, с. 276-278]. Сопоставление различных технологий показывает, что традиционные методы уступают современным электрофизическим способам по скорости процесса, однако сохраняют преимущества в универсальности и стабильности получения изделий сложной формы.

В литературе обсуждаются «зелёные» вулканизирующие системы (со снижением

содержания серы и применением биоразлагаемых компонентов), которые рассматриваются как способ уменьшения экологической нагрузки; количественная оценка экологического эффекта зависит от методики сравнения и в данной работе не приводится [14]. Одновременно развивается автоматизация процессов с применением методов машинного обучения для прогнозирования свойств готовых изделий и снижения доли производственных дефектов. Ведётся также разработка специализированных режимов вулканизации для новых типов эластомерных материалов, включая термоэластопласты и биополимеры [15].

Таким образом, обзор современных публикаций позволяет предположить, что развитие методов вулканизации ориентировано на повышение качества продукции, снижение энергозатрат и экологической нагрузки производства. Наиболее перспективными направлениями представляются гибридные технологии, цифровизация управления процессом и внедрение экологически безопасных вулканизирующих систем.

Ограничения обзора

Настоящая работа имеет ряд ограничений, которые необходимо учитывать при интерпретации её результатов:

- работа представляет собой литературный обзор и не включает экспериментальной проверки рассмотренных методов вулканизации;
- сравнение методов вулканизации выполнено по литературным данным; единая методика сопоставления режимов и эксплуатационных характеристик в рассмотренных источниках отсутствует;
- количественная метаоценка энергоэффективности методов вулканизации и снижения доли брака не проводилась в связи с разнородностью первичных данных;
- приводимые сведения о температурных режимах и продолжительности процессов следует рассматривать как ориентировочные диапазоны; конкретные значения для промышленного применения должны уточняться по технологическим регламентам;
- обзор ограничен русскоязычной и доступной англоязычной литературой за период с 2015 по 2026 г.; работы на других языках и публикации с ограниченным доступом не рассматривались.

Заключение

В результате проведённого аналитического обзора методов РТИ удалось системно рассмотреть ключевые аспекты производства и технологического совершенствования данного процесса. Анализ предмета

исследования производства резины показал, что качество РТИ формируется на всех этапах производственного цикла – начиная с подбора сырьевой базы и заканчивая финишной обработкой изделий. Установлено, что определяющую роль играют: состав резиновой смеси (тип каучука, вулканизирующие агенты, наполнители, пластификаторы), физико-химические закономерности процесса вулканизации (формирование сетчатой структуры, кинетика реакции, влияние активаторов), точность соблюдения технологических режимов (смешение, формирование, вулканизация) и уровень аппаратного обеспечения.

Сравнительный анализ методов вулканизации показал, что классические методы (серная, пероксидная, смоляная) сохраняют значимость в промышленности, однако имеют ограничения по энергоёмкости, экологичности и адаптивности к новым материалам. Для крупногабаритных изделий, прежде всего шин, критически важны равномерность прогрева и точный контроль параметров, что обеспечивается прессовой и автоклавной вулканизацией. Среди перспективных направлений отмечены микроволновая, радиационная и ТВЧ-вулканизация, позволяющие, по литературным данным, сократить продолжительность цикла и улучшить равномерность сшивки.

Обобщая полученные результаты, можно предположить, что развитие методов вулканизации идёт по нескольким ключевым направлениям: внедрение гибридных технологий, экологизация производства, автоматизация и интеллектуализация процессов, адаптация к новым эластомерным материалам. Проведённый обзор позволяет предположить, что дальнейшее совершенствование методов вулканизации останется важным фактором конкурентоспособности резинотехнической промышленности; для получения количественно обоснованных выводов о сравнительной эффективности методов требуются дополнительные экспериментальные исследования и систематические метаанализы, выходящие за рамки настоящей работы.

Список литературы

1. Золотарев В. Л., Левенберг И. П., Зуев А. А., Ковалева Л. А., Люсова Л. Р., Липатова А. А. Ещё раз о 1,4-циполизопренах // Производство и использование эластомеров. 2021. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/escheraz-o-1-4-tsis-poliizoprenah> (дата обращения: 22.02.2026).

2. Осовская И. И., Савина Е. В., Левич В. Е. Эластомеры: учебное пособие. СПб.: ВШТЭ СПбГУТД, 2016. 126 с. ISBN 978-5-91646-085-8.

3. ГОСТ Р 58910.1-2020. Каучук и резина. Материалы промышленные контрольные. Ч. 1. Общие требования. Введ. 2021-01-01. М.: Стандартинформ, 2020. 24 с.

4. Назаров Э. С., Турсунов А. Н. Перспективные достижения в области технологии композиционных материалов // Вестник науки и образования. 2021. № 8-3 (111). С. 21–24. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivnyye-dostizheniya-v-oblasti-tehnologii-kompozitsionnyh-materialov> (дата обращения: 24.02.2026).

5. Люсова Л. Р., Чернышов С. В. Применение технологий цифровой трансформации в процессе разработки эластомерных материалов // Производство и использование эластомеров. 2022. №3-4. С. 33-38. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-tehnologii-tsifrovoy-transformatsii-v-protsesse-razrabotki-elastomernyh-materialov> (дата обращения: 29.02.2026).

6. Чайкун А. М., Алифанов Е. В., Наумов И. С. Эластомерные материалы для применения в топливных и масляных системах (обзор) // Новости материаловедения. Наука и техника. 2018. № 3–4 (30). С. 50–60.

7. Вольфсон С. И., Хусаинов А. Д., Панфилова О. А., Касперович А. В., Шашок Ж. С., Усс Е. П. Технология и переработка эластомеров: пневматические шины: учебное пособие для вузов. СПб.: Лань, 2024. 144 с. ISBN 978-5-507-52393-1. URL: <https://e.lanbook.com/book/482834> (дата обращения: 29.02.2026).

8. Амелина Н. В., Беляев П. С., Клинок А. С., Соколов М. В. Кинетика и аппаратурно-технологическое оформление процесса изготовления резиновых нитей из латекса: монография. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2015. 80 с. ISBN 978-5-8265-1405-4.

9. ГОСТ 18829-2017. Кольца резиновые уплотнительные круглого сечения для гидравлических и пневматических устройств. Технические условия. Дата введения 2018-07-01. М.: Стандартинформ, 2017.

10. Васильев В. А., Александрова С. В. Цифровые технологии в управлении качеством // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. № 10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-tehnologii-v-upravlenii-kachestvom> (дата обращения: 11.05.2026).

11. Пушница А. С., Власов В. В., Москалев А. С. Перспективы разработки топливостойких эластомерных материалов для применения в регионах с холодным климатом // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2025. Т. 87, № 1. С. 227–234. DOI: 10.20914/2310-1202-2025-1-227-234 (дата обращения: 22.02.2026).

12. Чайкун А. М., Наумов И. С., Алифанов Е. В. Резиновые уплотнительные материалы (обзор) // Труды ВИАМ. 2017. № 1 (49). С. 99–106. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-01-12-12. (дата обращения: 02.01.2026).

13. Ярцева Т. А., Карманова О. В., Михалева Н. А., Ткачев А. В. Использование модифицированного «неодимового» полибутадиена в рецептуре обкладки конвейерных лент // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84, № 2. С. 276–281. DOI: 10.20914/2310-1202-2022-2-276-281. (дата обращения: 08.01.2026).

14. Спиридонов И. С., Ушмарин Н. Ф., Егоров Е. Н., Сандалов С. И., Кольцов Н. И. Влияние графена на свойства термоагрессивостойкой резины // Промышленное производство и использование эластомеров. 2021. № 1. С. 29–33.

15. Тихомиров С. Г., Карманова О. В., Битюков В. К., Маслов А. А. Программное обеспечение задачи определения оптимального времени вулканизации резиновых смесей // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2018. № 4. С. 108–116. DOI: 10.17308/sait.2018.4/1260.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.