

УДК 662.61+620.98

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗИФИКАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПОКРЫШЕК В РЕЖИМЕ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ С РАЗНЫМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

В. М. Кислов, Ю. Ю. Цветкова, М. В. Цветков, Е. Н. Пилипенко,
М. В. Салганская, Д. Н. Подлесный, А. Ю. Зайченко, Е. А. Салганский

Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН
142432 Черногловка, vmkislov@icp.ac.ru

Проведены эксперименты по фильтрационному горению автомобильных покрышек в смеси с твердым теплоносителем. Массовое содержание частиц покрышек в смеси варьировалось от 10 до 70 %. В качестве теплоносителя были использованы частицы химически инертного сапфира (Al_2O_3) и способного поглощать серу мрамора (CaCO_3). Определены оптимальные условия фильтрационного горения автомобильных покрышек (содержание автопокрышек в смеси 50 %, температура горения примерно 1000 °С, массовая скорость горения 0.40 кг/м³ поданного воздуха). Установлено, что замена твердого инертного теплоносителя на мрамор практически не влияет на температуру горения. Состав продуктов горения при этом изменяется: в газообразных продуктах увеличивается содержание CO_2 (теплота их сгорания при этом снижается примерно с 2.5 до 2.2 МДж/м³), выход жидких продуктов пиролиза несколько уменьшается (примерно с 45 до 40 %), а содержание серы в твердых продуктах сгорания увеличивается (с 28 до 40 %).

Ключевые слова: фильтрационное горение, твердый теплоноситель, автомобильные покрышки, мрамор, поглощение серы.

DOI 10.15372/FGV20230210

ВВЕДЕНИЕ

Одними из самых распространенных серо-содержащих техногенных отходов являются использованные автомобильные покрышки [1, 2]. Ежегодно в мире насчитывается около 1.5 млрд штук автомобильных покрышек с истекшим сроком эксплуатации [3]. В России количество вышедших из эксплуатации шин составляет порядка 50 млн шт/год. Большая часть использованных автомобильных шин в России вывозится на полигоны для захоронения мусора и различные неорганизованные свалки, в то время как за рубежом на повторную переработку с получением новых продуктов направляется менее 7 %, а около 11 % преобразуется в электричество [4, 5]. Накопленные отработанные ав-

топокрышки представляют серьезную экологическую проблему [6]. Автопокрышки обладают высокой пожароопасностью и при неорганизованном горении на открытом воздухе в окружающую среду попадают продукты неполного сгорания: мелкодисперсная сажа, диоксид серы, полиароматические углеводороды и другие вещества, имеющие I и II классы опасности [7–9]. Кроме того, накопление дождевой воды во внутренней части шины приводит к выщелачиванию из нее токсичных веществ (например, тяжелых металлов) и тем самым к загрязнению грунтовых вод [10].

В настоящее время привлекательным способом утилизации отходов резинотехнических изделий, в том числе изношенных автопокрышек, благодаря их низкой влажности и высокой теплоте сгорания является термическая конверсия в печах различной конструкции с использованием получаемого тепла [11–14]. Также из покрышек при термообработке выделяют жидкие продукты пиролиза, которые преобразуют в топливные смеси [15–17].

Основными проблемами переработки отходов резинотехнических изделий являются подготовка к сжиганию и обеспечение эко-

Исследование выполнено в рамках госзадания № 0089-2019-0018 ИПХФ РАН (номер госрегистрации АААА-А19-119-022690098-3).

Доложено на II Международной научной конференции «Физика и химия горения и процессов в экстремальных условиях», 12–16 июля 2022, Самара.

© Кислов В. М., Цветкова Ю. Ю., Цветков М. В., Пилипенко Е. Н., Салганская М. В., Подлесный Д. Н., Зайченко А. Ю., Салганский Е. А., 2023.

логической чистоты образующихся выбросов [18, 19]. Применение современных технологий позволяет снизить в продуктах сгорания содержание оксидов азота и серы, сажи, полиароматических углеводородов, диоксинов и других вредных соединений до минимальных значений, а также обеспечить подавление повторного образования диоксинов [20, 21].

К числу перспективных способов термохимической конверсии отходов различного типа относится газификация отходов в режиме фильтрационного горения со сверхадиабатическим разогревом [22–24]. Однако при горении резинотехнических изделий возникает немаловажная проблема — выделение большого количества жидких продуктов пиролиза (до 50 %), которые могут препятствовать равномерной фильтрации газа сквозь пористый слой [14, 25, 26], а неравномерность фильтрации, в свою очередь, приводит к искривлению фронта горения, которое может развиваться с течением времени вплоть до потери устойчивости фронта. Добавлением катализаторов в систему можно управлять выходом продуктов пиролиза газифицируемого топлива [27], а решить проблему устойчивости фронта горения можно способом, предложенным в работе [28], — добавлением твердого кускового материала, который образует пористый каркас из частиц, обеспечивающий равномерную газопроницаемость среды при фильтрационном горении.

В качестве пористого каркаса могут быть использованы тугоплавкие частицы как полностью инертного, так и химически активного материала (реагент, катализатор) [29, 30]. При газификации в режиме фильтрационного горения пористый каркас дополнительно играет роль теплоносителя, с помощью которого тепло от продуктов рекупируется к исходным реагентам [31–33]. Использование противотока твердой фазы и газа дает возможность нейтрализовать кислые газы (H_2S , SO_2 , HCl) добавкой щелочных сорбентов к газифицируемому топливу [34, 35]. Химические вещества, образующиеся при нейтрализации кислых газов, остаются в твердых продуктах сгорания и экологической опасности не представляют.

Целью данной работы является исследование закономерностей горения отходов резинотехнических изделий на примере изношенных автопокрышек, а также поиск оптимальных режимов их газификации, обеспечивающих устойчивое горение с получением энергии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Используемые материалы

В качестве объекта исследования использовалась автомобильная покрышка марки NEXEN ROADIAN 541 235/75 R16, с которой предварительно был снят металлический корд. Покрышку разрезали на кусочки размером примерно 10 мм.

Элементный состав материала автомобильной покрышки: C — 83.6 %, H — 7.5 %, S — 1.6 %, N — 0.32 %, O (по разнице) — 2.1 %, зола — 4.9 %. Химический состав минеральных компонентов автомобильной покрышки после выгорания органической части и углерода в пересчете на оксиды: SiO_2 — 3.92 %, Al_2O_3 — 1.30 %, CaO — 29.02 %, MgO — 1.75 %, SO_3 — 36.90 %, TiO_2 — 5.20 %, ZnO — 21.41 %, остальное — 0.49 %.

В качестве твердого негорючего материала использовали технический сапфир (Al_2O_3) с размером частиц $7 \div 10$ мм и крошку мрамора с размером частиц $3 \div 7$ мм. Анализ химического состава используемого мрамора (CaCO_3) показал отсутствие примесей.

Методика химических анализов

Количественный элементный анализ автомобильных покрышек, твердых и жидких продуктов, полученных при их пиролизе, и образцов покрышек, прошедших термическую обработку в электропечи, проводили методом сжигания в потоке кислорода на CHNS/O элементном анализаторе Vario MICRO cube.

Химический состав зольного остатка, а также мрамора, используемого в экспериментах, получали посредством анализа на сканирующем автоэмиссионном электронном микроскопе Zeiss LEO SUPRA 25. Зольный остаток покрышек предварительно готовили по ГОСТ Р 55661-2013.

Анализ газообразных продуктов осуществляли с помощью хроматографа «Хроматэк Кристалл-5000.2».

Серу в газообразных продуктах определяли из массового баланса по разности.

Методика окисления образцов в печи

Эксперименты по окислению частиц автомобильных покрышек проводили в электропечи SNOL 6.7/1300. Навески частиц покрышек

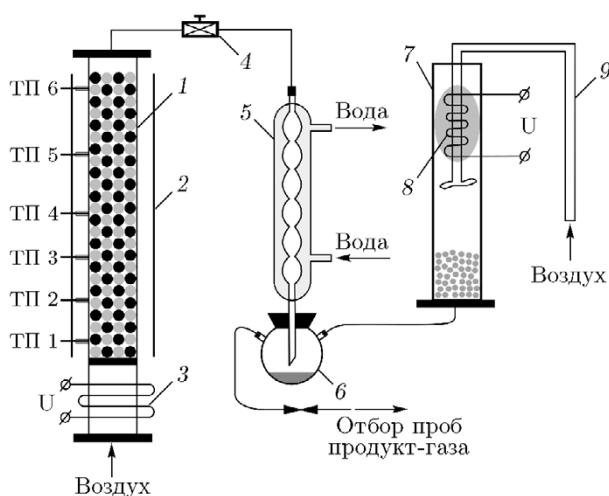


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — реактор, 2 — теплоотражающий экран, 3, 8 — электроспираль, 4 — смолоотделитель, 5 — холодильник, 6 — колба для сбора жидких продуктов, 7 — газовая горелка, 9 — трубка для подачи воздуха в горелку, ТП 1–6 — термодатчики

массой $6 \div 7$ г размещали одновременно внутри холодной печи на четырех кварцевых лодочках. По мере достижения требуемой температуры образец вынимали из печи и остужали на воздухе. Выбранный режим нагрева в печи был близок к условиям нагрева частиц шин в экспериментах по газификации.

Методика эксперимента

Эксперименты проводили в лабораторном кварцевом реакторе 1 длиной 800 мм с внутренним диаметром 45 мм (рис. 1). Для снижения боковых теплопотерь со стенки реактора устанавливался теплоотражающий экран 2. Перед экспериментом нижнюю часть реактора заполняли твердым негорючим материалом, который служил подложкой. Далее реактор загружали исследуемой смесью, состоящей из кусочков автопокрышки и твердого теплоносителя, который используется в качестве пористого каркаса. Массовое содержание покрышек в смеси с теплоносителем варьировали от 10 до 70 %.

После прогрева нижней части реактора электроспиралью 3 в него начинали подавать воздух, что приводило к формированию волны фильтрационного горения, которая обеспечивала газификацию исследуемого материала. Удельный расход воздуха в реактор составлял $680 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$. Воздух подавали через ниж-

ний фланец реактора, образующиеся продукты газификации в виде аэрозоля выходили через верхний торец реактора, который был закрыт фланцем с отверстием, к которому присоединяли систему для сбора жидких продуктов.

В ходе эксперимента температуру горения измеряли хромель-алюмелевыми термодатчиками, расположенными в шести точках по высоте реактора. Спаи термодатчиков в большинстве экспериментов находились у стенки реактора. В ряде экспериментов измеряли температуру в центре реактора.

Система выделения жидких углеводородов из образующегося при газификации аэрозоля включала в себя смолоотделитель 4, принцип работы которого основан на пропускании образующегося аэрозоля через узкое отверстие, в результате чего происходило осаждение жидких продуктов из продукт-газа. Продукты газификации, выходящие из реактора, проходили последовательно через смолоотделитель 4 и водяной холодильник 5. Жидкие продукты пиролиза осаждались в колбе 6, расположенной за смолоотделителем. Выходящий из системы сбора жидких продуктов горючий газ сжигали в газовой горелке 7. Газ поступал в горелку через нижний фланец, а необходимый для его сжигания воздух — через вставленную внутрь нее узкую кварцевую трубку 9 с завихрителем потока на конце. Воспламенение газозооной смеси производили с помощью электроспираль 8.

Пробы газовых продуктов отбирали в ходе эксперимента с помощью стеклянных ампулловушек. Отобранные газообразные продукты анализировали на газовом хроматографе GC-CRYSTAL 5000 фирмы «Хроматэк». Массу образовавшихся жидких продуктов определяли после опыта взвешиванием, затем проводили их элементный анализ. При использовании в качестве теплоносителя частиц сапфира зольный остаток взвешивали, затем отделяли золу от частиц сапфира и анализировали. При использовании в качестве теплоносителя крошки мрамора на анализ отправляли не только частицы золы, но и размолотые в ступке частицы мрамора.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С увеличением массового содержания частиц автомобильных покрышек в газифицируемом материале температура и форма профиля волны горения меняются (рис. 2). Темпера-

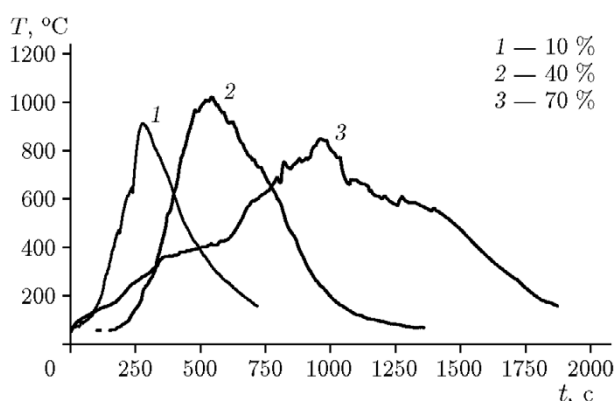


Рис. 2. Профили температуры горения смесей с различным содержанием частиц автомобильных покрышек

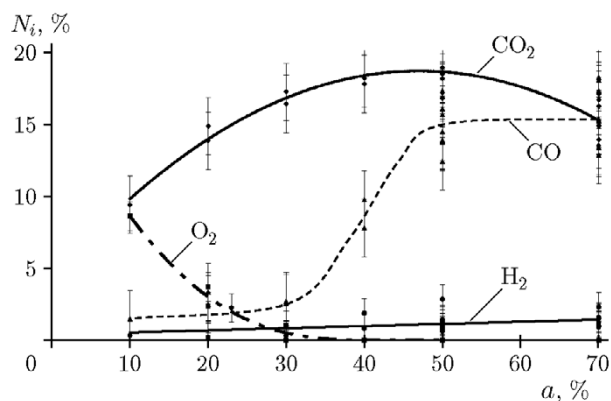


Рис. 3. Состав газообразных продуктов фильтрационного горения при различном содержании частиц автомобильных покрышек в смеси с инертным материалом (сапфиром)

тура, измеренная у стенки реактора, возрастала примерно от 905 °C (10 % резины) до 1070 °C (30 % резины), затем снижалась до 845 °C (70 % резины). Температура в центре была примерно на 300 °C выше, чем у стенки реактора.

При горении смесей с содержанием резины $a \lesssim 30$ % в составе газообразных продуктов преобладает углекислый газ (рис. 3), также в них имеется непрореагировавший кислород. С ростом доли резины содержание углекислого газа в газообразных продуктах увеличивается, а кислорода — уменьшается. При горении смесей с содержанием резины 40 % кислород расходуется полностью, содержание углекислого газа несколько увеличивается, а также появляется заметное количество угарного газа.

Наибольшее содержание горючих компонентов достигается при горении составов с со-

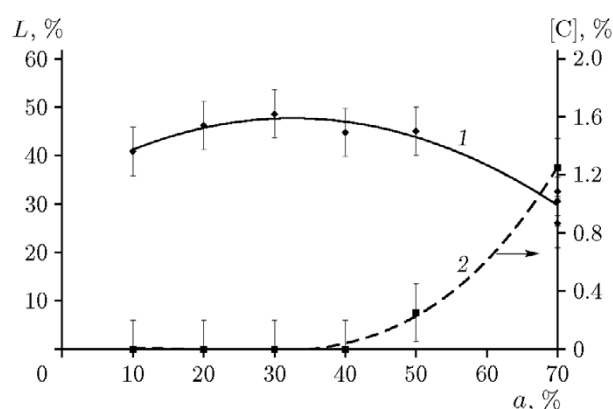


Рис. 4. Выход пиролизных смол (1) и несгоревшего углерода (2) при различном содержании частиц автомобильных покрышек в смеси с инертным материалом (сапфиром)

держанием резины $a = 50$ и 70 %. В среднем содержание угарного газа в газообразных продуктах составляло примерно 15 %, а водорода — 1.5 % (об). Максимальное содержание водорода во всех отобранных пробах не превышало 3 % (об). Так как водород образуется при пиролизе резины, с увеличением ее содержания в смеси концентрация водорода в газообразных продуктах имеет тенденцию к слабому росту.

При содержании резины в смеси $a = 50$ % объем частиц твердого теплоносителя составлял примерно треть, а при $a = 70$ % — примерно 15 %. Снижение объема пористого теплоносителя затрудняет формирование регулярной структуры пористого каркаса, что оказывает влияние на процесс горения: горение смеси с $a = 50$ % было нестабильным, но устойчивым, а с $a = 70$ % — неустойчивым и нестабильным.

С увеличением содержания резины в смеси от 10 до 30 % выход жидких продуктов повышается примерно с 40 до 50 %, затем он снижается, достигая при газификации составов с содержанием резины 70 % примерно 30 % (рис. 4). При газификации составов с содержанием резины 50 % и выше в твердых продуктах сгорания появляется недогоревший углерод. Проблему недогоревшего углерода можно решить, направив твердые продукты сгорания повторно на стадию газификации.

Исходя из полученных результатов экспериментов с сапфиром, для экспериментов с мрамором изначально были выбраны составы с содержанием резины 50 и 70 %. Поскольку, как и в экспериментах с сапфиром, горение смесей с содержанием резины 70 % было неустойчивым

и нестабильным, далее эксперименты проводили с составами, содержащими 50 % резины.

Эксперименты с добавкой мрамора показали, что вид теплоносителя (пористого твердого каркаса) влияет на выход образующихся смол: при использовании частиц сапфира выход смол составлял $\approx 45\%$, а при использовании крошки мрамора — $\approx 40\%$ (мас.). По-видимому, это происходит из-за каталитического влияния карбоната кальция на разложение жидких продуктов пиролиза.

Средний элементный состав жидких продуктов пиролиза следующий: С — 85.8 %, Н — 11.1 %, S — 1.05 %, N — 0.28 %, О (по разнице) — 1.7 %. Он близок к элементному составу органической части исходных шин, за исключением содержания водорода, концентрация которого в жидких продуктах оказалась выше. Состав жидких продуктов практически не зависел от вида теплоносителя, за исключением несколько меньшего количества азота (0.26 %) при использовании мрамора по сравнению с сапфиром (0.35 %).

Температура горения незначительно отличалась для обоих видов теплоносителя. Максимальная температура вблизи стенки реактора составляла 850°C , в центре реактора — 1150°C .

При использовании в качестве теплоносителя мрамора содержание в газообразных продуктах CO_2 было несколько выше — $15 \div 19\%$, тогда как при использовании сапфира — $14 \div 17\%$, а содержание азота ниже — соответственно $64 \div 67$ и $68 \div 70\%$. Состав горючих компонентов газа при использовании мрамора был примерно таким же, как и при использовании в качестве теплоносителя сапфира: CO — $14 \div 15\%$, H_2 — 1.5 %, CH_4 — 0.3 %, C_2H_4 — 0.3 %. Теплота сгорания газообразных продуктов составляла примерно 2.2 МДж/м^3 .

Был выполнен анализ поведения частиц резины в электропечи. На рис. 5 показан температурный режим окисления частиц резины в электропечи и соответствующее этим условиям изменение их массы (m_i), отнесенное к массе исходного образца (m_0). Наиболее резкое снижение массы образца происходит на первом этапе окисления (37.5 % от исходной). В твердом остатке доля каждого элемента, отнесенного к его исходному содержанию в образце, уменьшается: углерода — до 37 %, водорода — до 6.5 %, серы — до 54 %. При дальнейшем окислении углерод и водород выгорают практи-

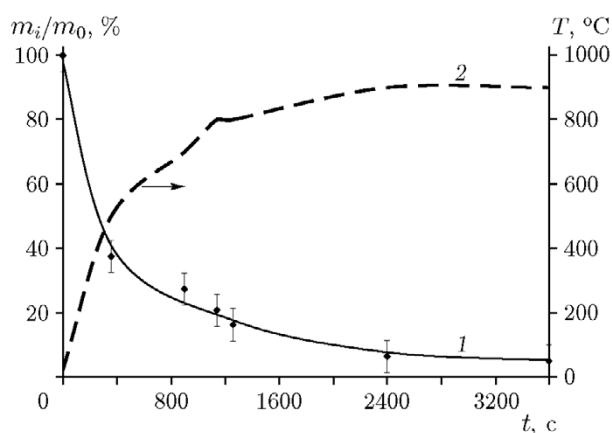


Рис. 5. Динамика выгорания (1) и температурный режим нагрева (2) при окислении образцов резины в электропечи

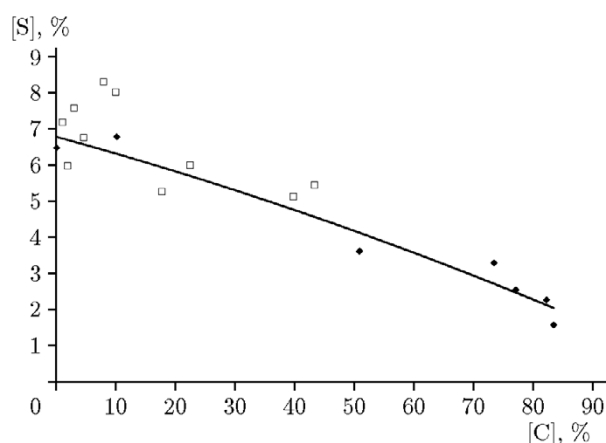


Рис. 6. Корреляция между содержанием углерода и серы при различной степени сгорания частиц резины:

темные точки — окисление в печи, светлые — окисление в реакторе

чески полностью. В образующейся золе, выход которой составляет 5 %, остается значительное количество серы — примерно 21 % от ее исходного содержания.

Обнаружена корреляция между содержанием углерода и долей серы, остающейся в твердых продуктах сгорания (рис. 6). Данная корреляция сохраняется как для частиц, прокаливавшихся в печи, так и для твердых продуктов сгорания, образующихся в экспериментах по газификации. В экспериментах по газификации составов с содержанием резины 50 % из-за нестабильности процесса газификации остаточное содержание углерода в твердом остатке колебалось в пределах $5 \div 10\%$ (мас.).

При содержании остаточного углерода 10 % доля серы в твердых продуктах сгорания составляла примерно 28 % от ее исходного содержания в образце. После дополнительного прокаливания зольного остатка в печи и практически полного выгорания органической части в золе оставалось серы примерно 21 % от ее исходного содержания, что согласуется как с результатами окисления образцов шин в печи, так и с данными по составу золы используемых шин.

В экспериментах по газификации с использованием мрамора в качестве теплоносителя доля серы (от ее исходного количества), перешедшая в зольный остаток, примерно равнялась 40 %, что в 1.5 раза больше, чем при использовании инертного в химическом отношении сапфира (примерно 28 %). В жидких продуктах пиролиза массовая доля серы составляла 26 и 29 % в случае использования мрамора и сапфира соответственно. Оставшаяся часть серы находилась в газообразных соединениях: 43 % для случая с сапфиром и 34 % — с мрамором.

Выбранная нами в качестве поглотителя мраморная крошка имеет низкую пористость и является не самым оптимальным сорбентом кислых газов. Использование более активного щелочного сорбента, например оксида или гидроксида кальция, позволит увеличить долю серы, переходящей в твердые продукты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены эксперименты по фильтрационному горению автомобильных покрышек в смеси с твердым теплоносителем, определены состав и выход образующихся твердых, жидких и газообразных продуктов. Установлено, что при фильтрационном горении составов с содержанием горючего 10 ÷ 40 % процесс идет устойчиво и стабильно. С повышением содержания горючего до 50 % процесс протекает неравномерно, но устойчиво. Твердые продукты сгорания могут содержать до 10 % несгоревшего углерода. Повышение доли горючего до 70 % приводит к увеличению неравномерности горения. Содержание углерода в твердых продуктах сгорания может достигать 20 %. Дальнейшее увеличение доли горючего нецелесообразно из-за потери устойчивости процесса.

Выход смол пиролиза при газификации составов с содержанием горючего 10 ÷ 50 % находится в пределах 40 ÷ 50 % и имеет максимум

(48.6 %) при газификации составов с содержанием горючего 30 %. При газификации составов с содержанием горючего 70 % выход смол снижается до 30 %.

С ростом доли топлива теплота сгорания образующихся газообразных продуктов увеличивается, достигая при газификации составов с содержанием горючего 50 и 70 % примерно 2.5 и 2.7 МДж/м³ соответственно. Учитывая нестабильный характер горения составов с содержанием горючего 70 %, наиболее целесообразно перерабатывать составы с долей горючего 50 %.

Замена химически инертного твердого теплоносителя (сапфира) мрамором, который частично разлагается при прохождении волны горения, позволяет улавливать серу из газовой фазы, что приводит к изменению содержания соединений серы в образующихся продуктах горения. При использовании инертного теплоносителя (сапфира) массовая доля серы, перешедшей в зольный остаток, составляет примерно 28 %. В смолу и газообразные продукты переходит соответственно 29 и 43 % серы. После прокаливания зольного остатка до полного окисления углерода массовая доля серы, оставшейся в нем, примерно равна 21 %, что свидетельствует о том, что значительная часть всей серы химически связывается с минеральными компонентами золы.

Замена химически инертного сапфира на мрамор также приводит к некоторому снижению теплоты сгорания газообразных продуктов (примерно с 2.5 до 2.2 МДж/м³) и выхода смол пиролиза (примерно с 45 до 40 %). Элементный состав смол при изменении типа твердого теплоносителя меняется мало. Общая доля серы, переходящей в смолы пиролиза, при этом снижалась незначительно (примерно с 29 до 26 %).

Определение элементного состава горючих материалов, образующихся продуктов горения, состава мрамора и минеральной части золы выполнены сотрудниками АЦКП ИПХФ РАН Г. В. Гусевой и Н. Н. Дрёмовой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Xiao Z., Pramanik A., Basak A. K., Prakash C., Shankar S. Material recovery and recycling of waste tyres — A review // *Cleaner Mater.* — 2022. — V. 5. — 100115. — DOI: 10.1016/j.clema.2022.100115.
2. Dabic-Miletic S., Simic V., Karagoz S. End-of-life tire management: a critical review //

- Environ. Sci. Pollut. Res. — 2021. — V. 28, N 48. — P. 68053–68070. — DOI: 10.1007/s11356-021-16263-6.
3. **Zhong Y., Xu J., Pan Y., et al.** Combustion characteristics of aromatic-enriched oil droplets produced by pyrolyzing unrecyclable waste tire rubber // *Fuel Process. Technol.* — 2022. — V. 226. — 107093. — DOI: 10.1016/j.fuproc.2021.107093.
 4. **Formela K.** Sustainable development of waste tires recycling technologies – recent advances, challenges and future trends // *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.* — 2021. — V. 4, N 3. — P. 209–222. — DOI: 10.1016/j.aiepr.2021.06.004.
 5. **Bulei C., Todor M. P., Heput T., Kiss I.** Directions for material recovery of used tires and their use in the production of new products intended for the industry of civil construction and pavements // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* — 2018. — V. 294, N 1. — 012064. — DOI: 10.1088/1757-899X/294/1/012064.
 6. **Sisani F., Di Maria F., Cesari D.** Environmental and human health impact of different powertrain passenger cars in a life cycle perspective. A focus on health risk and oxidative potential of particulate matter components // *Sci. Total Environ.* — 2022. — V. 805. — 150171. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150171.
 7. **Nadal M., Rovira J., Díaz-Ferrero J., Schuhmacher M., Domingo J. L.** Human exposure to environmental pollutants after a tire landfill fire in Spain: Health risks // *Environ. Int.* — 2016. — V. 97. — P. 37–44. — DOI: 10.1016/j.envint.2016.10.016.
 8. **Mentes D., Toth C. E., Nagy G., Muránszky G., Pólska C.** Investigation of gaseous and solid pollutants emitted from waste tire combustion at different temperatures // *Waste Manage.* — 2022. — V. 149. — P. 302–312. — DOI: 10.1016/j.wasman.2022.06.027.
 9. **Chen G., Sun B., Li J., et al.** Products distribution and pollutants releasing characteristics during pyrolysis of waste tires under different thermal process // *J. Hazard. Mater.* — 2022. — V. 424. — 127351. — DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127351.
 10. **Liu A., Ma Y., Gunawardena J. M., et al.** Heavy metals transport pathways: The importance of atmospheric pollution contributing to stormwater pollution // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* — 2018. — V. 164. — P. 696–703. — DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.08.072.
 11. **Nkosi N., Muzenda E., Gorimbo J., Belaid M.** Developments in waste tyre thermochemical conversion processes: gasification, pyrolysis and liquefaction // *RSC Adv.* — 2021. — V. 11, N 20. — P. 11844–11871. — DOI: 10.1039/D0RA08966D.
 12. **Mavukwana A., Sempuga C.** Recent developments in waste tyre pyrolysis and gasification processes // *Chem. Eng. Commun.* — 2022. — V. 209, N 4. — P. 485–511. — DOI: 10.1080/00986445.2020.1864624.
 13. **Arabiourrutia M., Lopez G., Artetxe M., et al.** Waste tyre valorization by catalytic pyrolysis — A review // *Renew. Sustain. Energ. Rev.* — 2020. — V. 129. — 109932. — DOI: 10.1016/j.rser.2020.109932.
 14. **Toledo M., Ripoll N., Céspedes J., et al.** Syngas production from waste tires using a hybrid filtration reactor under different gasifier agents // *Energy Convers. Manage.* — 2018. — V. 172. — P. 381–390. — DOI: 10.1016/j.enconman.2018.07.046.
 15. **Mikulski M., Hunicz J., Duda K., et al.** Tyre pyrolytic oil fuel blends in a modern compression ignition engine: A comprehensive combustion and emissions analysis // *Fuel.* — 2022. — V. 320. — 123869. — DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123869.
 16. **Karagöz M., Polat F., Sarıdemir S., Yeşilyurt M. K., Ağbulut Ü.** An experimental assessment on dual fuel engine behavior powered by waste tire-derived pyrolysis oil — biogas blends // *Fuel Process. Technol.* — 2022. — V. 229. — 107177. — DOI: 10.1016/j.fuproc.2022.107177.
 17. **Polat F.** Experimental evaluation of the impacts of diesel-nanoparticles-waste tire pyrolysis oil ternary blends on the combustion, performance, and emission characteristics of a diesel engine // *Process Saf. Environ. Prot.* — 2022. — V. 160. — P. 847–858. — DOI: 10.1016/j.psep.2022.03.003.
 18. **Qiao Y., Chen Z., Wu X., et al.** Analysis of comprehensive utilization of waste tire pyrolysis char by combustion method // *Fuel.* — 2022. — V. 312. — 122996. — DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122996.
 19. **Jiang W., Ni L., Pan W., Qian L., Li Z.** Combustion characteristics of pulverized coal coupled waste tire // *Proc. of SPIE — The Int. Conf. on Optoelectronic Information and Functional Materials (OIFM).* — 2022. — V. 12255. — P. 342–346. — DOI: 10.1117/12.2638748.
 20. **Манелис Г. Б., Глазов С. В., Салганский Е. А., Лемперт Д. Б.** Автоволновые процессы при фильтрационном горении в противоточных системах // *Успехи химии.* — 2012. — Т. 81, № 9. — С. 855–873.
 21. **Кислов В. М., Цветкова Ю. Ю., Глазов С. В. и др.** Распределение серы в продуктах газификации автомобильных покрышек // *Хим. физика.* — 2020. — Т. 39, № 8. — С. 64–70. — DOI: 10.31857/S0207401X20080038.
 22. **Fierro M., Gutierrez C., Bubnovich V., Ripoll N., Toledo M.** Thermal effect of hollow spheres in a filtration combustion process // *Appl. Therm. Eng.* — 2021. — V. 195. — 117037. — DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117037.

23. Saidi M., Gohari M. H., Ramezani A. T. Hydrogen production from waste gasification followed by membrane filtration: a review // *Environ. Chem. Lett.* — 2020. — V. 18, N 5. — P. 1529–1556. — DOI: 10.1007/s10311-020-01030-9.
24. Mujeebu M. A., Abdullah M. Z., Mohamad A. A., Bakar M. A. Trends in modeling of porous media combustion // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 2010. — V. 36, N 6. — P. 627–650. — DOI: 10.1016/j.pecs.2010.02.002.
25. Salgansky E. A., Kislov V. M., Glazov S. V., Salganskaya M. V. Formation of liquid products at the filtration combustion of solid fuels // *J. Combust.* — 2016. — V. 2016. — 9637082. — DOI: 10.1155/2016/9637082.
26. Larionov K. B., Slyusarskiy K. V., Kirgina M. V., et al. Liquid hydrocarbons production by the steam pyrolysis of used tires: Energy characteristics and environmental sustainability // *Waste Biomass Valor.* — 2022. — V. 13, N 4. — P. 2233–2251. — DOI: 10.1007/s12649-021-01628-2.
27. Кислов В. М., Салганский Е. А., Цветков М. В., Цветкова Ю. Ю. Влияние катализаторов на выход продуктов газификации биомассы // *Журн. прикл. химии.* — 2017. — Т. 90, № 5. — С. 579–584.
28. Зайченко А. Ю., Глазов С. В., Салганский Е. А. и др. Фильтрационное горение вязких углеводородных жидкостей // *Теорет. основы хим. технол.* — 2017. — Т. 51, № 5. — С. 525–531. — DOI: 10.7868/S0040357117050153.
29. Глазов С. В. Оценка процесса газификации пылевидного топлива в реакторе фильтрационного горения со встречным потоком теплоносителя // *Физика горения и взрыва.* — 2021. — Т. 57, № 5. — С. 31–41. — DOI: 10.15372/FGV20210503.
30. Тихов С. Ф., Валеев К. Р., Дубинин Ю. В., Языков Н. А., Черепанова С. В., Саланов А. Н., Яковлев В. А., Садыков В. А. Дезактивация сотовых керамометаллических катализаторов после испытаний на устойчивость в промышленном реакторе сжигания угля // *Физика горения и взрыва.* — 2022. — Т. 58, № 2. — С. 118–130. — DOI: 10.15372/FGV20220213.
31. Сеплярский Б. С., Абзалов Н. И., Кочетков Р. А., Лисина Т. Г. Макрокинетика горения гранулированных смесей (Ti + C)—Ni. Влияние размера гранул // *Физика горения и взрыва.* — 2022. — Т. 58, № 2. — С. 58–63. — DOI: 10.15372/FGV20220206.
32. Боровик К. Г., Лупенко Н. А. Численное моделирование гетерогенного горения осесимметричных пористых объектов в условиях принудительной фильтрации и естественной конвекции // *Физика горения и взрыва.* — 2022. — Т. 58, № 3. — С. 40–53. — DOI: 10.15372/FGV20220304.
33. Сеплярский Б. С., Кочетков Р. А., Лисина Т. Г., Абзалов Н. И. Режимы горения гранулированной смеси Ti + C при различном содержании газифицирующей добавки // *Физика горения и взрыва.* — 2021. — Т. 57, № 3. — С. 88–96. — DOI: 10.15372/FGV20210308.
34. Ren X., Rokni E., Liu Y., Levendis Y. A. Reduction of HCl emissions from combustion of biomass by alkali carbonate sorbents or by thermal pretreatment // *J. Energy Eng.* — 2018. — V. 144, N 4. — 04018045. — DOI: 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000561.

*Поступила в редакцию 13.09.2022.
Принята к публикации 14.12.2022.*