

УДК 628.4.047

Лоренц Анатолий Сергеевич, к.т.н., доцент, зав. кафедрой, Северный Арктический Федеральный университет им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия

Витязев Михаил Владиславович, старший преподаватель, Северный Арктический Федеральный университет им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия

Цехмистрова Татьяна Евгеньевна, старший преподаватель, Северный Арктический Федеральный университет им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ ИЗНОШЕННЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ, ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ТРАЕКТОРИИ РАЗВИТИЯ

Аннотация

В работе выполнен анализ технологических подходов к утилизации отработанных пневматических покрышек. Рассмотрены механические, термические и химические способы рециклинга, приведены количественные показатели их результативности. Выявлены экологические и экономические эффекты внедрения технологий замкнутого цикла. Определены системные ограничения развития исследуемой отрасли на территории Российской Федерации с учётом международного опыта. Особое внимание уделено сравнительной оценке энергоэффективности различных методов переработки, а также анализу рынка вторичных продуктов, получаемых из изношенных шин. Показано, что механический рециклинг резиновой крошки остаётся наиболее доступным с экономической точки зрения, однако пиролиз и химическая деполимеризация обеспечивают получение продуктов с более

высокой добавленной стоимостью. Обоснована необходимость совершенствования логистической инфраструктуры сбора шин и механизма расширенной ответственности производителя. На основе анализа зарубежного опыта (Германия, Япония, США, Китай) предложены траектории развития отрасли в Российской Федерации, включая внедрение биотехнологических методов и аддитивных технологий. Сделан вывод о том, что комплексное решение проблемы утилизации шин лежит на пересечении технологической модернизации, государственной поддержки и формирования циркулярной экономики.

Annotation

This paper presents an analysis of technological approaches to the disposal of end-of-life pneumatic tires. Mechanical, thermal, and chemical recycling methods are examined, with quantitative performance characteristics provided. Environmental and economic effects of implementing closed-loop technologies are identified. Systemic constraints on the development of this industry in the Russian Federation are determined in the context of international experience. Special attention is paid to the comparative assessment of energy efficiency of various recycling methods, as well as to the analysis of the secondary products market derived from worn tires. It is shown that mechanical recycling of rubber crumb remains the most economically accessible, while pyrolysis and chemical depolymerization yield products with higher added value. The necessity of improving the logistical infrastructure for tire collection and the extended producer responsibility mechanism is substantiated. Based on an analysis of foreign experience (Germany, Japan, USA, China), development trajectories for the industry in the Russian Federation are proposed, including the implementation of biotechnological methods and additive technologies. It is concluded that a comprehensive solution to the tire recycling problem lies at the intersection of technological modernization, government support, and the formation of a circular economy.

Ключевые слова: утилизация шин, резиновая крошка, пиролиз, деполимеризация, циркулярная экономика, расширенная ответственность производителя, экологическая безопасность.

Keywords: tire recycling, rubber crumb, pyrolysis, depolymerization, circular economy, extended producer responsibility, environmental safety.

Введение

Действующее природоохранное законодательство, в частности нормативные акты Европейского союза в области обращения с отходами, предъявляет повышенные требования к промышленной утилизации крупнотоннажных отходов. Автомобильные покрышки относятся к категории трудноразлагаемых материальных объектов с высоким периодом естественной деструкции. Несоблюдение регламентов утилизации влечёт применение значительных штрафных санкций. В данной логике формируется объективная потребность перехода от линейной модели экономики к циркулярной, при которой отходы рассматриваются в качестве вторичных материальных ресурсов [1].

Технологические подходы к утилизации изношенных шин

Механическая переработка базируется на поэтапной деструкции шин с использованием шредерного и грануляционного оборудования. Технологический процесс позволяет получить резиновую крошку с регулируемым гранулометрическим составом (фракции от 0,5 до 5 мм и более). Данный продукт находит применение в дорожном строительстве в качестве модифицирующей добавки к асфальтобетонным смесям. Введение резиновой крошки в состав покрытия обеспечивает улучшение деформационно-прочностных характеристик, снижение уровня транспортного шума (на 2–4 дБА) и увеличение межремонтного ресурса дорожной одежды. По данным отечественных практик реализации проектов в Москве и Санкт-Петербурге, применение указанного материала способствует

продлению межремонтных интервалов на 20–30 % относительно нормативных значений [2].

Пиролитический метод реализуется в условиях термического воздействия в бескислородной среде при температурном диапазоне 450–600 °С. В ходе процесса шинная резина подвергается термодеструкции с образованием трёх фракций: горючих газов (20–25 % по массе), жидких углеводородов – пиролизного масла (40–50 %) и твёрдого углеродсодержащего остатка – технического углерода (30–35 %). Энергетическая эффективность метода характеризуется извлечением до 45 % энергоносителей от исходной массы сырья. Наибольшее промышленное распространение технология получила в Китае и США, где пиролизное масло применяется в качестве альтернативного топлива на цементных заводах и ТЭЦ. К числу ограничивающих факторов относятся высокие капитальные затраты на оснащение установок системами газоочистки (до 30–40 % от стоимости линии) и необходимость обеспечения взрывопожаробезопасности [3].

Наиболее технологически сложным направлением является химическая переработка, предполагающая каталитическое расщепление вулканизированной резины до исходных мономерных структур (стирола, бутадиена, изопрена). Восстановленное сырьё пригодно для повторного использования в производственном цикле изготовления новых шин. Японская корпорация Bridgestone реализует технологические решения, позволяющие достигать коэффициента возврата материалов в оборот до 90 % от исходной массы. Помимо перечисленных методов, изношенные покрышки находят применение в строительной отрасли: в качестве армирующих элементов при укреплении насыпей, устройстве противозумовых экранов, а также в виде грунтозаполненных блоков в энергоэффективном малоэтажном строительстве [2].

Реализация программ утилизации шин способствует сокращению объёмов захоронения отходов и предотвращает поступление стойких

органических загрязнителей (бензопирен, фталаты, тяжёлые металлы) в грунтовые воды и почву. По расчётам Европейского агентства по охране окружающей среды, переработка одной метрической тонны покрышек обеспечивает снижение выбросов парниковых газов в объёме около 2 тонн CO₂-эквивалента за счёт замещения первичного нефтехимического сырья. Механический рециклинг характеризуется в 5–10 раз более низкой удельной энергоёмкостью (кВт·ч/т) относительно производства первичной синтетической резины из нефтяного сырья [1].

Оборот рынка переработанных шин в странах Европейского союза превышает 10 млрд евро в год. В Российской Федерации государственная поддержка отрасли осуществляется в рамках национального проекта «Экология», предусматривающего создание специализированных предприятий по обработке отходов. Одно типовое производство по переработке шин производительностью 5–10 тыс. т/год обеспечивает занятость до 200 высококвалифицированных специалистов. Выпуск резинотехнических изделий (покрытий для детских и спортивных площадок, дорожных бордюров, шумопоглощающих панелей) из вторичного сырья демонстрирует снижение себестоимости на 20–30 % по сравнению с использованием первичных полимерных материалов [3].

Согласно статистическим данным Федеральной службы по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзор), на территории Российской Федерации перерабатывается лишь 20–25 % от общего объёма образующихся изношенных шин. Для сравнения, в Германии и скандинавских странах данный показатель достигает 95–98 %. Основными системными препятствиями выступают недостаточная развитость логистической инфраструктуры сбора (дефицит пунктов приёма, отсутствие маркированных контейнерных площадок) и неполноценно функционирующий механизм расширенной ответственности производителя (РОП), при котором фактическое перераспределение затрат на утилизацию остаётся неэффективным [4].

К числу перспективных направлений развития отрасли относятся:

биотехнологические методы деструкции резины с использованием специализированных штаммов микроорганизмов (например, *Pseudomonas* spp. и *Rhodococcus* spp.), способных к деполимеризации серных связей;

аддитивные технологии, включая 3D-печать изделиями из резиновой крошки с полимерным связующим;

адаптация систем утилизации к особенностям шин для электромобилей, обусловленных более высокой массой, иным составом резиновых смесей (повышенное содержание диоксида кремния) и наличием литиевых аккумуляторных батарей, требующих сепарации [4].

Международное сотрудничество в рамках Евразийского экономического союза (ЕАЭС) способствует трансферу технологических решений в области глубокой переработки шин из стран Таможенного союза. Комплексное внедрение указанных мер позволит трансформировать сегмент утилизации покрышек в одну из базовых составляющих «зелёной» экономики.

Заключение

Утилизация изношенных автомобильных покрышек представляет собой многокомпонентную технико-экономическую задачу, решение которой лежит на пересечении требований экологической безопасности, ресурсосбережения и технологической модернизации. Применяемые в мировой практике методы – от механического измельчения до высокотехнологичной деполимеризации – демонстрируют потенциал превращения отходов в ликвидные вторичные продукты с высокой добавленной стоимостью. Для достижения показателей переработки, сопоставимых с лидирующими странами (Германия, Япония, США), требуется развитие инфраструктуры сбора, совершенствование нормативно-правовой базы в части механизма расширенной ответственности производителей, а также системные инвестиции в технологическое обновление отрасли [1–4].

Список использованных источников

1. Упоров Д. А., Румянцева А. В. Экологические аспекты переработки автомобильных шин // Стратегии устойчивого развития экономики и бизнеса : материалы Международной научно-практической конференции. — Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2018. — С. 182–185. — URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/74200/1/sueb_2018_038.pdf (дата обращения: 23.03.2026).
2. Способы переработки шин — преимущества и недостатки [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://rezcom.ru/stati/sposoby-pererabotki-shin-preimushchestva-i-nedostatki/> (дата обращения: 23.03.2026).
3. Анализ конкурентных преимуществ технологий переработки изношенных автомобильных шин [Электронный ресурс] // Научная электронная библиотека «КиберЛенинка». — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-konkurentnyh-preimuschestv-tehnologiy-pererabotki-iznoshennyh-avtomobilnyh-shin/viewer> (дата обращения: 23.03.2026).
4. Перспективы переработки автомобильных покрышек [Электронный ресурс] // Научная электронная библиотека «КиберЛенинка». — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-pererabotki-avtomobilnyh-pokryshek/viewer> (дата обращения: 23.03.2026).
5. Thomas V.S., Gupta R.C. Всесторонний обзор применения отходов резиновых шин в цементном бетоне // Возобновляемые и устойчивые источники энергии. 2016. Т. 54. С. 1323–1333. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.092>
6. Martinez J.D., Puy N., Murillo R., García T., Navarro M.V., Mastral A.M. Пиролиз отходов шин — обзор // Возобновляемые и устойчивые источники энергии. 2013. Т. 23. С. 179–213. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.038>

7. Sienkiewicz M., Kucinska-Lipka J., Janik H., Balas A. Прогресс в управлении использованными шинами в Европейском союзе: обзор // Управление отходами. 2012. Т. 32, № 10. С. 1742–1751. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.05.010>

8. Европейская ассоциация производителей шин и резинотехнических изделий (ETRMA). Отчёт об управлении отработанными шинами. Брюссель: ETRMA, 2022. 45 с. URL: <https://www.etrma.org> (дата обращения: 23.03.2026).

9. Rowhani A., Rainey T.J. Пути управления отходами шин и их использование в качестве топлива — обзор // Энергетика. 2016. Т. 9, № 11. С. 888. <https://doi.org/10.3390/en9110888>

Literature

1. Uporov D.A., Rummyantseva A.V. Environmental aspects of automobile tire recycling // Strategies for Sustainable Economic and Business Development: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. — Yekaterinburg: Ural University Press, 2018. — P. 182–185. — URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/74200/1/sueb_2018_038.pdf (accessed: 23.03.2026).

2. Methods of tire recycling — advantages and disadvantages [Electronic resource]. — Access mode: <https://rezcom.ru/stati/sposoby-pererabotki-shin-preimushchestva-i-nedostatki/> (accessed: 23.03.2026).

3. Analysis of competitive advantages of worn tire recycling technologies [Electronic resource] // Scientific electronic library "CyberLeninka". — Access mode: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-konkurentnyh-preimuschestv-tehnologiy-pererabotki-iznoshennyh-avtomobilnyh-shin/viewer> (accessed: 23.03.2026).

4. Prospects for automobile tire recycling [Electronic resource] // Scientific electronic library "CyberLeninka". — Access mode: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-pererabotki-avtomobilnyh-pokryshek/viewer> (accessed: 23.03.2026).

5. Thomas B.S., Gupta R.C. A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 54. P. 1323–1333. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.092>

6. Martinez J.D., Puy N., Murillo R., García T., Navarro M.V., Mastral A.M. Waste tyre pyrolysis – A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 23. P. 179–213. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.038>

7. Sienkiewicz M., Kucinska-Lipka J., Janik H., Balas A. Progress in used tyres management in the European Union: A review // Waste Management. 2012. Vol. 32, No. 10. P. 1742–1751. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.05.010>

8. European Tyre & Rubber Manufacturers' Association (ETRMA). End-of-Life Tyres Management Report. Brussels: ETRMA, 2022. 45 p. URL: <https://www.etrma.org> (accessed: 23.03.2026).

9. Rowhani A., Rainey T.J. Scrap tyre management pathways and their use as a fuel – A review // Energies. 2016. Vol. 9, No. 11. P. 888. <https://doi.org/10.3390/en9110888>