

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЕРЕРАБОТКЕ И УТИЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН

Данилов О. С.¹, Алексейко Л. Н.², Таскин А. В.³, Иванников С. И.⁴

¹ ФГБОУ ВО «Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского», г. Норильск, Россия

² Гомельский государственный медицинский университет, г. Гомель, Беларусь

³ Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

⁴ Институт химии ДВО РАН, г. Владивосток, Россия.

Увеличение количества автотранспорта сопровождается ростом производства шин. Вместе с тем, несовершенство законодательной и нормативной базы, отсутствие мотивационной составляющей и дефицит требуемой инфраструктуры для размещения отработанных покрышек приводят к неконтролируемому накоплению данных отходов. Это приводит к возникновению целого ряда социально-экономических и экологических проблем [1].

В силу того, что шина представляет собой эластомер, обладающий сшитой структурой с присутствием значительного количества различных химических добавок и регуляторов, она может разлагаться в природе до 150 лет [2]. Разработку рациональных технологических решений по утилизации осложняют два фактора [3, 4]:

1. Как правило, состав шин является запатентованным, поэтому доподлинно неизвестен действительный состав подобных отходов с химической точки зрения. Обычная шина от легкового автомобиля может включать в себя около 40 типов каучука, полиэстер, металлы, нейлон, текстиль, до 7 типов технического углерода и кроме того несколько десятков разнообразных присадок и химических реагентов. Такой состав автошин очень вариателен по своим свойствам, что значительно осложняет разработку комплексных технологий по утилизации.

2. Отходы автомобильной резины не допускается утилизировать подобно материалам термопластичного характера, так как они относятся к термореактивным соединениям.

Утилизация и переработка автошин, утративших свои потребительские свойства крайне актуальна, поскольку [5, 6]:

1. Наблюдается значительный рост количества шин, обусловленный тем что автопарк в мировом масштабе увеличивается примерно на 1,5 млн машин в год. Это в свою очередь, требует отчуждения новых площадей для хранения дополнительных объемов отработанных автомобильных шин.

2. Скопления шинных отходов формируют значительные ареалы загрязнения природной среды на достаточно длительное время, являются очагом распространения как онкологических заболеваний, так и болезней, переносимых насекомыми.

3. На полигонах с отработанными шинами, как правило, отсутствует

необходимое техническое оснащение, позволяющее их дифференцировать по размеру, установить количество металла, смол, технического углерода и полимерной ткани в них.

4. На полигонах находятся шины различных компаний- производителей, имеющих различный состав, геометрические размеры, находящиеся в разных стадиях разложения.

Согласно [7], в мире накоплено приблизительно от 25 до 40 млн т отработанных автошин, со стабильным увеличением на 7 млн т каждый год (1,5 млрд покрышек). В краткосрочной перспективе (до 2030 г.) прогнозируется, что их количество на мусорных полигонах будет увеличиваться быстрее - до 5 млрд шин, большая часть которых не коснется утилизация или они будут сожжены со значительным ущербом природной среде.

В отношении объемов эластомерных отходов автомобильной промышленности в Российской Федерации, накопленных на настоящий момент, точные данные отсутствуют, однако по оценке руководителя отдела маркетинговых исследований и аналитики инвестиционно-аналитического агентства «Профессиональные комплексные решения» Ситникова Н.А. они могут составлять до 13 млн т. Скорость увеличения объемов данных отходов изменяется от 700000 до 800000 т в год. Например, в 2018 г. – 772000 т, в 2019 г. – 732000 т, в 2020 г. – 749000 т, в 2021 г. – 770000 т. Согласно исследованиям, утилизируется только 36 % от всего объема отработанных автошин (рис. 1), при том, что в мире в среднем этот показатель достигает до 80 %.

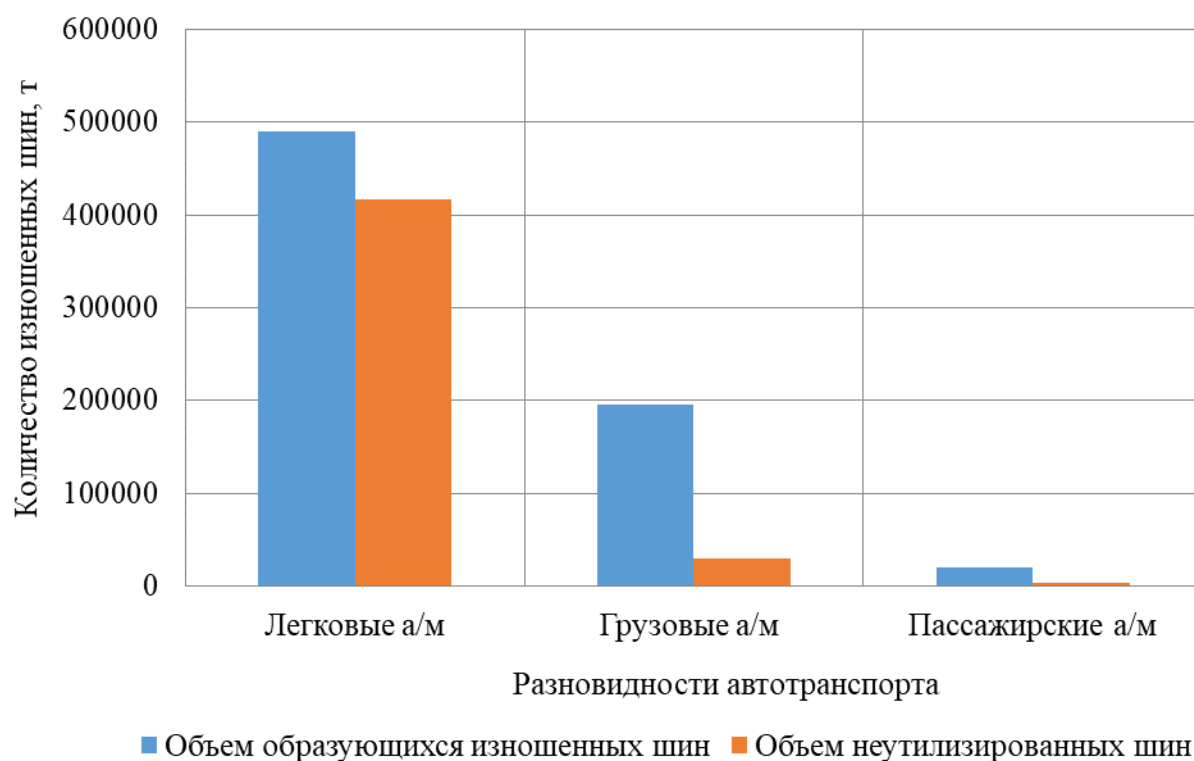


Рисунок 1 – Показатели переработки изношенных автошин в России

По разновидностям (видам транспорта) в объеме рассматриваемых отходов в Российской Федерации лидируют шины от автомобильного

транспорта (более 60 %), на втором месте шины от грузового автотранспорта (около 28 %) и замыкают тройку – отходы от пассажирского транспорта (около 3 %) [8, 9].

Ключевые решения по утилизации и переработке отработанных автошин включают в себя [5]:

- 1) изготовление резиновой крошки с применением криогенного, механического либо иного вида воздействия на них;
- 2) сжигание в цементных печах в целях получения энергии;
- 3) восстановление, а также конверсия отходов посредством химического растворения в органическом растворителе;
- 4) складирование на полигонах отходов;
- 5) продувание (переработка шин с применением озона);
- 6) пиролиз.

Очевидно, что значительная часть из представленных способов утилизации и переработки отработанных автошин вредна с экологической точки зрения [10]:

1. В процессе сжигания рассматриваемых отходов в воздушный бассейн поступает большое количество веществ токсичного характера (например, диоксины, фураны).

2. Отчуждаются значительные площади под хранение отходов. Плюс к этому увеличивается опасность возникновения стихийных пожаров на подобных полигонах. Кроме того, шины, взаимодействуя с водными осадками, растворяют в них определенную часть экологически опасных веществ, что ведет к загрязнению водных ресурсов и почв.

3. Если производится пиролиз изношенных автошин, то выделяется большой объем серы, что вредит природной среде, а само улавливание соединений серы сопряжено со значительными финансовыми издержками.

Несмотря на сопутствующие экологические риски в Евросоюзе в настоящее время преобладающим техническим решением по утилизации отработанных автошин является пиролиз с целью извлечения энергии. Флагманами использования подобной технологии выступают такие страны как Польша и Румыния, в которых до 90 % рассматриваемых отходов термически перерабатывается. Необходимо подчеркнуть, что западные страны следуют предписаниям экологического законодательства ЕС и оснащают технологические комплексы высокоэффективным оборудованием по газовой очистке.

Второй по распространенности технологией выступает измельчение отработанных автошин в резиновую крошку. Лидерами здесь являются (по данным Европейской ассоциации производителей резины и каучука) Финляндия (82 %), Дания (97 %), Эстония (100 %) [10].

В отличие от стран ЕС в Российской Федерации все еще наиболее частым решением является хаотичное захоронение с выбрасыванием отходов “на рельеф”, либо формируя несанкционированные мусорные полигоны.

Структура обращения с шинными отходами в РФ в настоящее время следующая: 63 % – захоронение, 23 % – производство измельченной резиновой

крошки, 13 % – пиролиз, 1 % – восстановление протектора.

Как видно из структуры обращения с отработанными шинами в нашей стране наиболее предпочтительным методом их переработки является получение резиновой крошки посредством механического дробления автошин. На сегодняшний день данное технологическое решение используется на 19 предприятиях соответствующего профиля, более прогрессивные методы получения резиновой крошки применяются на двух заводах: ООО «Экоинвест» (бародеструктивное дробление) и ЗАО «Завод переработки покрышек № 1» [10-12].

На наш взгляд, ключевыми проблемами (недостатками) существующих технических решений по переработке изношенных шин являются :

- 1) высокая техническая сложность реализации;
- 2) большая продолжительность производственного цикла;
- 3) высокая энергоемкость производства;
- 4) высокая нагрузка на экологию.

Вместе с тем, анализ публикаций российских и зарубежных авторов позволяет сделать заключение, что в настоящее время недостаточно внимания уделяется разработке промышленных технологий утилизации изношенных автошин с применением свойств различных видов физических полей (ультразвукового, электромагнитного и т.д.).

Одним из наиболее перспективных видов воздействия на полимерные эластомеры, к которым относятся отработанные автомобильные шины является СВЧ-излучение, позволяющее провести их эффективный энергосберегающий пиролиз с получением высококалорийного газа [13], пиромасел с теплотворной способностью, сопоставимой с нефтяным топливом [14], а также технического углерода [15]. Как отмечают зарубежные исследователи, его применение эффективно в микроволновой девулканизации шин (регенерации с температурой нагрева около 200 °С), потерявших потребительские свойства [16-18].

Уникальными свойствами СВЧ-излучения являются [19]:

- бесконтактное воздействие;
- возможность концентрации энергии в ограниченной зоне пространства и, практически, безынерционная управляемость мощностью, что позволяет локализовать воздействие излучения, а также быстро изменять факторы воздействия при изменении условий пиролиза;
- объемный нагрев;
- объемное распределение источников тепла;
- создание различных режимов нагрева благодаря тому, что поглощение микроволновой энергии происходит сложным образом в зависимости от размера тела и длины волны;
- многократное ускорение различных химических реакций;
- компактность установок электромагнитного микроволнового излучения.

Нами были проведены экспериментальные работы по сжиганию проб отработанной резины (автомобильный транспорт) в микроволновой установке для получения газовых смесей.

Условия проведения экспериментов были заданы следующим образом:

- 1) частота СВЧ-излучения – 2450 МГц;
- 2) мощность СВЧ-излучения – 900 Вт;
- 3) масса навески проб – 500 г (размер частиц резины – 4×4 см);
- 4) время воздействия излучения – 5-10 мин.

В процессе проведения экспериментов наблюдался пиролиз исходного полимерного сырья с выделением газовых смесей, пробы которых были отобраны для анализа на газовом хроматографе марки GC-2010 Plus (Shimadzu, Япония).

Согласно данным хроматографического анализа, в состав проб, полученных газовых смесей входят: непредельные и предельные углеводы, угарный газ, углекислый газ, сероводород, водород. Необходимо отметить, что доля водорода в общей смеси газов повышается с 40 до 62 об. % при увеличении времени облучения с 5 до 10 мин. Это коррелирует с результатами работы российских исследователей [13].

С химической точки зрения наблюдаемое увеличение водорода в газовой смеси связано с особенностями реакций разложения структуры отработанной резины под действием СВЧ-излучения, кардинально отличающихся от протекающих при стандартном пиролизе рассматриваемых отходов.

Водород имеет самую высокую теплотворную способность среди всех видов топлива (120 МДж/кг). На основе этого авторы настоящей работы предлагают следующую принципиальную схему утилизации изношенных автошин с применением электромагнитного СВЧ-излучения (рис. 2).

Принцип работы СВЧ-установки по утилизации шин следующий:

1. Из сырья предварительно удаляется металлический корд, поскольку его присутствие может вызвать появление токов Фуко и выходу СВЧ-установки из строя.

2. Подготовленное таким образом сырье подается в установку, оснащенную соответствующим СВЧ-излучателем (магнетроном) с частотой 2450 МГц и мощностью 50 кВт.

3. Сырье подвергается воздействию СВЧ-излучения (пиролиз резины с получением водорода и иных горючих газов). Согласно патенту [20] возможно утилизировать от 100 до 800 кг изношенных шин с мощностью магнетрона до 14 кВт в течение 5 мин. Указанная мощность магнетрона используется в исследовательских установка, тогда как в производственных возможно использовать более мощные магнетроны (50 кВт и выше), что позволит существенно увеличить объем перерабатываемых автошин.

4. Образовавшийся в результате пиролиза водород с иными горючими газами подается в газовый накопитель (коллектор), а уже оттуда, - в газовый генератор для выработки электроэнергии, которая в дальнейшем подается по замкнутому контуру на питание соответствующего оборудования установки (магнетрон и устройство для извлечения корда).

5. Производится сбор продуктов пиролиза резины – пиромасла и сажи (технического углерода).



Рисунок 2 – Блок-схема работы СВЧ-установки по утилизации шин

Ключевыми преимуществами представленной принципиальной блок-схемы работы установки по утилизации отработанных автошин с использованием СВЧ-излучения по сравнению со стандартным пиролизом являются:

1. Потенциальная возможность утилизации больших объемов отработанных автошин за короткое время.
2. Энергонезависимость установки (получение электроэнергии для работы из энергии сжигания газовой смеси обогащенной водородом). Подача энергии будет нужна только при запуске комплекса для накопления необходимого объема газа в коллекторе, затем установка переходит в замкнутый цикл и не требует внешних источников энергии.

Резюмируя вышеприведенный материал, можно заключить, что применение электромагнитного СВЧ-излучения является перспективной технологией переработки и утилизации отработанных автомобильных шин.

Список литературы

1. B. Wu, M.H. Zhou. Recycling of waste tyre rubber into oil absorbent // Waste Management. 2009. No. 29(1). pp. 355-359.
2. N. Roche, M.N. Ichchou, M. Salvia, A. Chettah Dynamic Damping Properties of Thermoplastic Elastomers Based on EVA and Recycled Ground Tire Rubber // Journal of Elastomers and Plastics. 2011. No. 43(4). pp. 317-340.
3. Мелюк К.И., Карпенко Е.М. Проблемы переработки изношенных автомобильных шин // Мат-лы I Междунар. науч. студен. конф. «Биоэкономика – экономика будущего»,

Минск: БГУ. 2023. С. 34-39.

4. K. Masaki, S.I. Ohkawara, T. Hirano and oth. Devulcanization of nitrile butadiene rubber in nitrobenzene // *Journal of Applied Polymer Science*. 2004. No. 91 (5). pp. 3342-3353.

5. Yu. Shadimetov, D. Ayrapetov Current issues of resource saving in the sphere of automobile transport by disposal of car tires // *Polish Journal of Science*. 2022. No.52. pp. 3-7.

6. M. Hashamfirooz, M.H. Dehghani, M. Khanizadeh and oth. A systematic review of the environmental and health effects of waste tires recycling // *Heliyon*. 2025. Vol. 11. Iss.2. e41909.

7. A.M. Moasas, M.N Amin, K. Khan and oth. A worldwide development in the accumulation of waste tires and its utilization in concrete as a sustainable construction material: A review // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. No. 17. e01677.

8. Рынок сбора и переработки изношенных автомобильных шин // Твердые бытовые отходы. 2023. С.35-39. URL: https://news.solidwaste.ru/wp-content/uploads/2023/08/206_Sitnikova.pdf?ysclid=m8gz45gxcj453062719 (дата обращения 18.03.2025).

9. Худякова Т.А., Шмидт А.В., Шмидт С.А. Анализ динамики и перспектив утилизации автомобильных шин в рамках концепции развития умных городов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. 2019. № 4. С.42-54.

10. Вострикова Е.А., Шишкин И.А. Освещение проблемы переработки автомобильных шин и предложение путей ее решения // Сб. мат-лов XXV Международного Биос-форума и Молодежной Биос-олимпиады. 2020. Кн.2. С. 352-356.

11. Утилизация изношенных автомобильных шин в России. URL: <https://www.waste.ru/modules/section/item.php?itemid=596> (дата обращения: 18.03.2025).

12. Шудякова К.А. Утилизация изношенных автомобильных шин в России // Молодой ученый. 2016. № 26 (130). С. 739-742. URL: <https://moluch.ru/archive/130/35973/> (дата обращения: 21.03.2025).

13. Яцун А.В., Коновалов Н.П., Ефименко И.С. Жидкие продукты пиролиза отработанных автомобильных шин под воздействием СВЧ // Химия твердого топлива. 2013. № 4. С. 60-62.

14. A.C. Yang Lu, F.N. Ani Controlled microwave-induced pyrolysis of waste tires // *International Journal of Technology*. 2016. No. 2. pp. 314-322.

15. A. Undri, B. Sacchi, E. Cantisani, N. Toccafondi Characterization of Carbon from Microwave Assisted Pyrolysis of Tires // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2013. No. 104. pp. 369-404.

16. F.D. de Sousa, C.H. Scuracchio The Role of Carbon Black on Devulcanization of Natural Rubber by Microwaves // *Materials Research-Ibero-American Journal of Materials*. 2015. No 18(4). pp. 791-797.

17. P.S. Garcia, F.D.B. de Sousa, J.A. de Lima, S.A. Cruz, C.H. Scuracchio Devulcanization of ground tire rubber: Physical and chemical changes after different microwave exposure times // *Express Polymer Letters*. 2015. No. 9(11). pp. 1015-1026.

18. F.D.B. de Sousa, C.H. Scuracchio, G.H. Hu and oth. Effects of processing parameters on the properties of microwave-devulcanized ground tire rubber/polyethylene dynamically revulcanized blends // *Journal of applied polymer science*. 2016. No. 133(23).

19. Диденко А.Н., Зверев Б.В. СВЧ-энергетика. М.: Наука, 2000. 400 с.

20. Способ переработки изношенных шин и/или резинотехнических изделий и устройство для его осуществления: пат. 2361731 РФ. № 2008100981/12 / Коновалов Н.П., Яцун А.В., Коновалов П.Н.; заявл. 09.01.2008; опубл. 20.07.2009, Бюл. № 20. 16 с.