

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2026, Том 18, № 4 / 2026, Vol. 18, Iss. 4 <https://esj.today/issue-4-2026.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/42NZVN426.pdf>

DOI: 10.15862/42NZVN426 (<https://doi.org/10.15862/42NZVN426>)

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Хакимова, А. Д. Сравнение двух перспективных технологий для утилизации отработанных шин: пиролиз и производство резиноасфальтобетона / А. Д. Хакимова, Л. М. Молодкина, Н. В. Майданова // Вестник евразийской науки. — 2026. — Т. 18. — № 4. — URL: <https://esj.today/PDF/42NZVN426.pdf>. DOI: 10.15862/42NZVN426.

For citation:

Khakimova A.D., Molodkina L.M., Maidanova N.V. A comparison of two promising technologies for recycling waste tires: pyrolysis and rubber-asphalt concrete production. *The Eurasian Scientific Journal*. 2026;18(4): 42NZVN426. Available at: <https://esj.today/PDF/42NZVN426.pdf>. DOI: 10.15862/42NZVN426. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 502.174.1:658.567.1

Хакимова Анна Дмитриевна

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия
Аспирант

E-mail: ann_mrasteva@mail.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1332085

Молодкина Людмила Михайловна

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия
Высшая школа гидротехнического и энергетического строительства

Профессор

Доктор физико-математических наук, профессор

E-mail: molodkina.lm@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6056-6618>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=99645

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/AAF-4781-2019>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6603631466>

Google Академия: <https://scholar.google.ru/citations?user=2o28sbYAAAAJ>

Майданова Наталья Васильевна

НИЦ АО «АБЗ-1», Санкт-Петербург, Россия

Руководитель, заместитель директора по качеству

Кандидат технических наук

E-mail: nmaydanova@abz-1.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1270693

Сравнение двух перспективных технологий для утилизации отработанных шин: пиролиз и производство резиноасфальтобетона

Аннотация. В статье представлен сравнительный анализ двух наиболее перспективных технологий утилизации отработанных шин — пиролиза и использования резиновой крошки в качестве модификатора асфальтобетонных смесей. Ежегодно в мире образуется около 1,5 млрд отработанных шин, что создает серьезную экологическую проблему, поскольку данный вид отходов практически не разлагается в природных условиях. Традиционные методы утилизации, включая захоронение и сжигание, сопряжены с загрязнением почвы, воды и атмосферы токсичными веществами. Авторами проанализированы результаты исследований, выполненных с

применением методологии оценки жизненного цикла, что позволило количественно оценить экологические преимущества каждой из рассматриваемых технологий. Показано, что пиролиз как технология материальной переработки (R8 по классификации R-стратегий) обеспечивает снижение выбросов парниковых газов за счет замещения первичного технического углерода и дизельного топлива. В то же время применение резиновой крошки в дорожном строительстве позволяет сократить углеродный след асфальтобетонных покрытий по сравнению с традиционными смесями за счёт увеличения срока службы покрытия и снижения процентного содержания сырья, добыча которого увеличивает углеродный след в жизненном цикле асфальтобетонного покрытия на этапе «Добыча сырья и производство сырья». Проведен детальный сравнительный анализ углеродного следа обеих технологий с учетом системных границ, качества получаемых продуктов и эффекта замещения первичных ресурсов. Выявлено, что ключевым фактором, определяющим экологическую эффективность обеих технологий, является качество получаемых продуктов и их способность замещать первичные ресурсы. Результаты исследования могут быть использованы при разработке стратегий управления отходами и выборе приоритетных направлений развития циркулярной экономики в сфере утилизации шин.

Ключевые слова: отработанные шины; пиролиз шин; резиноасфальтобетон; резиновая крошка; утилизация отходов; углеродный след; модифицированный битум; оценка жизненного цикла

Введение

Ежегодно в мире образуется около 1,5 млрд отработанных шин, и этот показатель продолжает неуклонно расти [1; 2]. Согласно прогнозам, к 2030 году количество отработанных шин в России достигнет 1,2 млрд единиц, что создает серьезную экологическую проблему [3; 4]. В Ленинградской области более 70 % тяжелых отходов приходится именно на шины с истекшим сроком службы, поэтому вопрос быстрой утилизации шин для региона стоит наиболее остро и является приоритетной задачей.

Шины представляют собой сложный композитный материал, содержащий натуральный и синтетический каучук (30–45 %), технический углерод (около 28 %), а также различные добавки, включая серу и оксид цинка [1]. Благодаря вулканизации шины приобретают трехмерную сшитую структуру, что делает их чрезвычайно устойчивыми к биологическому и фотохимическому разложению [4; 5].

Традиционные методы обращения с отработанными шинами — захоронение на полигонах и сжигание — сопряжены с серьезными экологическими рисками. Захоронение шин приводит к загрязнению почвы и грунтовых вод токсичными веществами, включая тяжелые металлы (цинк, свинец, кадмий) и полициклические ароматические углеводороды [2; 6]. Кроме того, шинные свалки представляют серьезную пожарную опасность [3]. Сжигание шин, даже при наличии систем очистки, сопровождается выбросами диоксинов, фуранов, оксидов серы и азота, а также тяжелых металлов [6; 7].

В этих условиях поиск экологически эффективных технологий утилизации шин становится одной из приоритетных задач современной экономики замкнутого цикла. Среди наиболее перспективных направлений переработки отработанных шин можно выделить две технологии, получившие значительное развитие в последние десятилетия: пиролиз, позволяющий получать пиролизное масло, газ и восстановленный технический углерод [7; 8], и использование резиновой крошки в качестве модификатора асфальтобетонных смесей [9–12].

Цель настоящей работы — выполнить комплексный сравнительный анализ двух перспективных технологий утилизации отработанных шин — пиролиза и применения резиновой

крошки в асфальтобетонных смесях — по экологическим, экономическим и циркулярным критериям на основе результатов научных исследований. В рамках работы решаются следующие задачи: количественное определение сокращения выбросов парниковых газов для каждой технологии с учётом анализа жизненного цикла и эффекта замещения первичных ресурсов; сравнительный анализ прямых и совокупных затрат с учётом капитальных вложений и качества конечной продукции; определение уровня циркулярности согласно классификации R-стратегий; выявление экологических рисков при производстве и эксплуатации продуктов двух технологий.

Основная часть

Пиролиз представляет собой термическое разложение органических веществ под действием высоких температур без доступа воздуха, при котором обеспечивается протекание глубоких деструктивных превращений [13]. В отличие от сжигания, пиролиз проводится в бескислородной или инертной атмосфере, что позволяет избежать прямого окисления и значительно снизить эмиссию загрязняющих веществ [14]. Технологическая схема процесса включает несколько последовательных стадий: подготовку сырья (разделка шин на крупные куски), загрузку в реактор, собственно пиролиз при температуре 450–600°C, конденсацию и разделение продуктов [15; 16]. Принципиальная схема установки, представленная на рисунке 1, включает реактор пиролиза с дальнейшим разделением продуктов на газообразные и плотные, ёмкости для сбора жидких фракций, а также оборудование для механической обработки твёрдого остатка [15; 17].

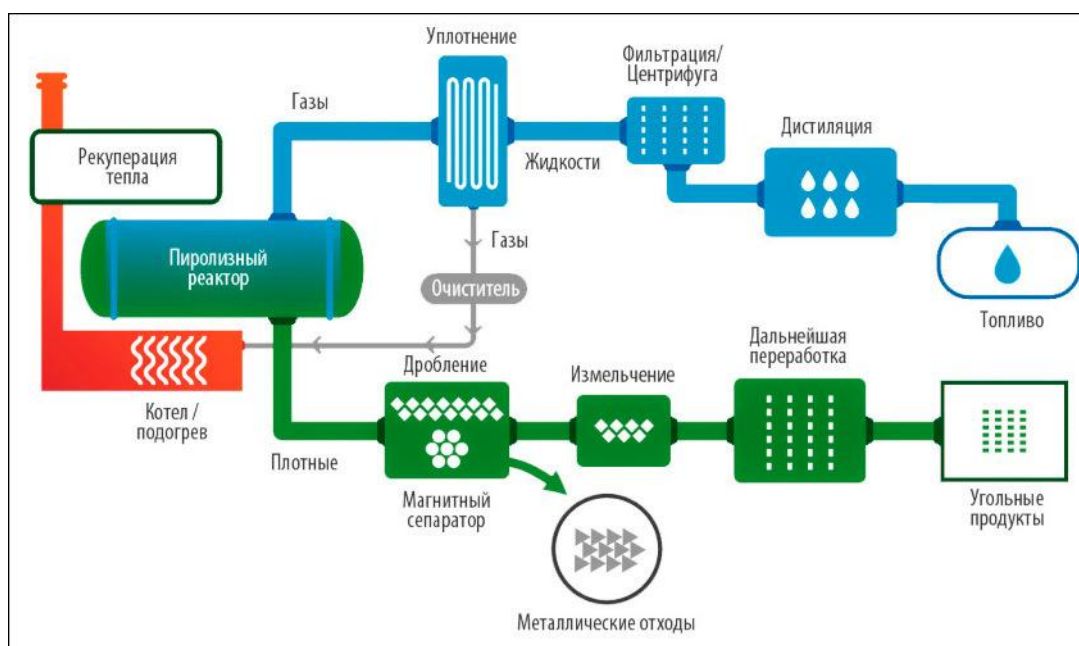


Рисунок 1. Схема установки пиролиза шин [18]

В ходе пиролиза шин образуются три основных продукта: пиролизное масло (жидкая фракция), пиролизный газ и твердый остаток (технический углерод) [4]. Выход продуктов зависит от температуры процесса, скорости нагрева, типа реактора и наличия катализаторов [19, 20]. При повышении температуры от 450 до 600°C выход жидкой фракции снижается, а газообразной — возрастает [4]. Максимальный выход пиролизного масла обычно достигается в диапазоне 450–550°C и составляет 40–50 % от массы исходного сырья [9]. Твердый остаток составляет 33–40 %, а газообразные продукты — 5–20 % в зависимости от температуры процесса [4].

Пиролизный газ обладает высокой теплотворной способностью, достигающей при 400°C значения 34,5 МДж/кг, что позволяет использовать его для энергообеспечения самого процесса, снижая тем самым потребность во внешнем топливе и уменьшая общий углеродный след установки. Пиролизный газ имеет сложный состав: основными компонентами являются метан (36,8 %), этан (12,1 %), пропан (9,2 %), бутаны и изобутаны (суммарно около 11 %), а также около 24,7 % диоксида углерода [7]. Благодаря тому, что пиролиз протекает в бескислородной среде, в газе практически отсутствуют диоксины, фураны и многие полициклические ароматические углеводороды, характерные для продуктов открытого горения шин. Однако главной экологической проблемой газа является высокое процентное содержание серосодержащих соединений, прежде всего сероводорода, метил- и этилмеркаптанов, карбонилсульфида и сероуглерода. Их концентрации нередко превышают 500 ppm, а расчётное общее содержание серы в газе составляет около 3–3,8 массовых процента. Эти вещества токсичны, обладают удушающим и раздражающим действием, а при сжигании газа переходят в диоксид серы, способствующий образованию кислотных дождей [3].

Пиролизное масло, получаемое в виде тёмной жидкости с удельным весом около 0,95 г/см³, по данным хроматографического анализа состоит из 66 % бензиновых фракций (изопентан, пентены, пентадиены, гексаны), около 10 % гексановых соединений, включая лимонен, и примерно 24 % тяжёлых масел [8]. Оно является ценным жидким топливом с высшей теплотой сгорания более 42 МДж/кг при температурах пиролиза выше 500°C, что делает его сопоставимым с мазутом. С экологической точки зрения очень важным является то, что масло практически полностью свободно от тяжёлых металлов — за исключением ртути, содержание которой составляет всего 0,01–0,02 ppm, все остальные анализируемые металлы находятся ниже пределов обнаружения. Это означает, что при сжигании масла не возникает дополнительного загрязнения атмосферы, почвы или воды токсичными элементами, и его использование в энергетике или в качестве сырья для химической промышленности не создаёт проблемы с металлическими токсикантами. Кроме того, масло богато ценными органическими соединениями, такими как лимонен (до 22 % при 400°C), толуол, ксилолы и этилбензол, что открывает возможность для материальной рекуперации и сокращения потребления нефтяного сырья. Однако серьёзным недостатком масла является содержание серы на уровне 1,2–1,3 %, что требует дополнительной очистки перед сжиганием во избежание выбросов диоксида серы. Также в масле присутствует до 1,5 % азота, который при горении может давать оксиды азота, хотя их фактический выброс сильно зависит от условий сжигания и не является критичным при правильной организации процесса [3].

Твёрдый остаток, который в дальнейшем дополнительно обрабатывают для получения пиролизного углерода, также обладает значительной энергетической ценностью — до 35,5 МДж/кг при 400°C — и может использоваться как твёрдое топливо, а также как основа для производства активированных углей и в металлургии. Характеризуется содержанием углерода около 87,8 % [7]. Содержание тяжёлых металлов в нём, как правило, невысоко и в большинстве случаев находится ниже нормативов для почв, что позволяет рассматривать его как относительно безопасный материал для промышленного применения. Температурный режим пиролиза напрямую определяет распределение тяжёлых металлов между продуктами. При 400°C в твёрдом остатке сохраняется ртуть (0,01 ppm), тогда как при 500 и 600°C она полностью десорбируется в газовую фазу, что делает пиролизный углерод более чистым. Этот факт является одним из аргументов в пользу проведения процесса при повышенных температурах (450–550°C), обеспечивающих не только более высокий выход газа и масла, но и получение твёрдого продукта с минимальным содержанием токсичных примесей, что снижает риски при его захоронении или сжигании. Тем не менее, пиролизный углерод содержит от 2,5 до 2,9 % серы, а также имеет высокую зольность (16–18 %) из-за присутствия металлических включений из стального корда в составе шин и различных добавок, что требует правильного обращения с золой при его сжигании или захоронении [3].

При оценке жизненного цикла пиролиза шин выделяют несколько последовательных этапов, каждый из которых вносит свой вклад в общий экологический баланс. Процесс начинается со сбора отработанных шин и их транспортировки к месту переработки (A1), причём дальность перевозок напрямую влияет на выбросы от сжигания топлива. Далее следует стадия механической подготовки сырья (A2), включающая резку, измельчение и отделение металлического корда с текстилем, что требует значительных затрат электроэнергии. Наиболее энергоёмким является сам пиролиз (A3), который проводят с использованием либо внешнего топлива, либо собственного пиролизного газа. Последнее позволяет значительно снизить внешнее энергопотребление. После пиролиза следует стадия разделения (A4) и стадия обработки твёрдого остатка (A5) для получения технического углерода. Для корректной оценки экологической эффективности учитывают эффект замещения: пиролизное масло и технический углерод заменяют собой первичные ресурсы — нефтяное топливо и товарный углерод, получаемые из нефти, что существенно улучшает итоговый баланс выбросов [21].

Авторами отмечено, что наибольший вклад в сокращение выбросов обеспечивается за счёт замены традиционной схемы (энергоёмкое производство технического углерода из нефти + сжигание отработанных шин) на пиролизную переработку шин в технический углерод без добычи нефти и сжигания шин. Это позволяет избежать двух основных источников эмиссий, благодаря чему удельный выброс (1064 кг CO₂-экв./т) значительно снижается [7, 8]. При этом основной вклад в выбросы при пиролизе вносят две стадии: сжигание образующегося в процессе пиролизного газа (51 % от общего углеродного следа, если он не используется для замещения внешнего топлива) и очистка/доработка твёрдого остатка (кокса) до готового технического углерода (30 %) [8].

Экологическая эффективность пиролиза существенно зависит от того, как именно учитывается эффект замещения первичного технического углерода. Если учитывать только замену нефтяного сырья, пиролиз выглядит очень выгодно. Однако при детальном анализе всего жизненного цикла (LCA) выясняется, что значительную долю негативного воздействия дают последующие стадии переработки пиролизного продукта — модификация твёрдого пиролизного остатка (A5), а также сжигание пиролизного газа. Именно эти стадии могут свести на нет часть выигрыша от замещения, если их не оптимизировать [7].

Важно отметить, что пиролизный газ, образующийся в процессе, имеет высокую теплотворную способность (в среднем 37,3 МДж/кг). Сжигая 30–50 % этого газа, можно полностью обеспечить энергией реакцию пиролиза, что делает процесс энергетически самодостаточным. Это ключевое преимущество, поскольку в идеальных условиях внешние энергозатраты на нагрев (но не на вспомогательное оборудование) могут быть сведены к нулю [7].

Пиролиз — это энергоёмкий процесс, требующий нагрева шин до 400–700°C в бескислородной среде. Основные затраты приходятся на нагрев реактора. Согласно исследованиям, удельное теплотребление процесса пиролиза составляет 2,313 МДж на 1 кг шин. Другие оценки показывают, что тепло, необходимое для реакции, находится в диапазоне 1,41–2,16 кДж на 1 грамм шин (что равно 1,41–2,16 МДж/кг). Помимо тепла, требуется электроэнергия для работы вспомогательного оборудования (редукторы, насосы). Например, пиролизная установка мощностью 10 тонн в сутки потребляет около 250–300 кВт·ч электроэнергии в сутки, что в общем увеличивает углеродоемкость процесса производства [22].

В исследовании [9] показано, что главный вклад в нагрузку (токсичность, экотоксичность, истощение ресурсов) вносит химическая модификация азотной кислотой. При её замене на физическую (измельчение, промывка, просев) нагрузка снижается на 99,2 %. Таким образом, итоговая экологическая выгода пиролиза напрямую зависит от того, включаются ли в расчёт эти «скрытые» стадии, а также от выбранного метода модификации и способов утилизации побочных продуктов [9].

В работе [23] исследовано влияние катализаторов на процесс пиролиза шин. Показано, что применение $\text{Ca}(\text{OH})_2$ позволяет снизить содержание серы в пиролизном масле до 0,82 %, что соответствует требованиям Директивы ЕС 2016/802 (содержание серы не более 1,00 %). При этом использование $\text{Ca}(\text{OH})_2$ обеспечивает наименьший углеродный след среди исследованных каталитических конфигураций. В то же время применение MgO позволяет получить более высокий выход масла (34,5 %), но сопровождается более высоким содержанием серы (0,93 %) и значительно более высоким углеродным следом из-за энергоемкости производства катализатора.

Экономический анализ пиролизных технологий, представленный в работе [24], показывает, что пиролизный завод может быть прибыльным в долгосрочной перспективе, а также полностью решить проблему утилизации шин, но его рентабельность сильно зависит от рыночных цен на нефтепродукты (пиролизное масло, технический углерод) и стоимости сырья (отработанных шин). В России прогнозируется значительный рост количества отработанных шин, что создает стабильную сырьевую базу для пиролизных заводов [3; 15; 18]. Следовательно, экономическая эффективность проектов переработки шин методом пиролиза будет зависеть от государственной поддержки (субсидии, экологические сборы при покупке шин, запрет на захоронение) и экономической политики страны.

В то же время многие авторы считают, что пиролиз отработанных шин до сих пор является неэкономичным из-за отсутствия установленного рынка для пиролизного масла и пиролизного технического углерода. Для решения проблемы применения продуктов пиролиза большинство существующих исследований сконцентрированы на получении пиролизного масла, которое может использоваться в дизельных двигателях [25; 26]. Авторы [7] показали, что после гидроочистки масла от пиролиза шин можно получить топливо хорошего качества, которое может использоваться в легковых автомобилях и фургонах. Однако в любом случае продукты пиролиза требуют дополнительной дорогостоящей обработки для достижения качества, пригодного к использованию, что значительно увеличивает срок окупаемости всего производства и снижает его экономическую привлекательность по сравнению с более простыми методами утилизации шин, такими как измельчение шин до резиновой крошки [7; 24–26].

Использование резиновой крошки из отработанных шин в качестве модификатора асфальтобетонных смесей является одной из наиболее распространенных и хорошо изученных технологий переработки шин.

Принципиальная технологическая схема производства резиноасфальтобетона включает следующие стадии: подготовку сырья (предварительный нагрев битума в битумной установке и сушку минерального заполнителя в сушильном барабане); смешивание резиновой крошки с битумом или с минеральным заполнителем после сушки; приготовление асфальтобетонной смеси в смесительной установке [5; 27].

Включение резиновой крошки в асфальтобетонные смеси может осуществляться двумя основными способами — мокрым и сухим [11; 28]. При мокром способе резиновая крошка добавляется непосредственно в битум до смешивания с минеральными заполнителями. Содержание резины в битуме обычно составляет от 15 до 22 % от массы битума, процесс проводится при температуре 180–200°C в течение 45–60 минут, что обеспечивает набухание резиновых частиц и их взаимодействие с битумом [11 29]. Полученный модифицированный битум, называемый асфальт-каучуком, характеризуется повышенной вязкостью и эластичностью [11; 30]. При сухом способе резиновая крошка добавляется непосредственно к нагретым минеральным заполнителям до введения битума, заменяя часть мелкой фракции заполнителя [11; 12]. Содержание резины обычно составляет 1–3 % от массы битума [12]. Сухой способ проще в реализации и не требует специального оборудования (как для мокрого метода), однако качество полученных смесей часто оказывается менее стабильным [11; 29].

Резиновая крошка, используемая для модификации асфальтобетона, получается путём механической переработки отработанных шин. Существует два основных метода получения резиновой крошки: амбиентное измельчение при нормальной температуре и криогенное измельчение с использованием жидкого азота [31]. Амбиентное измельчение даёт частицы неправильной формы с шероховатой поверхностью и вдвое большей удельной поверхностью по сравнению с криогенным методом, что обеспечивает лучшее взаимодействие с битумом [31; 32]. В ходе этого процесса образуются реакционноспособные группы для образования сетчатых структур с компонентами нефтяных битумов [33]. Криогенное измельчение позволяет получить более однородные по форме и размеру частицы, но является более дорогостоящим [31].

Использование резиновой крошки с более развитой поверхностью частиц считается более предпочтительным при производстве резиноасфальтобетонов. Процесс увеличения площади поверхности резиновой крошки называют активацией, а саму резиновую крошку — активированной резиновой крошкой. Для оценки степени активации поверхности резиновой крошки, приемо-сдаточного контроля качества эластомерных модификаторов у производителей и входного контроля на асфальтобетонных заводах используется золь-гель метод, усовершенствованный к поставленным задачам.

Проблемами промышленного использования резиновой крошки в качестве модификатора асфальтобетонных смесей являются непостоянство состава исходной резины, невозможность контроля качества потребителем — асфальтобетонным заводом, недостаточность нормативной базы [33; 34].

Резиновую крошку можно рассмотреть в качестве замены стирол-бутадиен-стирольного (СБС) модификатора асфальтобетона для улучшения свойств битума. Однако по сравнению с СБС резиновая крошка имеет несколько другой механизм работы в битумном вяжущем. За счет своего многокомпонентного состава резиновая крошка работает как механический модификатор: не растворяющиеся в битуме компоненты резины работают как упругий наполнитель. Последнее свойство особенно ярко отражается на снижении колееобразования. Такая структура модифицированного асфальтобетона эффективнее гасит звуковые волны от проезжающего транспорта, что позволяет размещать дороги с таким покрытием ближе к жилым зонам [34].

Согласно результатам исследований жизненного цикла, применение резиновой крошки при производстве асфальтобетонных смесей позволяет существенно снизить экологическую нагрузку на всех этапах жизненного цикла дорожного покрытия. В работе [11] показано, что производство асфальтобетонных смесей с резиновой крошкой обеспечивает снижение показателей «Валовое потребление энергии» и «Потенциал глобального потепления» на 43–46 % по сравнению с традиционными смесями. Однако эти преимущества достигаются только при условии, что смеси правильно спроектированы и уложены, что позволяет снизить частоту технического обслуживания.

Практическое исследование [35] углеродного следа резиномодифицированных асфальтобетонных смесей было проведено на заводе АО «АБЗ-1» (г. Санкт-Петербург). В работе выполнена оценка жизненного цикла в границах «от колыбели до ворот» (этапы А1 — добыча и производство сырья, А2 — транспортировка сырья до завода, А3 — производство асфальтобетонной смеси). Исследование показало, что замена части битума резиновой крошкой (0,25 % от массы смеси) обеспечивает снижение совокупных выбросов парниковых газов на 1,46 кг CO₂-экв./т готовой смеси в сравнении с производством обычного асфальтобетона, что составляет около 2,5 % от общего углеродного следа. Основное снижение достигается на стадии А1 за счет частичного замещения наиболее углеродоемкого компонента — битума. При этом более 83 % углеродного следа формируется на стадиях добычи и транспортировки сырья, что указывает на зависимость экологической эффективности продукции от выбора поставщиков и логистики.

В исследовании [12] проведено сравнение теплых асфальтобетонных смесей с добавлением резиновой крошки и традиционных горячих смесей. Авторы пришли к выводу, что наибольший вклад в снижение воздействия вносят уменьшение потребления материалов (битума и минерального заполнителя), снижение энергопотребления и сокращение частоты технического обслуживания.

Несмотря на очевидные технические преимущества использования резиновой крошки из отходов шин в дорожном строительстве, существует ряд серьёзных экологических рисков, которые требуют всестороннего изучения и учёта при принятии решений о массовом внедрении данной технологии. Основные опасения связаны с выщелачиванием токсичных веществ из резиноасфальтобетонных покрытий в поверхностные и грунтовые воды. Экологический риск от резиноасфальтобетонных покрытий сосредоточен в непосредственной близости от дорожного полотна. При условии правильного проектирования системы водоотвода и использования подходящих почвенных грунтов в качестве естественных фильтров, загрязнители могут быть эффективно задержаны и обезврежены, не достигая водоносных горизонтов и поверхностных водных объектов. Однако в районах с высоким уровнем грунтовых вод, вблизи водоёмов или на территориях с маломощным почвенным покровом применение таких материалов требует повышенного внимания и разработки дополнительных мер экологической безопасности, поскольку способность почвы к самоочищению в этих условиях может быть существенно ограничена [36].

Среди органических соединений, которые выщелачиваются из резиноасфальтобетонных покрытий в процессе эксплуатации, наиболее значимыми являются бензотиазол и 2(3H)-бензотиазолон — вещества, используемые при производстве шинной резины [6; 37]. Концентрация бензотиазола может достигать 0,45–0,54 мг/л, что превышает токсические концентрации для водных организмов. Среди металлов в фильтратах обнаруживаются алюминий и ртуть в концентрациях, представляющих потенциальную опасность. Алюминий выщелачивается преимущественно из минеральных заполнителей, тогда как ртуть поступает из асфальта [6].

Токсикологические тесты показывают, что водные вытяжки из резиноасфальтобетона обладают умеренной токсичностью для водорослей (*Selenastrum capricornutum*) и дафний (*Daphnia magna*), причём токсичность возрастает с увеличением времени контакта воды с материалом, что связано с постепенным высвобождением алюминия, ртути и бензотиазола. В природных условиях эти загрязнители не исчезают, а перераспределяются между различными компонентами экосистемы. Так, при контакте с почвой значительная часть токсичных соединений сорбируется, то есть накапливается в твёрдой фазе, что снижает их концентрацию в водной среде, но создаёт потенциальную опасность загрязнения почв. Бензотиазол эффективно удаляется из водных растворов за счёт летучести (период полужизни около 1 суток) и биodeградации, но устойчив к фотолизу, что означает его переход в атмосферный воздух или разложение микроорганизмами, а не полное исчезновение. Металлы, такие как алюминий и ртуть, преимущественно сорбируются почвой, накапливаясь в ней и сохраняя свою токсичность. Таким образом, снижение токсичности водной фазы не означает устранения экологического риска — происходит лишь перенос загрязнителей из воды в почву и атмосферу, что требует комплексной оценки всех возможных путей миграции поллютантов [6; 37].

Экономическая эффективность использования резиновой крошки в асфальтобетоне определяется комплексом факторов, включая стоимость сырья, энергозатраты, производительность оборудования и периодичность ремонтов дорожного покрытия. Прямые производственные затраты на резиноасфальтобетон, как правило, выше, чем у обычного асфальта. По данным авторов [24; 38], стоимость асфальтобетонной смеси с добавлением резиновой крошки на 10–20 % превышает стоимость традиционной смеси. Это удорожание обусловлено более

высокой закупочной ценой резинового наполнителя и дополнительными транспортными расходами на его доставку до АБЗ. Однако это увеличение прямых затрат не следует путать с совокупной экономической эффективностью на протяжении всего жизненного цикла дорожного покрытия.

Ключевым фактором, обеспечивающим экономическую выгоду, является увеличение срока службы. Как показано в исследованиях [7; 39], при верном проектировании покрытие с резиновой крошкой имеет срок службы на 2–4 года больше в цикле эксплуатации по сравнению с традиционным асфальтом, что приводит к более устойчивым показателям затрат энергии, глобального потепления и стоимости за год эксплуатации [7; 39]. Более того, как отмечают авторы работы [11], резиновые смеси в целом превосходят обычный асфальт по экономической эффективности примерно на 25 % в долгосрочной перспективе именно благодаря увеличенному сроку службы, при этом наиболее экономически эффективным является «мокрый» способ с использованием асфальт-каучукового вяжущего. Срок службы резиноасфальтобетонных покрытий, приготовленных по «мокрому» методу, возрастает в 1,5–2 раза, а экономия на ремонтах и более длительный срок службы позволяют снизить общие затраты на содержание дороги на 10–15 % [40].

Важно отметить, что для производства резиноасфальтобетона не требуется строительства отдельного завода, как для пиролизного производства, что делает данный способ утилизации шин экономически более выгодным и легче реализуемым в промышленных масштабах [24; 41]. Для сравнения: пиролизные установки требуют значительных капитальных вложений — от 1,8 до 4 тыс. долларов США на тонну годовой мощности [12], а себестоимость переработки одной тонны шин методом пиролиза может достигать 178 евро при выручке около 196 евро [20], что делает рентабельность пиролиза сильно зависящей от рыночной конъюнктуры. В то время как резиноасфальтобетонная технология интегрируется в существующую дорожно-строительную инфраструктуру без дополнительных капитальных затрат на переработку шин, что даёт ей неоспоримое экономическое преимущество. Кроме того, в ряде стран действуют системы субсидирования и налоговых льгот для предприятий, использующих вторичные материалы в дорожном строительстве, что дополнительно повышает экономическую привлекательность метода [42]. Однако полностью решить проблему утилизации шин в долгосрочной перспективе данная технология не может из-за ограничений по процентному содержанию резиновой крошки в асфальтобетоне и ввиду жёстких технологических и климатических ограничений на повсеместное применение резиноасфальтобетонов [43].

В контексте сравнительного анализа технологий утилизации шин, проведенного в настоящей статье, классификация по R-стратегиям позволяет объективно оценить уровень циркулярности каждого из рассматриваемых подходов. Пиролиз в данной классификации соответствует уровню R8 (Recycle — Переработка), поскольку данный термохимический процесс позволяет извлекать ценные материалы, такие как восстановленный технический углерод и пиролизное масло, из отработанных шин. Полученные в результате пиролиза продукты могут быть возвращены в производственный цикл для создания новых продуктов, включая новые шины, что соответствует принципам замкнутого цикла. Важно отметить, что при правильно организованном процессе пиролиза материалы сохраняют свои свойства и могут эффективно заменять первичное сырьё, что способствует сохранению природных ресурсов и снижению углеродного следа.

В отличие от пиролиза, использование резиновой крошки в асфальтобетонных смесях в зависимости от конкретного применения может соответствовать R6 (Remanufacture — Ремафактуринг). При использовании резиновой крошки в дорожном строительстве происходит переработка материала в новый продукт, что формально соответствует уровню R6. Однако данный процесс часто рассматривается как даунсайклинг, поскольку резиновая крошка, как

правило, не возвращается в исходное качественное состояние и не может быть повторно использована в производстве новых шин. Таким образом, с точки зрения циркулярной экономики пиролиз имеет преимущество, поскольку позволяет возвращать материалы в производственный цикл на более высоком качественном уровне, в то время как использование резиновой крошки в дорожном строительстве, хотя и является эффективным способом утилизации больших объемов отработанных шин, часто относится к даунсайклингу [10; 36].

Для наглядного сравнения экологических и экономических преимуществ и недостатков двух рассматриваемых технологий была составлена сравнительная таблица 1.

Таблица 1

Сравнение преимуществ и недостатков двух технологий утилизации шин

Преимущества		
Аспект	Пиролиз	Резиновая крошка в асфальте
Сокращение выбросов парниковых газов	Высокое (703 кг CO ₂ -экв./т шин)	Умеренное (до 2,5 % для малых дозировок по сравнению с классической горячей смесью)
Замещение ресурсов	Технический углерод, пиролизные масло и газ	Битум, частично минеральный наполнитель
Уровень циркулярности	Высокий (R8)	Средний (R6)
Преимущества от применения продукта	Продукты могут использоваться в металлургии, химической промышленности, в качестве топлива	Увеличение срока службы дорог, снижение шума от дорог
Недостатки		
Аспект	Пиролиз	Резиновая крошка в асфальте
Качество продуктов	Требуют дополнительной модификации и очистки	Требует контроля рецептуры
Экологические риски	Выбросы SO ₂ , NO _x , тяжелых металлов	Выщелачивание Zn, Hg, бензотиазола
Зависимость от рынка	Цены на нефть и спрос на технический углерод	Практически не зависит, так как цена резиновой крошки меньше компонентов асфальта

Разработано авторами

Заключение

На основании проведённого сравнительного анализа экологической и экономической эффективности двух технологий утилизации отработанных шин — пиролиза и использования резиновой крошки в асфальтобетонных смесях — можно сделать следующие выводы.

1. Обе технологии демонстрируют значительное снижение выбросов парниковых газов по сравнению с традиционными методами утилизации — захоронением и сжиганием. Пиролиз обеспечивает сокращение выбросов парниковых газов за счёт замещения первичного технического углерода и дизельного топлива. Применение резиновой крошки в асфальтобетоне позволяет снизить показатели валового энергопотребления и потенциала глобального потепления за счёт частичного замещения первичных ресурсов — битума и минерального наполнителя.

2. Ключевым фактором, определяющим экологическую эффективность обеих технологий, является качество получаемых продуктов и их способность замещать первичные ресурсы. Для пиролиза основную ценность представляет восстановленный технический углерод, который после модификации может замещать до 50 % первичного технического углерода. Для резиноасфальтобетона ключевым фактором является увеличение срока службы дорожного покрытия, что позволяет снизить ежегодные затраты на ремонт и уменьшить количество выбросов при производстве асфальтобетона для ремонтных работ.

3. С точки зрения циркулярной экономики пиролиз имеет преимущество, соответствующая уровню R8 (переработка с возвратом материалов в производство шин), в то время как использование резиновой крошки в дорожном строительстве относится к даунсайклингу (уровень R6 — ремануфактуринг). Однако пиролиз требует дополнительной дорогостоящей очистки продуктов (гидроочистка масла, модификация технического углерода), что увеличивает срок окупаемости и снижает его экономическую привлекательность по сравнению с более простым методом утилизации отработанных шин — измельчение в резиновую крошку и ее добавление в асфальтобетон.

4. Прямые производственные затраты на резиноасфальтобетон на 10–20 % выше, чем у обычного асфальта, однако технология добавления резиновой крошки от утилизированных шин в асфальтобетон интегрируется в существующее дорожно-строительное производство без дополнительных капитальных затрат, тогда как пиролизное производство — это капиталоемкий проект, включающий сложный цикл от инженерного проектирования и строительно-монтажных работ до ввода объекта в эксплуатацию.

5. Обе технологии сопряжены с экологическими рисками. При пиролизе основную проблему составляет высокое содержание серосодержащих соединений в газе (до 3,8 мас. %) и масле (1,2–1,3 %), что обуславливает необходимость дополнительной очистки этих продуктов. Применение катализаторов в процессе пиролиза, например $\text{Ca}(\text{OH})_2$, позволяет снизить содержание серы в масле до 0,82 %. При использовании резиновой крошки в асфальтобетоне возможно выщелачивание токсичных соединений (бензотиазола, тяжёлых металлов), однако в природных условиях эти загрязнители перераспределяются между компонентами экосистемы (сорбция почвой, летучесть, биodeградация), не создавая критической нагрузки при условии правильного проектирования системы водоотвода.

6. Ни одна из рассмотренных технологий не является универсальным решением. Пиролиз обеспечивает более высокий уровень циркулярности, позволяя получать новые продукты на выходе, но требует долгосрочных инвестиций и стабильного рынка сбыта. Использование резиновой крошки позволяет быстро утилизировать часть объёмов шин и является практически реализуемым решением в краткосрочной перспективе, особенно для регионов с высокой долей шинных отходов, но не дает полностью решить проблему утилизации шин в долгосрочной перспективе. Требуется дополнительные исследования по минимизации выщелачивания токсичных веществ из резиноасфальтобетонных покрытий, а также по оптимизации пиролизных процессов для снижения содержания серы в продуктах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Alfayev, S.A. Recycling Tire Rubber in Asphalt Pavements: State of the Art [Text] / S.A. Alfayev, A.R. Suleiman, M.L. Nehdi // Sustainability. — 2020. — Vol. 12, № 21. — P. 9076. — DOI: 10.3390/su12219076.
2. Mohajerani, A. Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review [Text] / A. Mohajerani, L. Burnett, J.V. Smith, S. Markovski, G. Rodwell, M.T. Rahman, H. Kurmus, M. Mirzababaei, A. Arulrajah, S. Horpibulsuk, F. Maghool // Resources, Conservation and Recycling. — 2020. — Vol. 155. — P. 104679. — DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104679.
3. Czajczyńska, D. Waste tyre pyrolysis — Impact of the process and its products on the environment [Text] / D. Czajczyńska, K. Czajka, R. Krzyżyńska, H. Jouhara // Thermal Science and Engineering Progress. — 2020. — Vol. 20. — P. 100690. — DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100690.

4. Han, W. Pyrolysis of Waste Tires: A Review [Text] / W. Han, D. Han, H. Chen // *Polymers*. — 2023. — Vol. 15, № 7. — P. 1604. — DOI: 10.3390/polym15071604.
5. Kukielka, J. Asphalt-Cement Concretes with Reclaimed Asphalt Pavement and Rubber Powder from Recycled Tire [Text] / J. Kukielka, W. Bankowski, K. Mirski // *Materials*. — 2021. — Vol. 14, № 9. — P. 2412. — DOI: 10.3390/ma14092412.
6. Azizian, M.F. Environmental impact of highway construction and repair materials on surface and ground waters: Case study: crumb rubber asphalt concrete [Text] / M.F. Azizian, P.O. Nelson, P. Thayumanavan, K.J. Williamson // *Waste Management*. — 2003. — Vol. 23, № 8. — P. 719–728. — DOI: 10.1016 / S0956-053X(03)00024-2.
7. De Oliveira Neto, G.C. Economic, Environmental and Social Benefits of Adoption of Pyrolysis Process of Tires: A Feasible and Ecofriendly Mode to Reduce the Impacts of Scrap Tires in Brazil [Text] / G.C. De Oliveira Neto, L.E.C. Chaves, L.F.R. Pinto, J.C.C. Santana, M.P.C. Amorim, M.J.F. Rodrigues // *Sustainability*. — 2019. — Vol. 11, № 7. — P. 2076. — DOI: 10.3390/su11072076.
8. Maga, D. A comparative life cycle assessment of tyre recycling using pyrolysis compared to conventional end-of-life pathways [Text] / D. Maga, V. Aryan, J. Blömer // *Resources, Conservation and Recycling*. — 2023. — Vol. 199. — P. 107255. — DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.107255.
9. Wu, Q. Integrated Assessment of Waste Tire Pyrolysis and Upgrading Pathways for Production of High-Value Products [Text] / Q. Wu, Q. Zhang, X. Chen, G. Song, J. Xiao // *ACS Omega*. — 2022. — Vol. 7, № 35. — P. 30954–30966. — DOI: 10.1021/acsomega.2c02952.
10. Potting, J. Circular economy: measuring innovation in the product chain [Text] / J. Potting, M. Hekkert, E. Worrell, A. Hanemaaijer. — The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. — 2017. — P. 46.
11. Farina, A. Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement [Text] / A. Farina, M.C. Zanetti, E. Santagata, G.A. Blengini // *Resources, Conservation and Recycling*. — 2017. — Vol. 117. — P. 204–212. — DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.10.015.
12. Puccini, M. Improving the Environmental Sustainability of Low Noise Pavements: Comparative Life Cycle Assessment of Reclaimed Asphalt and Crumb Rubber Based Warm Mix Technologies [Text] / M. Puccini, P. Leandri, A.L. Tasca, L. Pistonesi, M. Losa // *Coatings*. — 2019. — Vol. 9, № 5. — P. 343. — DOI: 10.3390/coatings9050343.
13. Ratnaningsih, W. End-of-life tyre pyrolysis for environmental sustainability: A review [Text] / W. Ratnaningsih, [и др.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — 2025. — Vol. 1526. — P. 012024. — DOI: 10.1088/1755-1315/1526/1/012024.
14. Wu, Q. On the Potential of Waste Tire Pyrolysis in Carbon Mitigation: A Review [Text] / Q. Wu, [и др.] // *Recycling*. — 2025. — Vol. 10. — P. 172. — DOI: 10.3390/recycling10050172.
15. Чич, С. К. Пиролиз как оптимальный метод утилизации отработанных автомобильных шин [Текст] / С. К. Чич // *Новые технологии*. — 2009. — № 3. — С. 1–5. — ISSN 2072-0920.
16. Neri, E. Application of LCA Methodology in the Assessment of a Pyrolysis Process for Tyres Recycling [Text] / E. Neri, B. Berti, F. Passarini, I. Vassura, L. Giorgini, G. Zattini, C. Tosi, M. Cavazzoni // *Environmental Engineering and Management Journal*. — 2018. — Vol. 17, № 10. — P. 2437–2445. — DOI: 10.30638/eemj.2018.242.

17. Afash, H. Recycling of Tire Waste Using Pyrolysis: An Environmental Perspective [Text] / H. Afash, B. Ozarisooy, H. Altan // Sustainability. — 2023. — Vol. 15. — P. 14178. — DOI: 10.3390/su151914178.
18. Трофимов, С. С. Особенности термической утилизации особо опасных отходов / С. С. Трофимов. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2025. — № 16(567). — С. 411–416. — URL: <https://moluch.ru/archive/567/124328>.
19. Захарян, Е. М. Пиролиз шин. Особенности процесса и состав продуктов реакции (обзор) [Текст] / Е. М. Захарян, А. Л. Максимов // Журнал прикладной химии. — 2021. — Т. 94, № 10. — С. 1226–1265. — DOI: 10.31857/S0044461821100017.
20. Goksal, F.P. An economic analysis of scrap tire pyrolysis, potential and new opportunities [Text] / F.P. Goksal // Heliyon. — 2022. — Vol. 8, № 7. — P. e09942. — DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11669.
21. Afash, H. Biofuel production using tire waste in fast pyrolysis: A life cycle assessment study [Text] / H. Afash, B. Ozarisooy, H. Altan // Sustainable Environment. — 2025. — Vol. 11, № 1. — P. 2510728. — DOI: 10.1080/27658511.2025.2510728.
22. Gamboa, A.A.R. Thermodynamic Evaluation of the Energy Self-Sufficiency of the Tyre Pyrolysis Process [Text] / A.A.R. Gamboa, L.R. dos Santos, C.A. Martins, A.M.A. Rocha, C.A. Alvarado-Silva, J.A. de Carvalho // Energies. — 2023. — Vol. 16, № 24. — P. 7932. — DOI: 10.3390/en16247932.
23. Janakova, I. Pilot-scale catalytic pyrolysis of waste tires for pyrolysis oil: Product yields, sulfur reduction, and life cycle assessment [Text] / I. Janakova, J. Kodymova, P. Malikova, S. Drabinova, M. Cech, D. Hrecin // Cleaner Engineering and Technology. — 2026. — Vol. 32. — P. 101204. — DOI: 10.1016/j.clet.2026.101204.
24. Riekstins, A. Economic and environmental analysis of crumb rubber modified asphalt [Text] / A. Riekstins, V. Haritonovs, V. Straupe // Construction and Building Materials. — 2022. — Vol. 345. — P. 127468. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127468.
25. Wang, W.C. Alternative fuel produced from thermal pyrolysis of waste tires and its use in a DI diesel engine [Text] / W.C. Wang, C.J. Bai, C.T. Lin, S. Prakash // Applied Thermal Engineering. — 2016. — Vol. 93. — P. 330–338. — DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.09.056.
26. Frigo, S. Liquid fuel production from waste tyre pyrolysis and its utilisation in a Diesel engine [Text] / S. Frigo, M. Seggiani, M. Puccini, S. Vitolo // Fuel. — 2014. — Vol. 116. — P. 399–408. — DOI: 10.1016/j.fuel.2013.08.044.
27. Li, J. Prospective LCA of valorizing end-of-life tires in asphalt mixtures with emerging pretreatment technologies of crumb rubber [Text] / J. Li, J. Santos, A. Vargas-Farias, D. Castro-Fresno, F. Xiao // Resources, Conservation and Recycling. — 2024. — Vol. 210. — P. 107828. — DOI: 10.1016/j.resconrec.2024.107828.
28. Bressi, S. Crumb Rubber Modifier in Road Asphalt Pavements: State of the Art and Statistics [Text] / S. Bressi, N. Fiorentini, J. Huang, M. Losa // Coatings. — 2019. — Vol. 9, № 6. — P. 384. — DOI: 10.3390/coatings9060384.
29. Plati, C. Building Sustainable Pavements: Investigating the Effectiveness of Recycled Tire Rubber as a Modifier in Asphalt Mixtures [Text] / C. Plati, B. Cliatt // Energies. — 2021. — Vol. 14, № 21. — P. 7099. — DOI: 10.3390/en14217099.
30. Takallou, M.B. Benefits of Recycling Waste Tires in Rubber Asphalt Paving [Text] / M.B. Takallou, H.B. Takallou // Transportation Research Record. — 1991. — Vol. 1310. — P. 87–92.

31. Khiong, L.M. Material Properties and Environmental Benefits of Hot-Mix Asphalt Mixes Including Local Crumb Rubber Obtained from Scrap Tires [Text] / L.M. Khiong, M. Safiuddin, M.A. Mannan, R. Resdiansyah // *Environments*. — 2021. — Vol. 8. — P. 47. — DOI: 10.3390/environments8060047.
32. Guo, S. Evaluation of properties and performance of rubber-modified concrete for recycling of waste scrap tire [Text] / S. Guo, Q. Dai, R. Si, X. Sun, C. Lu // *Journal of Cleaner Production*. — 2017. — Vol. 148. — P. 681–689. — DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.02.046.
33. Майданова, Н. В. Оценка эффективности эластомерных модификаторов дорожных битумов и асфальтобетонных смесей на основе гель-золь анализа [Текст] / Н. В. Майданова, В. А. Кудряшова, Е. А. Рюткянен, О. Ю. Мельник, Н. Д. Шишилов, С. Е. Шаховец // *Транспортное строительство*. — 2024. — № 3. — С. 8–13.
34. Мельник, О. Ю. Применение эластомерных модификаторов на основе резинового порошка для повышения качества исходных дорожных битумов [Текст] / О. Ю. Мельник, Н. В. Майданова, О. А. Маршавина // *Дороги и мосты*. — 2026. — № 55/1. — С. 275–295. — DOI: 10.70991/1815-896X-2026-1-55-275-295.
35. Хакимова, А. Д. Сравнительный анализ углеродного следа двух асфальтобетонных смесей: классической горячей и модифицированной резиновой крошкой [Текст] / А. Д. Хакимова, Л. М. Молодкина, Н. В. Майданова // *Экология и промышленность России*. — 2026. — Т. 30. № 5. — С. 60–65. — DOI: 10.18412/1816-0395-2026-5-60-65.
36. Чжан, Ц. Термодинамические подходы при оценке качества, эффективности и экологичности асфальтобетона [Текст] / Ц. Чжан, В. Н. Романюк, Ю. Г. Алексеев, Ц. Хоу // *Наука и техника*. — 2022. — Т. 21, № 6. — С. 490–498. — DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-6-490-498.
37. Reddy, C.M. Environmental chemistry of benzothiazole derived from rubber [Text] / C.M. Reddy, J.G. Quinn // *Environmental Science and Technology*. — 1997. — Vol. 31, № 10. — P. 2847–2853. — DOI: 10.1021/es970078o.
38. Picado-Santos, L.G. Crumb rubber asphalt mixtures: A literature review [Text] / L.G. Picado-Santos, S.D. Capitão, J.M. Neves // *Construction and Building Materials*. — 2020. — Vol. 247. — P. 118577. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118577.
39. Hashim, S. The Influence of Using Recycled Asphalt Pavement and Crumbed Rubber on Asphalt Pavement: A Review [Text] / S. Hashim, H. Al-Mosawe, H. Mohammed // *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*. — 2023. — Vol. 26, № 2. — P. 74–82. — DOI: 10.29194/NJES.26020074.
40. Hasan, U. Lifecycle Cost Analysis of Recycled Asphalt Pavements: Determining Cost of Recycled Materials for an Urban Highway Section [Text] / U. Hasan, A. Whyte, H. Al Jassmi, A. Hasan // *CivilEng*. — 2022. — Vol. 3, № 2. — P. 316–331. — DOI: 10.3390/civileng3020019.
41. Rodriguez-Alloza, A.M. Comparative Life Cycle Assessment of Rubberized Warm-Mix Asphalt Pavements: A Cradle-to-Gate Plus Maintenance Approach [Text] / A.M. Rodriguez-Alloza, D. Garraín // *Coatings*. — 2025. — Vol. 15, № 7. — P. 899. — DOI: 10.3390/coatings15070899.
42. Cetkovic, J. Environmental Benefits of Air Emission Reduction in the Waste Tire Management Practice [Text] / J. Cetkovic, S. Lakic, M. Zarkovic, R. Vujadinovic, M. Knezevic, A. Zivkovic, J. Cvijovic // *Processes*. — 2022. — Vol. 10, № 4. — P. 787. — DOI: 10.3390/pr10040787.

43. Kolendo, G. Life Cycle Assessment of End-of-Life Tire Disposal Methods and Potential Integration of Recycled Crumb Rubber in Cement Composites [Text] / G. Kolendo, V. Voronova, G. Bumanis, A. Korjamins, D. Bajare // Applied Sciences. — 2024. — Vol. 14, № 24. — P. 11667. — DOI: 10.3390/app142411667.

Khakimova Anna Dmitrievna

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
E-mail: ann_mrasteva@mail.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1332085

Molodkina Lyudmila Mikhailovna

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
E-mail: molodkina.lm@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6056-6618>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=99645
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/AAF-4781-2019>
Google Scholar: <https://scholar.google.ru/citations?user=2o28sbYAAAAJ>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6603631466>

Maidanova Natalya Vasilievna

Research Center JSC «ABZ-1», Saint Petersburg, Russia
E-mail: nmaydanova@abz-1.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1270693

A comparison of two promising technologies for recycling waste tires: pyrolysis and rubber-asphalt concrete production

Abstract. The article presents a comparative analysis of the two most promising technologies for recycling waste tires: pyrolysis and the use of rubber crumb as a modifier for asphalt concrete mixtures. Approximately 1,5 billion waste tires are generated annually worldwide, posing a serious environmental problem because this type of waste is virtually non-degradable in natural conditions. Traditional disposal methods, including landfilling and incineration, pollute soil, water, and the atmosphere with toxic substances. The authors analyzed the results of studies conducted using life cycle assessment methodology, which allowed them to quantify the environmental benefits of each of the technologies under consideration. It is shown that pyrolysis, as a material recycling technology (R8 according to the R-strategies classification), reduces greenhouse gas emissions by replacing virgin carbon black and diesel fuel. At the same time, the use of rubber crumb in road construction reduces the carbon footprint of asphalt concrete pavements compared to traditional mixtures by extending the service life of the pavement and reducing the percentage of raw materials used, the extraction of which increases the carbon footprint during the asphalt concrete pavement lifecycle at the «raw material extraction and production» stage. A detailed comparative analysis of the carbon footprint of both technologies was conducted, taking into account system boundaries, the quality of the resulting products, and the substitution effect of primary resources. It was found that the key factor determining the environmental performance of both technologies is the quality of the resulting products and their ability to substitute primary resources. The results of the study can be used in developing waste management strategies and selecting priority areas for the development of a circular economy in tire recycling.

Keywords: waste tires; tire pyrolysis; rubber asphalt concrete; rubber crumb; waste disposal; carbon footprint; modified bitumen; life cycle assessment