

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 53.096

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-2-166-175

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ РЕЗИНЫ

Павлов Г.И.¹, Ваньков Ю.В.², Теляшов Д.А.^{1,2}, Зайнутдинова Д.А.¹, Мукадаров А.А.²

¹Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева, г. Казань, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
pavlov16@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Экспериментальным методом оценить степень влияния температуры инертных газов на скорость термического разложения отходов резинотехнических изделий (фрагментов автомобильной покрышки) при их непосредственном контакте. *МЕТОДЫ.* Исследования проводились на испытательном огневом стенде при стационарном режиме движения газов в температурном диапазоне от 300 °С до 500 °С. Исходная масса резины составляла 4 грамма. Термическое разложение резины осуществлялось за счет тепловой энергии инертного газа, выделяющейся при сжигании пропана - бутановой смеси с воздухом при $\alpha = 1,1 \dots 1,15$. Расходы топлива и окислителя оставались постоянными, изменение температуры газов осуществлялось теплообменом горячих газов и воды в теплообменнике. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье описаны: методика проведения экспериментов, исследуемый объект исследования, а также приведены результаты исследований и их анализ. В качестве основных параметров исследования были выбраны: скорость уменьшения массы резины от температуры газов, предельное значение температуры газов, при котором сера в твердом виде остается в разложившейся части резины. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Установлено, что с повышением температуры инертного газа, скорость процесса термического разложения резины возрастает. При нахождении резины в газовой среде в диапазоне температур от 450 °С до 500 °С содержание серы в твердом остатке практически остается неизменным. Средняя скорость протекания пиролиза равнялась 0,02 кг/ч, что в 6 раз больше скорости пиролиза в реторте (0,003 кг/ч).

Ключевые слова: *резинотехнические изделия; температура термического разложения; масса; время процесса; стационарный режим; инертный газ; вредные вещества.*

Благодарности: *Работа, по результатам которой выполнена статья, выполнена по Государственному контракту от 16 января 2023 г. №075-03-2023-291/1 в рамках РФФ «Умные наноматериалы для повышения энергоэффективности».*

Для цитирования: Павлов Г.И., Ваньков Ю.В., Теляшов Д.А., Зайнутдинова Д.А., Мукадаров А.А. Экспериментальное исследование влияния температуры инертных газов на интенсивность термического разложения резины // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 166-175. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-166-175.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF THE TEMPERATURE OF INERT GASES ON THE INTENSITY OF THERMAL DECOMPOSITION OF RUBBER

Pavlov G.I.², Vankov Y.V.¹, Telyashov D.A.^{1,2}, Zaynutdinova D.A.², Mukatdarov A.A.²

¹Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia

²Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia
pavlov16@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* An experimental method is used to evaluate the effect of the temperature of inert gases on the rate of thermal decomposition of waste rubber products (fragments of a car tire) upon their direct contact. *METHODS.* The research was carried out on a test firing stand at a stationary mode of gas movement in the temperature range from 300 °C to 500 °C. The initial weight of the rubber was 4 grams. The thermal decomposition of rubber was carried out due to the thermal energy of inert gas released during the combustion of a propane-butane mixture with air at $\alpha = 1.1...1.15$. The consumption of fuel and oxidizer remained constant, the change in gas temperature was carried out by heat exchange of hot gases and water in the heat exchanger. *RESULTS.* Methodology of conducting experiments, the object of research under the study, results of the research and their analysis are described in the article. The main parameters were selected: the rate of decrease in rubber mass depending on the temperature of the gases, the limiting value of the gas temperature at which sulfur in solid form remains in the decomposed part of the rubber. *CONCLUSION.* It was found that with increasing temperature of the inert gas, the rate of thermal decomposition of rubber increases. When rubber is in a gaseous environment in the temperature range from 450 °C to 500 °C, the sulfur content in the solid residue remains practically unchanged. The average rate of pyrolysis was 0.02 kg/h, which is 6 times higher than the rate of pyrolysis in the retort (0.003 kg/h).

Keywords: *rubber products; thermal decomposition temperature; mass; process time; stationary mode; inert gas; harmful substances.*

Acknowledgments: *The work was carried out under the State Contract dated January 16, 2023 No. 075-03-2023-291/1 within the framework of the RSF "Smart nonmaterial's for increasing energy efficiency."*

For citation: Pavlov G., Vankov Y.V., Telyashov D.A., Zaynutdinova D.A., Mukatdarov A.A. Experimental study of the effect of the temperature of inert gases on the intensity of thermal decomposition of rubber. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (2): 166-175. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-166-175.

Введение (Introduction)

Утилизации изношенных автомобильных покрышек и, вообще в целом, резинотехнических изделий, которые выработали свой ресурс, по-прежнему остается актуальной проблемой. Наиболее простым решением является их использование в качестве строительного или декоративного материала без переработки [1]. Но ввиду низкой эффективности, решить данную проблему таким образом удастся не более, чем на 10%. К тому же в 2021 году был издан закон, согласно которому использовать изношенные шины без переработки в качестве строительного материала запрещается [1-3]. В настоящее время изношенные шины в строительстве используют исключительно в виде резиновых крошек [2,3].

При утилизации шин наиболее широко применяется метод пиролиза. Данный метод позволяет получить ряд продуктов такие, как: технический углерод, пиролизный газ, прессованный металлокорд, синтетическая нефть [4-18]. Пиролиз может быть высокотемпературным и низкотемпературным. При высокотемпературном пиролизе процесс разложения материала протекает в температурных условиях 1000 °C...1400 °C, а при низкотемпературном - 400 °C ... 900 °C. Высокотемпературный пиролиз имеет такие преимущества как: высокий распад диоксинов (если есть сопутствующие их образованию вещества), плавление тяжелых металлов, максимальная газификация резинотехнических изделий. Отрицательные аспекты: образование сложных и ядовитых химических соединений, высокие экономические затраты на обеспечение процесса и, трудность обеспечения надежной работы энергоустановки (материал камеры пиролиза должен выдерживать высокие температуры). Наиболее предпочтительным является низкотемпературный пиролиз, который можно реализовать на простых и недорогих установках. Установки низкотемпературного пиролиза имеют два существенных недостатка: низкую производительность; цикличность процесса. Низкая производительность обусловлена тем, что нагрев отходов происходит в замкнутом объеме через стенки реторты. При таких условиях время нагрева перерабатываемого материала до температуры разложения может достигать от 5 до 12 часов. В России были попытки создания установок низкотемпературного пиролиза, в которых нагрев материала осуществлялся газами непосредственным контактом, в качестве которых использовались

продукты сгорания богатые горючими элементами, часто, продукты сгорания самой резины. Но они не нашли широкого применения из-за неудовлетворительных эксплуатационных характеристик и низких экологических показателей. В связи с этим, в основном, на предприятиях сбора хранения и переработки резины используются установки ретортного типа (Фортран, Т-ПУ-1). Это, несмотря на ее существенные недостатки, которые были отмечены выше. Перспективным представляется прямая передача тепла от нагретых газов к перерабатываемому материалу, если в качестве теплоносителя использовать инертные газы со стабильными термодинамическими параметрами, образующиеся при сжигании углеводородных топлив, в том числе пиролизных газов. Нагрев перерабатываемого материала газами с регулируемыми параметрами является более выигрышным, чем через стенку. Такой механизм широко используется в различных химических технологиях, где организовано строгое управление параметрами газов и содержанием концентрации окислителей. Большая часть отходов резины содержит серу, которая в чистом виде начинает кипеть при температуре 400 °С и более. Испаренная сера в присутствии паров воды может образовывать сернистую и серную кислоты. Это значение определяет максимально допустимый температурный уровень инертных газов. Как уже отмечалось выше, несмотря на очевидные преимущества, технологии пиролиза, в которых инертные газы напрямую взаимодействуют с твердыми углеводородсодержащими отходами, промышленностью не выпускаются. К одной из причин, как показывают результаты литературного обзора, следует отнести недостаточную научную базу [4,5,8,10,11,13]. По разложению резины в нагретой среде опубликовано достаточное количество работ. Например, в работе [18] авторы исследовали состав пиролизных газов при температуре нагрева резины до 450 - 500 °С. В работе [15] приведены результаты детальных исследований термического разложения резины в широком диапазоне температур - от 260 °С до 525 °С. Установлено, что наиболее интенсивно резина разлагается при температурах 375°С ... 400 °С. Аналогичные результаты получены авторами работ [4, 5, 8]. Замечено, что при дальнейшем повышении температуры резины до 600-650 °С выход летучих резко снижается и пиролиз резины, практически, приостанавливается. Авторами работ [6, 18] выявлено, что на предельных температурах образуются вредные вещества, которые негативно сказываются на экологические параметры процесса пиролиза. Такие же результаты получены и зарубежными авторами [4-8, 10-13]. Из анализа вышеназванных работ следует, что в составе пиролизных газов и жидкостей, получаемых из резины, может присутствовать сера и ее производные. В работе [9] авторы теоретически обосновали, что оптимальным температурным уровнем для скорости протекания пиролиза резины является 430 °С, при котором содержание серы в продуктах минимально. В приведенных статьях отмечено, что эксперименты по пиролизу резины проводились в замкнутых объемах, т.е. нагрев разлагаемого материала осуществлялся через стенку. Крайне редки работы научного характера по пиролизу резины нагретыми инертными газами.

Цель работы заключалась в получении новых данных по низкотемпературному пиролизу резины инертными газами, в качестве которых использовались продукты сгорания пропана и, сравнении их с результатами, полученными в ретортах. При проведении исследований решались следующие научные задачи:

1) установление зависимости уменьшения массы резины от времени воздействия инертных газов при разных значениях температур;

2) определение влияния температуры инертных газов на содержание серы в твердом остатке.

Материалы и методы (Materials and methods)

Исследование проводились на резине одного и того же типа и при начальных параметрах, близких к друг другу (начальная масса, температура, влажность). Метод исследований - экспериментальный на лабораторном стенде. Схема стенда приведена на рисунке 1.

Общий вид лабораторного стенда показан на рисунке 2. Основной частью стенда является рабочий участок, включающий в себя: камеры сгорания и пиролиза, теплообменник. Камера сгорания 3 представляет собой круглую цилиндрическую трубу, в нижней части которой расположены газовый коллектор 1 и искровая свеча зажигания 2. К верхней части камеры сгорания присоединен теплообменник 6, выполненный по схеме трубу в трубе. В теплообменник 6 вмонтирована камера пиролиза 5, внутри которой располагается тигль 8 с исследуемым веществом (резиной).

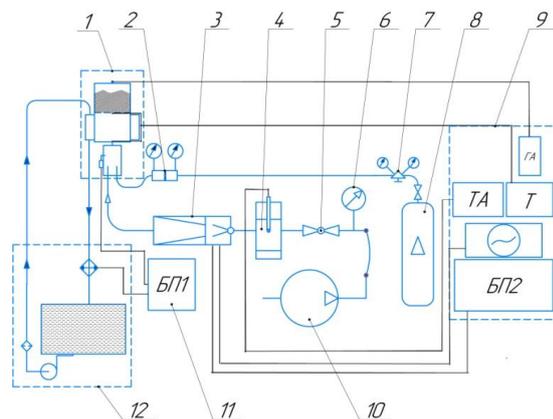


Рис. 1. Схема лабораторного стенда: 1 – рабочий участок; 2 – измерительный участок; 3 – пульсатор; 4 – камера Эйфеля; 5 – кран; 6 – манометр; 7 – редуктор; 8 – газовый баллон; 9 – измерительная система; 10 – компрессор; 11 – блок питания; 12 – система охлаждения
*Источник: Составлено авторами

Fig. 1. The scheme of the test firing stand: 1 – working section; 2 – measuring section; 3 – pulsator; 4 – Eiffel chamber; 5 – crane; 6 – pressure gauge; 7 – reducer; 8 – gas cylinder; 9 – measuring system; 10 – compressor; 11 – power supply; 12 – cooling system
Source: compiled by the author.

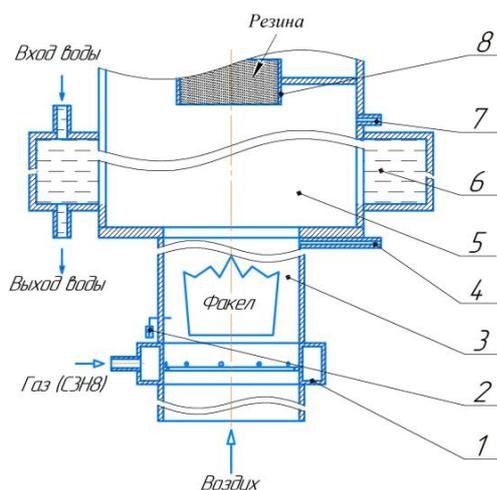


Рис. 2. Схема рабочего участка: 1 – газовый коллектор; 2 – свеча зажигания; 3 – камера сгорания; 4,7 – два технологических штуцера; 5 – камера пиролиза; 6 – теплообменник; 8 – тигль с резиной
*Источник: Составлено авторами

Fig. 2. Technical diagram of the pyrolysis chamber with the object of study: 1 – gas collector; 2 – spark plug; 3 – combustion chamber; 4 – measuring socket; 5 – pyrolysis chamber; 6 – heat exchanger; 7 – measuring socket; 8 – crucible with rubber
Source: compiled by the author.

Лабораторный стенд работает следующим образом. Включается компрессор 10 (Рис. 3), который нагнетает воздух в ресивер. После достижения давления сжатого воздуха установленного значения, которое контролируется манометром 6, компрессор выключается.

Воздух на рабочий участок подается открыванием вентиля 5, а скорость воздушного потока контролируется термоанемометром, датчик которого установлен в камере Эйфеля 4. Воздушный поток направляется на рабочий участок 1 через пульсатор 3, который предназначен для создания упорядоченных турбулентных пульсаций в потоке газа. Такой режим подачи воздуха обеспечивает сжигание пропано-воздушной смеси на коротком участке за счет интенсификации смешения. В опытах расход воздуха поддерживался постоянным, который контролировался по скорости потока воздуха в камере Эйфеля - 0,05 м/с. Пропан-бутановая газовая смесь подавалась из баллона 8. Необходимый расход топлива устанавливался по перепаду давления перед шайбой, который регулировался редуктором 7. Топливо-воздушная смесь поджигалась свечой зажигания 2 (Рис. 2). Горение пропано-воздушной смеси происходило в пульсирующем режиме с коэффициентом избытка воздуха, близким к 1, благодаря чему горение смеси завершалось в камере сгорания. Далее, продукты сгорания горячей смеси с заданной

температурой, в которых концентрация кислорода практически равнялась нулю (контролировалась газоанализатором), направлялись в камеру пиролиза. Стенд позволял изменять температуру продуктов сгорания в пределах от 300 °С до 500 °С благодаря системе охлаждения 12 (Рис. 1), включавшей в себя: водяной насос, фильтр, бак воды, охладитель и теплообменник типа «труба в трубе». Температура продуктов сгорания контролировалась термопарой, установленной в технологический штуцер 7. В экспериментах расход топлива составлял 0.452 кг/ч, коэффициент избытка воздуха поддерживался на уровне 1,0 (0.98...1,02) и контролировался газоанализатором «Testo 340». Концентрация оксида углерода и оксидов азота составила 30 ppm и 20 ppm соответственно. На стенде необходимые параметры регистрировались измерительной системой 9 (Рис. 1), состоящей из: осциллографа, термоанемометра, термометра, газового анализатора и блока питания с возможностью регулировки выходного напряжения для изменения частоты пульсатора.



Рис. 3 Общий вид лабораторного стенда:
1 – камера пиролиза; 2 – теплообменник;
3 – камера сгорания; 4 – пульсатор; 5 – камера Эйфеля; 6 – бак с водой; 7 – газовый баллон с редуктором; 8 – водяной насос; 9 – охладитель; 10 – блок питания; 11 – осциллограф; 12 – термоанемометр; 13 – термометр; 14 – газоанализатор

*Источник: Составлено авторами

Fig. 3. General view of the experimental firing stand:
1 – pyrolysis chamber; 2 – heat exchanger; 3 – combustion chamber; 4 – pulsator; 5 – eiffel chamber; 6 – water tank; 7 – gas cylinder with gearbox; 8 – water pump; 9 – cooler; 10 – power supply; 11 – oscilloscope; 12 – thermoanemometer; 13 – thermometer; 14 – gas analyzer

Source: compiled by the author.

Объектом исследования являлся фрагмент автомобильной шины, показанный на рисунке 4.



Рис.4. Объект исследования (фрагмент автомобильной шины)

*Источник: Составлено авторами

Source: compiled by the author.

Перед экспериментами подготавливалась опытная партия испытуемых веществ, в данном случае, резины. Нарезанные куски резины подгонялись по массе с точностью до $\pm 0,3$ г, для чего были использованы электронные весы «САРТОГОСМ ВЛТ-150-П». Масса

тигля составляла $75 \text{ г} \pm 0,3 \text{ г}$, масса тигля с резиной $79 \text{ г} \pm 0,3 \text{ г}$. В экспериментах резина помещалась в тигль, расположенной в камере пиролиза (Рис.2)

Эксперименты проводились при следующих температурах газов: 300, 350, 400, 450 и 500 °С. Эти значения были выбраны в соответствии с рекомендованными в литературе данными. Контроль начала и окончания процесса пиролиза определялся по коэффициенту прозрачности газового потока. Количественным параметром прозрачности являлся коэффициент ослабления света, определяемый оптическим дымомером ДО-1 путем просвечивания газового потока на выходе из трубы стенда.

Началом процесса пиролиза считалось изменение показания на шкале прибора, а окончанием – показание стабильных значений. Для предотвращения механического уноса тигль изготавливался из мелкоячеистой металлической сетки. Конструкция тигля представляла собой цилиндр с закрытыми торцевыми стенками. После завершения процесса пиролиза тигль вынимался из камеры пиролиза и взвешивался повторно. Разница в массах принималась за количество легких фракций, удаленных из резины в результате пиролиза. Для каждого значения температуры газов эксперименты проводились не менее пяти раз. Твердые остатки из тигля пересыпались в пластиковую пробирку, где путем перемешивания усреднялся их состав (при одном и том же значении температуры). В дальнейшем, они отправлялись в сертифицированную лабораторию «Наноаналитика» г. Казань для определения в них содержания элементарной серы. Для обеспечения стабильных значений температуры инертных газов в камере пиролиза лабораторный стенд перед проведением пиролиза выводился на регулярный режим работы, т.е. на такой режим, при котором при фиксированных значениях параметров, влияющих на температуру газов, температура газов оставалась постоянной и равнялась одному из принятых значений: 300, 350, 400, 450 и 500 °С. Время выхода стенда на регулярный режим в зависимости от заданной температуры газов составляло от 12 до 18 минут. Температура газов одновременно с концентрацией кислорода воздуха измерялись в зоне расположения тигля. После установления регулярного режима тигль помещался в камеру пиролиза и начинался контроль двух параметров: температуры газов и коэффициента преломления света в приборе. Отсчёт времени процесса разложения резины начинался по началу изменения значения коэффициента преломления света в газовых продуктах пиролиза.

Для получения данных по ретортной технологии использовался закрытый тигель с отверстием. Масса навески резины составляла также 4 г. Стенки тигля нагревались электрическим напряжением постоянного тока. Температура стенки поддерживалась постоянной, равной 500 °С. Время окончания пиролиза резины определялось по изменению массы тигля с резиной, которая практически оставалась постоянной через 30...35 минут.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

На рисунке 5 приведены графические зависимости изменения средней температуры газов в зоне расположения тигля от продолжительности процесса пиролиза. Из графиков видно, что чем больше температура инертного газа, тем за меньшее время заканчивается пиролиз резины. На имеющихся графиках наименьшее время протекания пиролиза соответствует температуре газов, равной 500 °С, наибольшее время – температуре газов с температурой 300 °С. Интересно наблюдать за характером изменений значений температур от времени. Видно, что вначале пиролиза температура инертных газов падает. Далее, температура газов постепенно начинает расти и через 9...11 минут, в зависимости от первоначально заданной температуры, стабилизируется. Следует отметить, что такое изменение температуры в процессе пиролиза характерно для всех режимов.

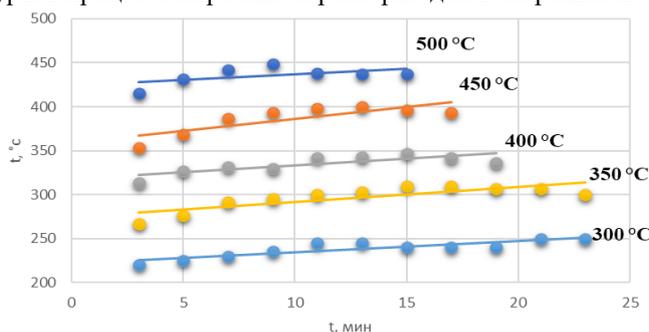


Рис. 5. График изменения температуры газов в зоне расположения тигля в процессе пиролиза

*Источник: Составлено авторами

Fig. 5. Graph of gas temperature changes in the crucible location area during pyrolysis

Source: compiled by the author

Это можно объяснить потерей части тепла газового потока на процессы термического разложения резины. По экспериментальным данным была построена зависимость уменьшения массы резины от полного времени протекания процесса пиролиза (Рис. 6) для заданных температур газов.

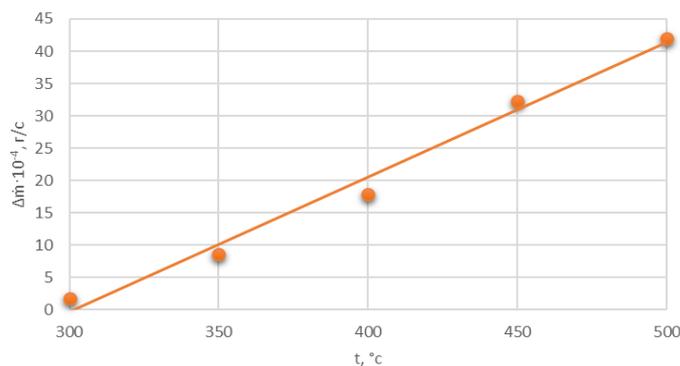


Рис. 6. График зависимости уменьшения массы резины от полного времени протекания процесса пиролиза для заданных температур инертных газов

*Источник: Составлено авторами

Fig. 6. A graph of the dependence of the decrease in the mass of rubber on the total time of the pyrolysis process for the specified temperatures of inert gases

Source: compiled by the author

Из полученного графика видно, что наибольшее уменьшение массы резины наблюдается при пиролизе, протекающем на более высоких температурах 450 °C ...500 °C. При таких температурах убыль массы составляла от 2,3 до 2,5 г. или примерно (60 ...63)% от исходной массы. При температуре 300 °C термическому разложению подвергается только лишь около 5% резины по массе. Твердый остаток, полученный пиролизом резины при разных температурных режимах, по структуре также отличается друг от друга. Образцы твердых остатков приведены на рисунке 7.



Рис. 7. Образцы твердых остатков после пиролиза резины

*Источник: Составлено авторами

Fig. 7. Samples of rubber products after thermal decomposition depending on different temperature conditions

Source: compiled by the author

Структура твердого остатка, полученная при температуре пиролиза равной 500 °C, хрупкая и при приложении небольших усилий легко разрушается. Иную структуру имеют твердые остатки, образовавшиеся при пиролизе резины на низких температурах газов. Например, при температуре газов равной 300 °C в твердом остатке содержатся фрагменты неразложившейся резины. Для сравнения, общая картина полученных образцов приведена на рисунке 8.



Рис. 8. Образцы твердых остатков пиролиза резины

*Источник: Составлено авторами

Fig. 8. Fragments of rubber at different temperatures of thermal decomposition

Source: compiled by the author

При решении практических вопросов очень важно знать, какое количество элементарной серы остается в твердом остатке в зависимости от температурных условий протекания пиролиза. Концентрация элементарной серы в исходной резине и в твердых остатках определялась на абсолютно сухую навеску (% масс.) на элементном анализаторе СКИС 5Е -СНН2200 с инфракрасным модулем SE-IRSII. Результаты элементного анализа приведены в таблице. В исходных образцах содержание элементарной серы составляло около 1 % на абсолютно сухую навеску (% масс.)

Таблица
Table

Содержание элементарной серы S в твердом остатке
Elemental sulphur S content in solid residue

№ п/п	Температура инертного газа, °С	Концентрация элементарной серы S на абсолютно сухую навеску, % масс
1	300	0,845
2	350	1,125
3	400	0,910
4	450	0,775
5	500	1,110

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из таблицы видно, что при нагреве резины инертными газами до температуры 500 °С концентрация серы в композите практически не меняется. Наблюдающиеся отклонения в значениях находятся в пределах погрешности измерения элементного анализатора, которая составляет ± 0,3 %.

Выводы (Conclusions)

1. Разработан лабораторный стенд для термического разложения углеводородных твердых веществ в инертной высокотемпературной газовой среде с управляемыми параметрами.

2. Наибольшая скорость протекания пиролиза резины соответствует температурам инертных газов 450 500 °С. Средняя скорость протекания пиролиза равнялась 0,02 кг/ч, что в 6 раз больше скорости пиролиза в реторте (0,003 кг/ч). Следует отметить важный факт, что при таких температурах инертных газов концентрация элементарной серы в твердом остатке практически не меняется - концентрация серы в отработавших газах минимальна.

3. Построен график изменения температуры газов в зоне расположения тигля в процессе пиролиза, который имеет линейный характер. Установлено, что при непосредственном контакте нагретых газов с резиной независимо от их первоначальной температуры газы вначале остывают, а потом их температура восстанавливается - время восстановления до первоначального значения совпадает со временем окончания процесса пиролиза.

4. Построена зависимость изменения массового расхода резины от температуры инертных газов.

Литература

1. <https://shinburg.ru/piroliznyy-kotel-dlya-reziny/> [ссылка активна на 31.05.2023]
2. <https://saiding-v-permi.ru/oborudovanie/piroliznyj-kotel-na-pokryshkah.html> [ссылка активна на 31.05.2023]
3. Виноградов Р.А., Комков В.И. Оценка экологической безопасности при осуществлении пиролиза автомобильных шин // Студенческий научный форум. 2022. 5с.
4. Deinma T. Dick., Oluranti Agboola., Augustine O. Ayeny. Pyrolysis of waste tyre for high-quality fuel products: A review // AIMS Energy. 2020. V. 8(5). P. 869-895.
5. Julius I. Osayi., Sunny Iyuke., Samuel E. Ogbeide. Biocrude Production through Pyrolysis of Used Tyres // Hindawi Journal of catalysts. 2014. V. 2014. P. 1 – 9.
6. C. Roy., A. Chaala., H. Darmstadt. The vacuum pyrolysis of used tires End-uses for oil and carbon black products // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 1999. V. 51. P. 201-221.
7. Adela Cizkova., Dagmar Juchelkova. Comparison of yield of tires pyrolysis in laboratory and pilot scales // GeoScience Engineering. 2009. V. LV2009. No.4. P. 60-65.
8. Ali Alsaleh., Melanie L. Sattler. Waste Tire Pyrolysis: Influential parameters and Product Properties // Curr Sustainable Renewable Energy Rep. 2014. V. 1. P. 129-135.

9. Boris Samarskiy. Analysis of modernization of tire recycling machine for improvement of environmental sustainability and feasibility // Degree Program in Environmental Engineering. 2014. P. 1-70.
10. Kirill Larionov., Konstantin Slyusarskiy., M.V. Kirgina., et al. Liquid Hydrocarbons Production by the Steam Pyrolysis of Used Tires: Energy Characteristics and Environmental Sustainability // 2022. V. 13. P. 2233-2251.
11. N. Nkosi., E. Muzenda., J. Gorimbo., et al. Developments in waste tyre thermochemical conversion processes: gasification, pyrolysis and liquefaction // Royal Society of chemistry. 2021. V. 11. P. 11844-11871.
12. Samuel Ayodele Iwarere., Ntandoyenkosi Malusi Mkhize. Pyrolysis of various tyre types: characteristics and kinetic studies using thermogravimetric analysis // Multidisciplinary Journal for 13. Waste. 2020. V. 9. P. 165-173.
13. Дорохов В.В., Антонов Д.В., Няшина Г.С., и др. Характеристики термического разложения перспективных жидких биотоплив // XXXVIII Сибирский теплофизический семинар. 2022. №38. С. 77.
14. Новичков Ю.А., Петренко Т.В., Братчун В.И. Исследование процесса бескислородного пиролиза изношенных автомобильных шин // Вестник ХНАДУ. 2005. 3с.
15. Макаров А.В. Некоторые аспекты рецилинга изношенных автомобильных покрышек методом пиролиза // Вестник ТОГУ. 2008. № 1(8). С. 247-258.
16. Чич Саида Кимовна. Пиролиз как оптимальный метод утилизации отработанных автомобильных шин // Новые технологии. 2009. №3. 5с.
17. Фатьянов В.С., Черников Д.В., Арестов О.В. Проблемы утилизации автомобильных шин в Приморском крае и в России // Новые импульсы развития: вопросы научных исследований. 2020. С. 100-113.
18. Павлов Г.И., Кочергин А.В., Ситников О.Р., и др. Переработка изношенных шин и резинотехнических изделий в инертную крошку при использовании установок пульсирующего горения // Вестник казанского технологического университета. 2011. С. 174-179.
19. <https://shinburg.ru/kompanii-po-utilizatsii-shin/> [ссылка активна на 31.05.2023].

Авторы публикации

Павлов Григорий Иванович – д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Специальные технологии в образовании» (СТВО) Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ). pavlov16@mail.ru

Ваньков Юрий Витальевич – д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). yvankov@mail.ru

Теляшов Дмитрий Александрович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). assaulttelov@mail.ru

Зайнутдинова Динара Айдаровна – аспирант Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ). zajnutdinova-dinara@mail.ru

Мукадаров Алик Альбертович – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). A.Mukatdarov@abdev.ru

References

1. <https://shinburg.ru/piroliznyy-kotel-dlya-reziny/> [the link is active on 31.05.2023].
2. <https://saining-v-permi.ru/oborudovanie/piroliznyj-kotel-na-pokryshkah.html> [the link is active on 31.05.2023].
3. Vinogradov R.A., Komkov V.I. Assessment of environmental safety in the implementation of pyrolysis of automobile tires // *Student Scientific Forum*. 2022. 5s.
4. Deinma T. Dick., Oluranti Agboola., Augustine O. Ayeny. Pyrolysis of waste tyre for high-quality fuel products: A review // *AIMS Energy*. 2020. V. 8(5). P. 869-895.
5. Julius I. Osayi., Sunny Iyuke., Samuel E. Ogbiede. Biocrude Production through Pyrolysis of Used Tyres // *Hindawi Journal of catalysts*. 2014. V. 2014. P. 1 – 9.
6. C. Roy., A. Chaala., H. Darmstadt. The vacuum pyrolysis of used tires End-uses for oil and carbon black products // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 1999. V. 51. P. 201-221.

7. Adela Cizkova., Dagmar Juchelkova. Comparison of yield of tires pyrolysis in laboratory and pilot scales // *GeoScience Engineering*. 2009. V. LV2009. No.4. P. 60-65.
8. Ali Alsaleh., Melanie L. Sattler. Waste Tire Pyrolysis: Influential parameters and Product Properties // *Curr Sustainable Renewable Energy Rep*. 2014. V. 1. P. 129-135.
9. Boris Samarskiy. Analysis of modernization of tire recycling machine for improvement of environmental sustainability and feasibility // *Degree Program in Environmental Engineering*. 2014. P. 1-70.
10. Kirill Larionov., Konstantin Slyusarskiy., M.V. Kirgina., et al. Liquid Hydrocarbons Production by the Steam Pyrolysis of Used Tires: Energy Characteristics and Environmental Sustainability // 2022. V. 13. P. 2233-2251.
11. N. Nkosi., E. Muzenda., J. Gorimbo., et al. Developments in waste tyre thermochemical conversion processes: gasification, pyrolysis and liquefaction // *Royal Society of chemistry*. 2021. V. 11. P. 11844-11871.
12. Samuel Ayodele Iwarere., Ntandoyenkosi Malusi Mkhize. Pyrolysis of various tyre types: characteristics and kinetic studies using thermogravimetric analysis // *Multidisciplinary Journal for 13. Waste*. 2020. V. 9. P. 165-173.
13. Dorokhov V.V., Antonov D.V., Nyashina G.S., et al. Characteristics of thermal decomposition of promising liquid biofuels // *XXXVIII Siberian Thermophysical Seminar*. 2022. No.38. p. 77.
14. Novikov Yu.A., Petrenko T.V., Bratchun V.I. Investigation of the process of oxygen-free pyrolysis of worn-out automobile tires // *Vestnik HNADU*. 2005. 3s.
15. Makarov A.V. Some aspects of recycling of worn-out car tires by pyrolysis // *Bulletin of the TOGU*. 2008. No. 1(8). pp. 247-258.
16. Cheech Saida Kimovna. Pyrolysis as an optimal method of recycling used car tires // *New technologies*. 2009. No. 3. 5s.
17. Fatyanov V.S., Chernikov D.V., Aristov O.V. Problems of utilization of automobile tires in Primorsky Krai and in Russia // *New impulses of development: issues of scientific research*. 2020. pp. 100-113.
18. Pavlov G.I., Kochergin A.V., Sitnikov O.R., et al. Recycling of worn tires and rubber products into inert crumbs when using pulsating combustion units Gorenje // *Bulletin of Kazan Technological University*. 2011. pp. 174-179.
19. <https://shinburg.ru/kompanii-po-utilizatsii-shin/> [the link is active on 31.05.2023].

Authors of the publication

Grigoriy I. Pavlov – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia.

Yuri V. Vankov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. yvankov@mail.ru

Dmitry A. Telyashov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia; Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia. assaulttelov@mail.ru

Dinara A. Zaynutdinova - Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia. zajnutdinova-dinara@mail.ru

Alik. A. Mukatdarov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. A.Mukatdarov@abdev.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **21.12.2023 г.**

Отредактировано **28.01.2024 г.**

Принято **09.02.2024 г.**