

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» <https://resources.today>
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2025, Том 12, № 4 / 2025, Vol. 12, Iss. 4 <https://resources.today/issue-4-2025.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/17EEOR425.pdf>

DOI: 10.15862/17EEOR425 (<https://doi.org/10.15862/17EEOR425>)

1.5.15. Экология (биологические, химические, медицинские, технические, ветеринарные, сельскохозяйственные науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Яцун, А. В. Современные технологии переработки изношенных автомобильных шин / А. В. Яцун // Отходы и ресурсы. — 2025. — Т. 12. — № 4. — URL: <https://resources.today/PDF/17EEOR425.pdf>. DOI: 10.15862/17EEOR425.

For citation:

Yatsun A.V. Modern technologies for recycling scrap tires. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2025;12(4): 17EEOR425. Available at: <https://resources.today/PDF/17EEOR425.pdf>. DOI: 10.15862/17EEOR425. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 678.4:658.567

Яцун Андрей Владимирович

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Иркутск, Россия
Соискатель ученой степени кандидата технических наук
E-mail: yatsunandrei@yandex.ru

Современные технологии переработки изношенных автомобильных шин

Аннотация. В настоящее время изношенные автомобильные шины являются одним из наиболее массовых видов отходов во всем мире и наносят вред окружающей среде как при сжигании, так и при простом складировании на открытом воздухе. Только 15 % всех изношенных автомобильных шин перерабатывается, а большая часть попросту выбрасывается на полигоны и несанкционированные свалки. В статье описаны современные технологии утилизации изношенных автомобильных шин, к которым относятся: механическое дробление, сжигание, водоструйная резка, криогенная переработка, бародеструкционная переработка, переработка в среде озона, взрывоциркулярная переработка, биологическое разложение, ожижение в органическом растворителе, жидкометаллический пиролиз, традиционный пиролиз и микроволновый пиролиз. Приводятся основные преимущества и недостатки этих технологий. Водоструйная резка, криогенная переработка, бародеструкционная переработка, обработка озоном, взрывоциркулярный метод, ожижение в органическом растворителе, жидкометаллический пиролиз и биологическое разложение являются затратными и малоэффективными для промышленной переработки изношенных автомобильных шин. Простые и распространённые механическое дробление и сжигание шин также имеют свои недостатки — это многостадийность процесса и сложность удаления силового кольца, и высокотемпературное ведение процесса (примерно 1 300°C) с высокой очисткой дымовых газов соответственно. Традиционный пиролиз шин по сравнению с другими технологиями переработки не требует дорогостоящего оборудования и прост в ведении процесса, однако сопровождается выбросами дымовых газов и длителен по времени. Другой альтернативой в переработке изношенных шин является микроволновый пиролиз. Данный пиролиз имеет значительно меньшее время переработки по сравнению с традиционным пиролизом, при этом не требуется дорогостоящего оборудования, отсутствуют выбросы в атмосферу. Микроволновый пиролиз применим для утилизации любых отработанных шин в промышленных масштабах.

Ключевые слова: изношенные автомобильные шины; современные технологии переработки; традиционный пиролиз; микроволновый пиролиз

Введение

Изношенные автомобильные шины (ИАШ) представляют собой серьезную экологическую проблему, являясь одним из самых распространенных видов отходов в мире. Их складирование, даже на открытом воздухе, приводит к высвобождению токсичных веществ в атмосферу и почву, что негативно сказывается на окружающей среде и здоровье человека. Несмотря на наличие различных технологий переработки, лишь незначительная часть (не более 15 %) от общего объема ИАШ подвергается вторичной переработке. Оставшиеся 85 % оказываются на полигонах и несанкционированных свалках, усугубляя экологическую ситуацию.

В России ежегодно образуется около 1 миллиона тонн ИАШ, при этом перерабатывается не более 150 тысяч тонн, несмотря на наличие достаточных мощностей. В крупных регионах, таких как Москва и Ленинградская область, образуется свыше 70 и 50 тысяч тонн ИАШ в год, соответственно [1]. Структура образующихся отходов также неоднородна: 62 % приходится на шины легковых автомобилей, а остальные 38 % — на шины других видов транспорта, включая большегрузные автомобили.¹ Шины легковых автомобилей имеют наружный диаметр до 670 мм и массу до 30,3 кг.² Переработка шин карьерных самосвалов, таких как БелАЗ, представляет собой особую проблему из-за их значительных размеров (диаметр до 4 метров и масса до 5 700 кг).³ Срок службы этих шин составляет около года⁴, что приводит к образованию огромных скоплений массивных покрышек. Транспортировка и переработка таких крупногабаритных шин сопряжена со значительными трудностями.

ИАШ занимают большие территории на полигонах и создают грандиозные завалы, а так как они не подвергаются биологическому разложению, то являются источником загрязнения, длительно воздействующим на окружающую среду, а при складировании на открытом воздухе, создают большую пожарную опасность, так как их возгорание достаточно сложно потушить. Кроме того, в местах складирования ИАШ размножаются грызуны, кровососущие насекомые и появляются инфекционные заболевания [2]. Сбор, хранение и утилизация отработанных автомобильных шин обязует организации, занимающиеся переработкой, выполнять определённые требования надзорных органов.⁵

¹ Рынок сбора и переработки изношенных автошин. <https://prcs.ru/analytics-article/rynok-sbora-i-pererabotki-avtomobilnih-shin/> (дата обращения: 09.11.2025).

² Гомельшина. Вес и объем шин. Легковые Автомобили. <https://гомельшина.бел/ves-i-obem-shin/> (дата обращения: 09.11.2025).

³ ОАО «Белшина». Сверхкрупногабаритная шина 59/80R63 мод. BEL-190. <https://belshina.by/catalog/shiny-dlya-avtomobilej-bolshoj-gruzopodemnosti/bel-190> (дата обращения: 09.11.2025).

⁴ Карьерные шины самосвалов. Извечный вопрос срока службы. <https://dprom.online/mtindustry/27567/> (дата обращения: 09.11.2025).

⁵ Приказ Минприроды России от 11.06.2021 № 399 (ред. от 04.04.2023) «Об утверждении требований при обращении с группами однородных отходов I–V классов опасности» (Зарегистрировано в Минюсте России 30.11.2021 № 66097).

На данный момент в России и за рубежом функционируют достаточно немало различных установок по переработке ИАШ, однако в основном они имеют сравнительно небольшую производительность. Для решения проблемы накоплений ИАШ и загрязнения окружающей среды требуется переработка ИАШ с использованием более простых и менее затратных технологий, с помощью которых можно будет получать более ликвидные продукты. А если говорить в целом, то для ликвидации огромных завалов из отработанных шин несомненно нужна их переработка в промышленном масштабе.

Основная часть

Методы переработки ИАШ

Для переработки ИАШ в настоящее время применяются различные технологии, которые также могут использоваться и для утилизации любых отработанных РТИ. Самым распространенным способом переработки ИАШ является механическое дробление [3; 4].⁶ При переработке ИАШ данный процесс начинается с отделения бортовых колец, которые перерабатывают отдельно. Затем ИАШ разрезают на части и измельчают на линии дробления размером до нескольких сантиметров. Далее с помощью магнитной сепарации от измельченного материала ИАШ отделяется металлокорд. В конце процесса происходит доизмельчение резины до крошки примерно в пределах 2–4 мм. Преимуществами данной технологии являются: переработка ИАШ без изменения физико-химических свойств резины, низкие энергозатраты. К недостаткам относится сложность удаления силового кольца особенно большегрузных автомобилей, а также многостадийность процесса.

Сжигание ИАШ является наиболее простой и не менее распространённой технологией, которая не требует энергетических затрат и используется для получения тепловой энергии в котельных [5]. Процесс сжигания ИАШ ведётся при высокой температуре в специальных печах, дымовые газы от которых поступают в котлы-утилизаторы для охлаждения и рекуперации тепла. Недостатком технологии является то, что при сжигании образуются канцерогены, такие как бенз(а)пирен, бифенил, полициклические ароматические углеводы, бутадиев, стирол, диоксины, фуран, антрацен, флуорантен, пирен, свинец и другие, которые наносят непоправимый вред организму человека и окружающей среде. Для глубокой переработки и нейтрализации таких канцерогенов при сжигании ИАШ должна поддерживаться температура примерно 1300°C, а также требуется высокая очистка дымовых газов, что является сложным и дорогостоящим процессом.

При водоструйной резке ИАШ водяная струя под большим давлением с примесью абразивных материалов разрезает ИАШ на заданный размер [3].⁷ Преимущества такой технологии: высокая точность резки (края получаются ровными), отсутствие нагрева и деформации резины сохраняет эластичность и физико-химические свойства, экологическая чистота, универсальность, возможность обработки различных видов шин и транспортёрных лент. Недостатки — большие затраты на электроэнергию, воду и абразивные материалы, водоструйная резка ИАШ идет медленнее механической.

При криогенной переработке ИАШ, в специальных камерах, резина доводится до хрупкого состояния жидким азотом и затем измельчается с помощью ударной волны, получаются мелкие кусочки требуемого размера [3; 4; 6]. Преимущества метода — отсутствие

⁶ Техноресурсы. Оборудование для переработки и утилизации шин. <https://www.stanki-ru.ru/> (дата обращения: 09.11.2025).

⁷ W. Cut. Гидроабразивная резка в Москве. Резка автомобильных шин утилизации шин. <https://w-cut.ru/services/rezka-reziny/gidroabrazivnaya-rezka-avtomobilnyh-shin/> (дата обращения: 09.11.2025).

вредных выбросов, не меняются физико-химические свойства резины, резиновая крошка получается хорошего качества. Недостаток — это большие затраты на оборудование и хранение жидкого азота.

При бародеструкционной переработке ИАШ резина переходит в жидкое состояние под высоким давлением [4; 5]. Для этого ИАШ режут на куски массой не более 20 кг на специальном прессе и подают на установку высокого давления, где в специальной камере под высоким давлением куски проходят через отверстия решетки с образованием смеси из резиновых кусков размером 20–80 мм. С помощью магнитной сепарации из этой смеси выделяют металлокорд. Затем резиновая масса подаётся на роторную дробилку, где происходит её измельчение в крошку до 10 мм, из которой выделяют текстильный корд, затем производят разделение резиновой крошки на фракции менее 3 мм, 3–10 мм. Преимущества метода — это отсутствие выделений вредных веществ в окружающую среду, получение резиновой крошки улучшенной чистоты за счёт двойной очистки от текстильного и металлического корда. Недостатками являются значительные энергозатраты, невысокая производительность процесса, а также затраты на оборудование.

Способ переработки ИАШ обработкой озоном основан на эффекте её растрескивания в среде озона, за счёт разрушения двойных углерод-углеродных связей [6].⁸ Такой эффект приводит к полному рассыпанию резины в мелкую крошку с отделением от металлического и текстильного корда. Преимуществами данного метода являются экологическая чистота процесса, небольшие затраты энергии (в 5–10 раз меньше других методов переработки ИАШ), меньшее количество стадий переработки, самый минимальный износ оборудования, высокое качество резиновой крошки, возможность перерабатывать все виды РТИ. Недостатки метода: небезопасность (озон является сильным окислителем), недостаточная проработанность процесса.

Для переработки ИАШ также применяется и взрывоциркулярный метод, в котором они помещаются в специальную камеру, где происходит их разрушение в мелкую крошку при помощи взрыва [3]. Преимуществом данного метода является значительное сокращение времени на измельчение ИАШ. Недостатками являются высокий уровень шума, большие затраты на оборудование, возможные загрязнения окружающей среды.

При биологическом разложении ИАШ используются специальные бактерии, которые могут перерабатывать резину в метан и углекислый газ [3]. Метод является относительно безопасным при соответствующем контроле, однако он является достаточно медленным и требует специальных условий, а для культивации бактерий требуется особый подход.

ИАШ также возможно перерабатывать используя процесс ожижения в органическом растворителе при температуре 240–290°C и давлении не более 6,1 МПа.⁹ В данном процессе вначале происходит растворение резины с разделением на три продукта: «синтетическая нефть» (50 % масс.), технический углерод (30 % масс.) и металлокорд (20 % масс.). Затем в процессе ректификации «синтетическая нефть» разгоняется на бензиновую фракцию (65 % масс.) и мазут (35 % масс.). Бензиновая фракция далее используется для получения бензина с октановым числом 92–95, технический углерод — для электротехники и металлургии. Преимущества данного метода — отсутствие отходов и ликвидность получаемых продуктов, а недостаток — использование растворителя.

⁸ ORIECO. Технологии озонной деструкции шин и отходов резины. <https://oriecon.com/ozon/index/?cid=ozontehnology&lang=ru> (дата обращения: 09.11.2025).

⁹ Переработка автошин путём растворения в органическом растворителе. <https://ekologia.cap.ru/sitemap.aspx?id=682049> (дата обращения: 09.11.2025).

В настоящее время также распространена технология пиролиза ИАШ, которая представляет собой процесс термической деструкции резины без доступа воздуха [7–22].¹⁰ ИАШ (целые или разрезанные) подвергают пиролизу в реакторе при температуре от 400 до 800°C (в зависимости от целевых продуктов). Конечными продуктами пиролиза являются газ, жидкие продукты и твердый углеродный остаток, имеющие различное применение. Газ пиролиза в основном сжигается для обогрева реактора и поддержания температуры процесса. Такая технология также называется традиционным пиролизом. В данном процессе нагрев ИАШ осуществляется через стенки обогреваемого реактора, т. е. используется явление теплопроводности. Также в данном процессе не используются какие-либо каталитические добавки или дополнительные среды (окислительные, восстановительные или окислительно-восстановительные, например, водород, углекислый газ или водяной пар). Преимущества процесса — отсутствие дорогостоящего оборудования, простота конструкции реакторов и ликвидность всех продуктов пиролиза. Недостатки — выбросы в атмосферу в виде дымовых газов и длительность процесса (процесс может длиться до нескольких часов).

Известна также технология жидкометаллического пиролиза ИАШ [23]. Процесс протекает в режиме обычного пиролиза, но теплоносителем является нагретый до температуры 400°C расплав свинца, в который погружают ИАШ. В ходе процесса температуру расплава свинца повышают постепенно до 800°C. Состав продуктов такого пиролиза примерно одинаков в сравнении с составом продуктов обычного пиролиза. Из преимуществ такого процесса можно выделить то, что доступ воздуха в зону пиролиза полностью исключен. К недостаткам процесса можно отнести загрязнение расплава свинца продуктами пиролиза, а также применение большого количества свинца для такого процесса.

Существуют и другие, альтернативные технологии термической переработки ИАШ, такие как пиролиз в электромагнитном поле сверхвысокой частоты (СВЧ) или микроволновый пиролиз [24; 25]. Такая технология является энергосберегающей, т. к. пиролиз ИАШ проходит гораздо быстрее, по сравнению с традиционным пиролизом, т. е. соответственно на весь процесс тратится меньше энергии. Данный пиролиз является более эффективным, т. к. при значительно меньшем времени пиролиза происходит полная деструкция ИАШ. Нагрев изношенных шин в данном случае происходит более равномерно, т. к. в отличие от простого пиролиза материал в СВЧ-поле нагревается сразу по всему объему. Кроме того, пиролиз в поле СВЧ является ещё и экологически чистым процессом, поскольку для нагрева ИАШ не

¹⁰ Тямкин, С.А. Автоматизация пиролиза изношенных шин при переменном давлении рециркулируемых газов: специальность 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Тямкин Сергей Анатольевич. — Оренбург, 2011. — 258 с. — EDN QFIMXF.

Кононенко, Е.А. Утилизация промышленных отходов нефтегазовой отрасли и применение обезвреженных отходов в качестве вторичных материальных ресурсов: специальность 03.02.08 «Экология (по отраслям)»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кононенко Евгений Александрович. — Краснодар, 2012. — 167 с. — EDN QFXLZJ.

Минхайдарова, Г.В. Экологические аспекты утилизации твердого углеродного остатка пиролиза изношенных шин: специальность 03.00.16: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Минхайдарова Гузель Вануровна. — Казань, 2004. — 19 с. — EDN NHWCWN.

Салтанов, А.В. Разработка направлений утилизации и квалифицированного использования отходов коксохимического производства: специальность 05.17.07 «Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Салтанов Андрей Владимирович. — Новокузнецк, 2001. — 329 с. — EDN MCXVGR.

Ванюшкин, В.Д. Повышение эффективности процесса пиролиза отработанных шин на основе регулируемого охлаждения коксового остатка: специальность 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ванюшкин Вячеслав Дмитриевич, 2021. — 168 с. — EDN YPAJMW.

требуется сжигания какого-либо топлива, что значит отсутствие выбросов дымовых газов в атмосферу. Также к преимуществам микроволнового пиролиза относятся: возможность селективного нагрева материала и возможность регулирования температурного режима. Микроволновый пиролиз также не требует дорогостоящего оборудования.

Все продукты пиролиза ИАШ имеют определенную ценность. Газ пиролиза возможно использовать не только для поддержания температурного режима самого процесса, но и для розжига форсунок в котельных. Жидкие продукты («синтетическая нефть») могут использоваться для получения топлив, а также для получения различных углеводородов для дальнейшего синтеза. Твердый углеродный остаток пиролиза имеет большую сорбционную емкость и его можно использовать в качестве сорбирующего агента для сбора нефтепродуктов и других загрязняющих веществ. Также его можно использовать для сжигания в специальных котельных в виде композиционного топлива, которое получают путём пропитки углеродного остатка жидким продуктом пиролиза ИАШ. Металлокорд автомобильных шин — это высококачественная сталь, которую можно реализовать в виде стального лома.

Заключение

На данный момент переработка ИАШ осуществляется при помощи таких технологий, как сжигание, водоструйная резка, криогенная переработка, бародеструкционная переработка, обработка озоном, взрывоциркулярный метод, биологическое разложение, ожижение в органическом растворителе, жидкометаллический пиролиз, традиционный пиролиз и микроволновый пиролиз. Представленные технологии имеют свои преимущества и недостатки. Среди них затратными и малоэффективными для промышленной переработки ИАШ являются водоструйная резка, криогенная переработка, бародеструкционная переработка, обработка озоном, взрывоциркулярный метод, ожижение в органическом растворителе, жидкометаллический пиролиз и биологическое разложение. Механическое дробление и сжигание ИАШ хоть и являются относительно простыми и распространёнными технологиями, но также имеют свои недостатки. При механическом дроблении к недостаткам относятся сложность удаления силового кольца особенно большегрузных автомобилей, а также многостадийность процесса. При сжигании глубокая переработка и нейтрализация образующихся канцерогенов обеспечивается при температуре примерно 1300°C, при этом требуется высокая очистка дымовых газов, что также удорожает процесс.

Переработка ИАШ методом традиционного пиролиза является более лучшей по сравнению с другими способами переработки, так как для этого не требуется дорогостоящего оборудования. Затратным в данном случае будет только подготовка для процесса пиролиза крупногабаритных шин (например, БелАЗ), так как на данный момент нет установок по пиролизу целых крупногабаритных ИАШ. Однако традиционный пиролиз сопровождается выбросами в атмосферу в виде дымовых газов и длителен по времени (процесс может длиться до нескольких часов).

Отличной альтернативой в переработке ИАШ является микроволновый пиролиз. При таком пиролизе полная деструкция ИАШ проходит при значительно меньшем времени по сравнению с традиционным пиролизом. Дорогостоящего оборудования для проведения микроволнового пиролиза также не требуется. При этом и выбросы в атмосферу отсутствуют, т. к. для нагрева ИАШ не требуется сжигать топливо. С помощью микроволнового пиролиза утилизацию любых отработанных шин можно проводить в промышленных масштабах. Это позволит ликвидировать завалы из ИАШ, снизить опасность их возгорания, а также получать ценные продукты для дальнейшего применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Переработка отработанных резинотехнических изделий автопрома / Е.В. Ганин, С.В. Антимонов, А.М. Абдрахманова, Ю.С. Иванова // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. — 2017. — № 1. — С. 121–131. — EDN YGKIVP.
2. Эколого-экономические и технологические аспекты устойчивого развития Республики Беларусь и Российской Федерации: сборник статей III Международной научно-технической конференции «Минские научные чтения-2020», Минск, 3 декабря 2020 года. В 3 т. Т. 1. — Минск: БГТУ, 2021. — 318 с. — ISBN 978-985-530-904-9.
3. Сушня, Р.В. Современные способы утилизации автомобильных покрышек и их особенности / Р.В. Сушня // Вестник науки. — 2023. — Т. 2, № 6(63). — С. 838–847. — EDN EKNFSU.
4. Шиповалов, Д.А. Утилизация и переработка резинотехнических отходов от автотранспортных средств измельчением в крошку (обзорная статья) / Д.А. Шиповалов, И.В. Насакин // Материалы VIII Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум». — 2016. — URL: <https://scienceforum.ru/2016/article/2016023839> (дата обращения: 01.05.2025).
5. Становов, М.С. Сравнение термических методов утилизации изношенных шин / М.С. Становов, В.И. Комков // Материалы XI Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум». — 2019. — URL: <https://scienceforum.ru/2019/article/2018015014> (дата обращения: 04.05.2025).
6. Большакова, М.А. Обзор современных методов утилизации шин / М.А. Большакова, А.С. Домнина // Современные технологии: проблемы и перспективы: сборник статей всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых учёных, Севастополь, 20–23 мая 2019 года / гл. ред. О.В. Мухина. — Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2019. — С. 157–160. — EDN JAZQDA.
7. Ахмедова, К.Ш. к. Результаты получения пиролизного дистиллята-синтетического топлива из изношенных шин / К.Ш.к. Ахмедова, А.М. Хурмамагов, Г.О. Сидиков — DOI 10.32743/UniTech.2024.123.6.17737 // Universum: технические науки. — 2024. — № 6-4(123). — С. 30–35. — EDN KDLEIF.
8. Эколого-экономические аспекты переработки резинотехнических изделий на основе современных технологий / А.В. Румянцева, Е.И. Румянцева, М.В. Березюк, И.С. Пелымская — DOI 10.23670/IRJ.2020.97.7.101 // Международный научно-исследовательский журнал. — 2020. — № 7-3(97). — С. 165–169. — EDN JCYZHS.
9. Интенсификация газообмена в крошке изношенных шин при пиролизе переменным давлением: монография. — Москва: Креативная экономика, 2011. — 176 с. — ISBN 978-5-91292-073-8. — EDN SUHETB.
10. Пиролиз изношенных автомобильных шин — путь разрешения важной проблемы охраны окружающей среды / Г.О. Торосян, Ж.С. Акопян, Г.О. Алексанян [и др.] // Экологический Вестник Северного Кавказа. — 2015. — Т. 11, № 2. — С. 25–29. — EDN TTNKQR.
11. Новичков, Ю.А. Исследование процесса бескислородного пиролиза изношенных автомобильных шин / Ю.А. Новичков, Т.В. Петренко, В.И. Братчун // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. — 2005. — № 29. — С. 68–70. — EDN NWBLWZ.

12. X-ray phase analysis of carbon-containing material produced by pyrolysis of worn-out car tires / Sh. Juraev, U. Tailakov, B. Mukhiddinov, Sh. Sa'dullayev // *Universum: технические науки*. — 2023. — № 5-8(110). — С. 8–11. — EDN OZAPCO.
13. Khudhair, M.M. Characterization study of liquid fuel produced from pyrolysis of waste tyres using different catalysts / M.M. Khudhair, R.J. Omran, H.A. Alameer — DOI 10.1063/5.0027869 // *AIP Conference Proceedings*. — 2020. — Vol. 2290, No. 1. — URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2290/1/030009/1001533/Characterization-study-of-liquid-fuel-produced> (дата обращения: 20.10.2025).
14. Musyoka, N.M. Utilization of waste tyres pyrolysis oil vapour in the synthesis of Zeolite Templated Carbons (ZTCs) for hydrogen storage application / N.M. Musyoka, K.M. Rambau, N. Manyala, J. Ren, H.W. Langmi, M.K. Mathe — DOI 10.1080/10934529.2018.1471099 // *Journal of Environmental Science and Health Part A*. — 2018. — Vol. 53, No. 11. — P. 1022–1028.
15. López, G. Continuous pyrolysis of waste tyres in a conical spouted bed reactor / G. López, M. Olazar, R. Aguado, J. Bilbao — DOI 10.1016/j.fuel.2010.03.029 // *Fuel*. — 2010. — Vol. 89, No. 8. — P. 1946–1952.
16. Lewandowski, W.M. Efficiency and proportions of waste tyre pyrolysis products depending on the reactor type — A review / W.M. Lewandowski, K. Januszewicz, W. Kosakowski — DOI 10.1016/j.jaap.2019.03.018 // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. — 2019. — Vol. 140. — P. 25–53.
17. Odejobi, O.J. Production of pyrolysis oil from used tyres and the effects of pyrolysis oil-gasoline blends on the performance of a gasoline-powered electric generator / O.J. Odejobi, O. Sanda, I.O. Abegunrin, A.A. Oladunni, J.A. Sonibare — DOI 10.1016/j.sciaf.2020.e00639 // *Scientific African*. — 2020. — Vol. 10. — P. e00639.
18. Januszewicz, K. Waste Tyres Pyrolysis for Obtaining Limonene / K. Januszewicz, P. Kazimierski, W. Kosakowski, W.M. Lewandowski — DOI 10.3390/ma13061359 // *Materials*. — 2020. — Vol. 13, No. 6. — P. 1359.
19. Muhammad, R. Conditions Optimization and Physiochemical Analysis of Oil Obtained by Catalytic Pyrolysis of Scrap Tube Rubber Using MgO as Catalyst / R. Muhammad, Y. Ali, Y. Messaddeq, H. ur Rashid, M. Antonio Utrera Martines, M. Naveed Umar, S.W. Khan, A. Riaz — DOI 10.3390/catal11030357 // *Catalysts*. — 2021. — Vol. 11, No. 3. — P. 357.
20. Gani, A. Pyrolysis and Oxidation of Waste Tire Oil: Analysis of Evolved Gases / A. Gani, Km Oajedul Islam Awad, A. Amjad Ali Pasha, S. Khan, M.A. Nemitallah, U. Ahmed — DOI 10.1021/acsomega.2c01366 // *ACS omega*. — 2022. — Vol. 7, No. 25. — P. 21574–21582.
21. Gao, N. Tire pyrolysis char: Processes, properties, upgrading and applications / N. Gao, F. Wang, C. Quan, L. Santamaria, G. Lopez, P.T. Williams — DOI 10.1016/j.pecs.2022.101022 // *Progress in Energy and Combustion Science*. — 2022. — Vol. 93. — P. 101022.
22. Shehata, M. Valorisation of shredded waste tyres through Sequential thermal and catalytic pyrolysis for the production of diesel-like fuel / M. Shehata, M.A. Okeily, A.S. Hammad — DOI 10.1016/j.rineng.2023.101718 // *Results in Engineering*. — 2024. — Vol. 21. — P. 101718.

23. Осипов, А.А. Термодинамика процессов, протекающих при жидкометаллическом пиролизе отработавших автомобильных шин / А.А. Осипов, В.В. Ульянов, В.А. Гулевский, В.П. Мельников, С.Е. Харчук // Теоретические основы химической технологии. — 2019. — Т. 53, № 6. — С. 689–702.
24. Bett, R.K. Thermal Pyrolysis of Used Tyres to Produce Liquid Fuel: Process Optimization and How It Compares to Microwave Pyrolysis / R.K. Bett, A. Kumar, Z.O. Siagi, Z.C. Mibei — DOI 10.1155/2022/2291958 // Journal of Energy. — 2022. — Vol. 2022. — P. 2291958.
25. Bett, R.K. Optimization of Liquid Fuel Production from Microwave Pyrolysis of Used Tyres / R.K. Bett, A. Kumar, Z.O. Siagi — DOI 10.1155/2021/3109374 // Journal of Energy. — 2021. — Vol. 2021. — P. 3109374.

Yatsun Andrey Vladimirovich

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia
E-mail: yatsunandrei@yandex.ru

Modern technologies for recycling scrap tires

Abstract. Scrap tires are currently one of the most common types of waste worldwide, harming the environment both when incinerated and when simply stored outdoors. Only 15 % of all scrap tires are recycled, and the majority are simply dumped in landfills and unauthorized dumps. This article describes modern scrap tires recycling technologies, including mechanical crushing, incineration, waterjet cutting, cryogenic recycling, barodestruction recycling, ozone recycling, explosive circular recycling, biodegradation, liquefaction in an organic solvent, liquid metal pyrolysis, conventional pyrolysis, and microwave pyrolysis. The main advantages and disadvantages of these technologies are discussed. Waterjet cutting, cryogenic processing, barodestruction processing, ozone recycling, explosive circular recycling, liquefaction in an organic solvent, liquid metal pyrolysis, and biological degradation are expensive and ineffective for industrial processing of scrap tires. Simple and common mechanical crushing and incineration of tires also have their drawbacks: the multi-stage process, the difficulty of removing the power ring, and the high temperature (approximately 1 300°C) required for high-efficiency flue gas cleaning respectively. Traditional tire pyrolysis, compared to other recycling technologies, does not require expensive equipment and is simple to implement; however, it is associated with flue gas emissions and is time-consuming. Another alternative for recycling worn tires is microwave pyrolysis. This pyrolysis significantly reduces the processing time compared to traditional pyrolysis, does not require expensive equipment, and produces no atmospheric emissions. Microwave pyrolysis is suitable for recycling any type of used tires on an industrial scale.

Keywords: scrap tires; modern technologies of processing; conventional pyrolysis; microwave-assisted pyrolysis