

УДК 66.011:669.784  
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4908  
Шифр специальности ВАК: 1.3.14, 2.4.6  
Научная статья

## Параметры и состав газа при пиролизе резиновой крошки на основе численного моделирования

А.Д. Гардер✉, А.Р. Богомолов

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачёва, Россия, г. Кемерово

✉cawa0104@mail.ru

**Аннотация. Актуальность.** Численное моделирование становится всё более востребованным инструментом для изучения и анализа различных термохимических процессов, среди которых пиролиз вызывает наибольший интерес ввиду многообразия и сложности протекания химических реакций. Кроме того, данный процесс является экологически безопасным, так как не производит вредных выбросов в атмосферу. Результаты, получаемые при численном моделировании пиролиза изношенных шин, позволят получать достоверные данные о составе выделяющихся газообразных веществ, оптимизировать и прогнозировать поведение процесса при различных конфигурациях оборудования, что существенно сокращает время экспериментальных исследований. **Цель** работы заключается в определении состава пиролизного газа и выявлении зависимостей выхода летучих компонентов от температуры с помощью методов численного моделирования процесса термического разложения резиновой крошки, плотно уложенной в цилиндрическом реакторе проточного типа. **Методы.** Для решения поставленной задачи используется численный метод, основанный на применении конечно-элементного анализа в пакете прикладных программ «Ansys». **Результаты и выводы.** Выполнен литературный обзор исследований отечественных и зарубежных авторов в области пиролиза. Представлены результаты численного моделирования процесса термического разложения в цилиндрическом реакторе с неподвижным плотным слоем для измельчённых отработанных крупногабаритных шин фракции 3 мм в диапазоне температур от 350 до 650 °С. Полученные результаты демонстрируют изменение выхода летучих веществ в зависимости от температуры, а также качественно и количественно согласуются с экспериментальными данными с погрешностью не более 15 %. Отмечено, что с повышением температуры в исследуемом газе наблюдается увеличение содержания водорода и снижение доли углеводородов C<sub>1</sub>–C<sub>4</sub>. По дериватограмме резиновой крошки в токе гелия определено значение энергии активации, которая составляет 188,6 кДж/моль.

**Ключевые слова:** пиролиз, отработанные резинотехнические изделия, летучие вещества, численное моделирование, энергоэффективность

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № 075-03-2024-082/2 от 15.02.2024 г. (FZES-2024-0001).

**Для цитирования:** Гардер А.Д., Богомолов А.Р. Параметры и состав газа при пиролизе резиновой крошки на основе численного моделирования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 9. – С. 255–266. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4908

---

UDC 66.011:669.784  
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4908  
Scientific paper

## Gas parameters and composition during pyrolysis of rubber chips based on numerical simulation

A.D. Garder✉, A.R. Bogomolov

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

✉cawa0104@mail.ru

**Abstract. Relevance.** Numerical modeling is becoming an increasingly popular tool for studying and analyzing various thermochemical processes, among which pyrolysis is of the greatest interest due to the variety and complexity of chemical reactions. In addition, this process is environmentally friendly, as it does not produce harmful emissions into the atmosphere. The results obtained by numerical simulation of pyrolysis of worn tires make it possible to obtain reliable data on the composition of released gaseous substances, optimize and predict the behavior of the process under various configurations of equipment, which significantly reduces the time of experimental studies. **Aim.** To determine the composition of the pyrolysis gas and to identify the temperature dependences of the yield of volatile components using numerical simulation methods for the thermal decomposition of rubber chips densely packed in a cylindrical flow reactor. **Methods.** To solve this problem, a numerical method based on the application of finite element analysis in the Ansys application software package is used. **Results and conclusions.** The paper provides a literature review of pyrolysis research by domestic and foreign authors. The results of numerical simulation of thermal decomposition in a cylindrical reactor with a fixed dense layer for crushed spent large-sized tires of 3 mm fraction in the temperature range from 350 to 650°C. The results obtained demonstrate a change in the yield of volatile substances depending on temperature, as well as qualitatively and quantitatively consistent with experimental data with an error of no more than 15%. It is noted that with temperature growth in the studied gas, an increase in the hydrogen content and a decrease in the proportion of C<sub>1</sub>–C<sub>4</sub> hydrocarbons are observed. According to the derivatogram of the rubber crumb in the helium current, the value of the activation energy is determined, which is 188.6 kJ/mol.

**Keywords:** pyrolysis, used rubber products, volatile substances, numerical modeling, energy efficiency

**Acknowledgements:** The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of project no. 075-03-2024-082/2 dated 02/15/2024 (FZES-2024-0001).

**For citation:** Garder A.D., Bogomolov A.R. Gas parameters and composition during pyrolysis of rubber chips based on numerical simulation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 9, pp. 255–266. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4908

## Введение

За последние годы наблюдается повышенный интерес к сбору, переработке и утилизации твердых отходов производства и потребления. Наряду с этим создание инновационной технологии, позволяющей преобразовывать отходы во вторичное сырьё для выпуска новой продукции и получения энергии, является приоритетным направлением развития производственного кластера Российской Федерации [1]. Выявлено, что одним из наиболее интенсивно накапливающихся материалов на полигонах твердых бытовых отходов являются резинотехнические изделия (РТИ), к которым можно отнести изношенные крупногабаритные шины грузового автотранспорта, изоляционные материалы, герметизирующие прокладки, а также разнообразные элементы быта. Причиной этому служит непрерывный прогресс в области технологий, социальной и городской инфраструктуры, который неразрывно связан с инновациями в транспортной отрасли. Согласно статистической отчётности за 2015 г., на территории России и СНГ образовано 90,3 тыс. т отходов шин, покрышек, резиновых камер, из которых переработано (утилизировано, обезврежено) 69,9 тыс. т, что соответствует 77,4 % объема образования [2]. Тем не менее оценки экспертов и данные из множества аналитических статей заметно отличаются от официальной отчётности. В соответствии с этими данными, в Москве, Санкт-Петербурге и Ленинградской области накапливается от 60 до 90 тыс. т отходов РТИ, а ежегодная масса образования изношенных шин во всех регионах Российской Федерации оценивается циф-

рой более 1 млн т. Из них только около 15 % подвергается вторичной переработке, а остальные 85 % либо сжигаются, либо отправляются на полигоны, где не происходит их надлежащей переработки [3].

## Обзорная часть

Вулканизированные каучуки как основной компонент, используемый при производстве шин, представляют собой нерастворимый и неплавкий термореактивный материал, что делает невозможным его прямую переработку и повторное использование [4]. Тогда как захоронение и складирование отработанных резинотехнических изделий и шин на мусорных полигонах оказывает пагубное воздействие на окружающую среду и является крайне нерентабельным способом утилизации отходов, содержащих ценные компоненты. Кроме того, с 2019 г. в России, согласно федеральному закону № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления», такой метод переработки запрещен [5].

Среди множества известных на данный момент способов утилизации отходов РТИ, позволяющих повторно использовать продукты переработки, можно выделить следующие: восстановление протекторов шин, механическое, криогенное и гидравлическое измельчение, различные технологии девулканизации резин, основанные на применении микроволновых и ультразвуковых процессов. Эти методы позволяют использовать измельчённый гранулят резины при производстве новых шин, строительстве дорожных покрытий, добавок к цементам и изготовлении формовых резиновых изде-

лий различного назначения. Однако ограниченная сфера применения, высокая стоимость оборудования, значительные трудовые и энергозатраты не позволяют раскрыть весь энергетический потенциал и предложить комплексное решение проблемы утилизации изношенных шин. По этой причине всё чаще прибегают к методам термохимической конверсии, используя их в непрерывных технологических процессах для получения ценных химических соединений [6, 7].

*Сжигание отходов РТИ* используется для получения тепловой и электрической энергии, но этот способ малоэффективен, так как требует больших расходов на оборудование для очистки от пирена, диоксинов и содержащих серу веществ.

Перспективным направлением в сфере конверсии отходов РТИ является *гидротермальное сжигание*. Метод требует процесса с повышенными температурами и давлениями. Насколько известно, существует ограниченное количество патентов, научных статей, посвященных изучению и применению на практике этого метода утилизации изношенных шин [8].

*Пиролиз* занимает доминирующее положение по сравнению с другими технологиями утилизации. Этот процесс может быть интегрирован во многие технологические цепочки для повышения уровня конкурентоспособности производств. Протекая в бескислородной, инертной среде при высоких температурах от 300 до 900 °С, пиролиз изношенных шин позволяет разрушать химические связи в каучуке и получать твердый, богатый углеродом остаток, высококалорийные газообразные продукты и жидкую фазу, получаемую путём конденсации газа при температуре окружающей среды [9]. Продукты, полученные в результате пиролиза, имеют высокий энергетический потенциал и низкую себестоимость, находя своё применение в разных сферах экономики. Жидкая фаза обладает высокой теплотворной способностью, составляющей около 41–44 МДж/кг, что стимулировало бы её использование в качестве замены мазуту или печному топливу. Эти жидкости являются потенциальным источником циклических монотерпенов, таких как лимонены, которые находят широкое промышленное применение в косметической продукции, растворителях, клеях, служат в качестве отдушки в чистящих средствах [10]. При обработке пиролитического полукокса можно получить синтез-газ (СО). Газообразные продукты могут быть использованы в качестве источника энергии и поддержания работы самой установки. Кроме того, тепло, которое выделяется при сжигании газообразных продуктов и частично переданное в процессе термического преобразования, можно применять для обогрева помещений, что позволяет существенно со-

кратить расходы на отопление и электроэнергию [11].

В зависимости от цели и характера решаемых задач для изучения термохимического процесса пиролиза применяются различные типы реакторов. В настоящее время для утилизации отходов резинотехнических изделий наиболее часто выделяют три типа реакторов: с неподвижным слоем, с кипящим слоем и с вращающейся печью.

*Реакторы с неподвижным слоем* чаще всего предназначены для получения полукокса, который образуется благодаря медленному нагреву и длительному нахождению продукта в зоне пиролиза [12]. В исследованиях [13, 14], направленных на изучение воздействия температуры, скорости нагрева и продолжительности процесса пиролиза изношенных шин на выход газообразных веществ в реакторе с неподвижным слоем, было установлено, что в температурном диапазоне от 300 до 700 °С происходит повышение выхода масла и газа.

Пиролизные реакторы с *псевдооживленным (кипящим) слоем* подходят для быстрого пиролиза [15]. Пиролиз шины грузового автотранспорта в реакторе с кипящим слоем рассматривался в работе [16]. Отмечено, что повышение температуры с 600 до 700 °С приводит к увеличению выхода жидкой маслянистой фракции.

*Реактор во вращающейся печи* обеспечивает высокую степень перемешивания реагентов и продуктов в процессе, что полезно для эффективной термokonверсии. При медленном пиролизе тепло требуется только для запуска процесса пиролиза, а выход жидкой фракции во вращающихся печах-реакторах значительно ниже, чем в реакторах с кипящим слоем [17, 18].

За последние несколько десятилетий накопилось большое количество фундаментальных исследований в области пиролиза отработанных шин, однако многие кинетические и термические механизмы, участвующие в этом процессе, до конца не изучены. Трудности с математическим описанием пиролиза отходов РТИ связаны с низкой селективностью процесса, а число элементарных химических реакций может достигать нескольких сотен. Использование методов компьютерного моделирования позволяет расширить и углубить накопленный пласт знаний в этой сфере, позволяя анализировать большие объёмы информации и предсказывать результаты при введении новых переменных. В настоящее время множество как зарубежных, так и отечественных авторов стремятся создать алгоритмы и математические модели, которые смогут с высокой точностью воспроизвести результаты реальных экспериментов [19–21]. Тем не менее серьёзной преградой на их пути становится моделирование гидродинамики многофазного потока газ – твёрдое вещество.

Моделирование пиролиза изношенных шин практически полностью опирается на данные термогравиметрического анализа, а для описания каждого компонента шин и определения энергии активации процесса используется уравнение Аррениуса. Несмотря на это, ещё в работах [22, 23] было доказано, что данные термогравиметрии могут быть использованы только для описания общей кинетики, а не для получения детальной информации об отдельных реакциях. В процессе пиролиза важную роль играет тепломассообмен. На начальных этапах процесса разложение шины происходит под контролем скорости нагрева, поскольку преобладают гетерогенные реакции. Однако на более поздних стадиях процесс становится более стабильным благодаря диффузионным процессам, протекающим в твердой фазе. Авторами [24] была разработана подробная модель процесса разложения автомобильных покрышек, которая учитывает, как внутренний, так и внешний теплообмен, а также три параллельные химические реакции и эффекты изменения энтальпии. Они предположили, что реакции протекают по первому порядку и использовали уравнения Аррениуса для описания параллельных реакций. Однако результаты расчётов, полученные с помощью термогравиметрического метода, показали два пика, в то время как экспериментальные данные показали только один. Это может быть связано с выбором параметров, которые не позволяют точно контролировать процесс разложения. Кроме того, исследователи провели анализ чувствительности своей модели. Было обнаружено, что время разложения наиболее чувствительно к изменениям энергий активации реакций, происходящих в компонентах покрышки. При этом время разложения могло изменяться более чем на 96 %. В современных исследованиях [25, 26] активно развиваются и совершенствуются математические модели, которые применяются в различных прикладных программах. Эти модели учитывают процессы тепло- и массообмена в измельчённом резиновом материале, а также взаимодействие с газовой фазой.

*Целью работы* является определить состав пиролизного газа и выявить зависимость выхода летучих компонентов от температуры с помощью методов численного моделирования процесса термического разложения резиновой крошки, плотно уложенной в цилиндрическом реакторе проточного типа.

### Материалы и методы

Для того чтобы получить достоверную оценку создаваемой математической модели, авторами [27, 28] был осуществлён ряд практических исследований. Отработанные шины, применяемые в ка-

честве материала для экспериментальных исследований процесса пиролиза, представлены в виде измельчённой фракции (до 3 мм) крупногабаритных шин карьерных автосамосвалов компании «Кузбассразрезуголь». Характеристики исходного сырья представлены в табл. 1.

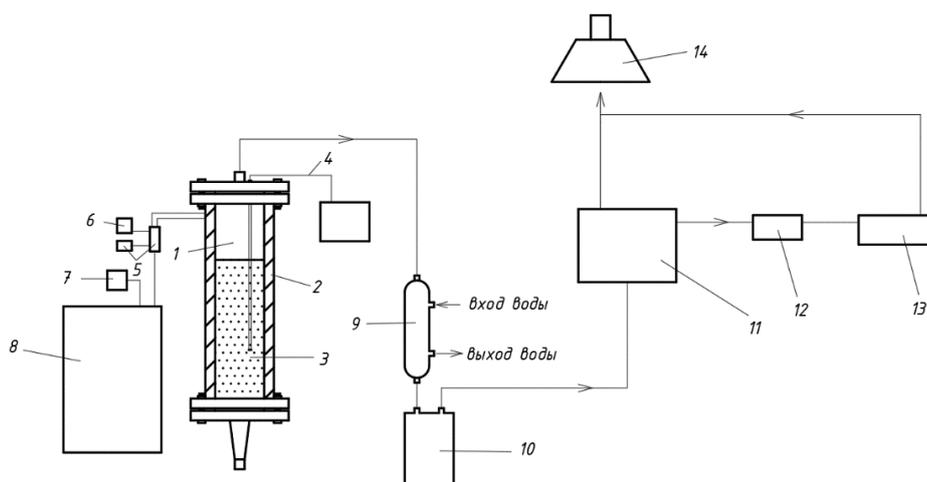
**Таблица 1.** Характеристика исходного сырья  
**Table 1.** Characteristics of the feedstock

Технический анализ (мас. %) Technical analysis (wt %)			Элементный анализ (мас. %, в пересчёте на daf) Elemental analysis (wt %, in terms of daf)					Q (МДж/кг) (MJ/kg)
$W^a$	$A^d$	$V^{daf}$	C	H	N	S	O	
0,9	5,8	65,1	83,5	8,2	0,4	1,2	6,7	27,0

Из табл. 1 видно, что элементный анализ характеризует высокое атомное соотношение Н/С, которое составляет 1,18, низкое содержание азота, достаточно высокое содержание кислорода и серы. Элементный анализ золы показал, что 0,69 (мас. %) серы находится в минеральной части. Оставшаяся часть распределена между тремя фазами: твердым карбонатом после пиролиза, жидкой и газовой фазой.

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Образцы гранулированной резиновой крошки массой 80 г загружали в цилиндрический реактор 1 проточного типа и подвергали нагреву со скоростью 10–12 °С в минуту. Исследуемый процесс протекал в диапазоне температур 350–650 °С, при достижении конечной температуры ее поддерживали на постоянном уровне до завершения выделения летучих веществ. Образующаяся газовая смесь, охлаждалась в теплообменнике 9 и далее поступала в сепаратор-отделитель 10, где разделялась на сконденсированную жидкую фазу и пиролизный газ. С помощью термометра 4 фиксировалась температура внутри реактора, а объём выделяющихся газообразных веществ измерялся барабанным счётчиком 11. Состав газовой фазы, основными компонентами которой являются углеводороды C<sub>1</sub>–C<sub>4</sub> и H<sub>2</sub>, анализировали в объёмных процентах с помощью газоанализатора 13 «Тест-1». Для определения количества газов использовали разницу между 100 % и суммарными процентными выходами жидких и твёрдых продуктов.

Летучие продукты, образующиеся в результате пиролиза шин, можно представить, как область, где происходит движение жидкости с упорядоченным потоком. В условиях ламинарного потока в газовой среде можно вывести уравнения, которые описывают сохранение массы, импульса и энергии [25].



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 – реактор; 2 – изоляция; 3 – фракция резины; 4 – термопара; 5 – регулятор нагрева; 6 – амперметр; 7 – вольтметр; 8 – трансформатор; 9 – теплообменник; 10 – сепаратор-отделитель; 11 – барабанный счётчик; 12 – перистальтический насос; 13 – газоанализатор; 14 – вытяжка

**Fig. 1.** Scheme of the experimental installation: 1 – reactor; 2 – insulation; 3 – tire fraction; 4 – thermocouple; 5 – heating controller; 6 – ammeter; 7 – voltmeter; 8 – transformer; 9 – heat exchanger; 10 – separator; 11 – drum meter; 12 – peristaltic pump; 13 – gas analyzer; 14 – range hood

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{u}) = S_{DPM} + S_{other},$$

$$S_h = \sum H_i \frac{\partial \rho_i}{\partial t} H_i,$$

где  $\rho$  – плотность газовой смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – время, с;  $\vec{u}$  – вектор скорости газовой фазы;  $S_{DPM}$  – массообмен между газовой фазой и частицами резины;  $S_{other}$  – внешний источник массы.

где  $H_i$  – удельная теплота реакции, Дж/кг.

Для обеспечения сохранения материальных балансов твёрдых и газообразных веществ предполагается, что общая масса, поступающая в газовую фазу, равна массе, израсходованной твердой составляющей резиновой крошки.

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = \mu \nabla^2 \vec{u} - \nabla P + \rho \vec{g} + S_\rho,$$

$$S_i = \sum \frac{\partial \rho_i}{\partial t}.$$

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [\vec{u}(\rho C_p T)] = \nabla[\lambda \nabla T] + S_h,$$

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [\vec{u}(\rho Y_i)] = \nabla[\rho D_i \nabla Y_i] + S_i,$$

где  $S_\rho$  – источник импульса, кг/(м<sup>2</sup>·с<sup>2</sup>);  $S_h$  – источник тепла, Вт/м<sup>3</sup>;  $S_i$  – источник массы компонента  $i$  (летучих веществ), кг/м<sup>3</sup>·с;  $\mu$  – динамическая вязкость, Па·с;  $C_p$  – изобарная теплоёмкость, Дж/(кг·К);  $T$  – абсолютная температура, К;  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·К);  $Y_i$  – массовая доля компонента  $i$ ;  $D_i$  – коэффициент диффузии по массе компонента  $i$ , м<sup>2</sup>/с;  $P$  – давление, Па.

Численная модель основана на модели постоянства размера исходной резиновой крошки, представляя собой пористую зону в процессе преобразования части углеводородов в пластическое состояние и затем в газообразное, называемое выходом летучих веществ. При этом часть высокомолекулярных соединений из газовой фазы, разделение которых происходит в сепараторе, при охлаждении переходит в жидкую фазу.

Коэффициент диффузии летучих веществ в газовой фазе был принят и установлен равным 10<sup>-5</sup> м<sup>2</sup>/с на основании рекомендаций других авторов, выполняющих численное моделирование пиролиза изношенных шин.

В пределах пористой зоны использовался баланс импульса с соответствующим исходным термином  $S_\rho$ , основанный на модели Эргуна (Ergun) [29]:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150\mu(1-\varepsilon)^2}{d_p^2 \varepsilon^3} u_{eff} + \frac{1,75\rho(1-\varepsilon)}{d_p \varepsilon^3} u_{eff}^2,$$

Предполагается, что тепло, которое выделяется в ходе каждой реакции в твёрдой фазе, поглощается этой же фазой. Источник тепла можно представить в виде:

где  $\rho$  – плотность газовой смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta p$  – гидравлическое сопротивление, Па;  $L$  – высота слоя резиновой крошки (насыпного слоя), м;  $\mu$  – динамическая вязкость газообразной фазы (летучих ве-

ществ), движущейся через насыпной слой, Па·с;  $\varepsilon$  – порозность насыпного слоя;  $d_p$  – характерный размер частицы насыпного слоя, м;  $u_{eff}$  – эффективная скорость потока через насыпной слой (отнесенная к полному поперечному сечению аппарата).

Подвод тепла на эндотермический процесс пиролиза производится от стенки реактора преимущественно через поровое пространство к поверхности частиц и в меньшей степени – через точки контакта самих частиц. В этой связи температура газовой фазы незначительно выше, чем твердой фазы, и составляет не более 10 °С. Этот результат получен из решения условия третьего граничного рода. Известными экспериментальными величинами являются: температура поверхности резиновой крошки, теплопроводность частиц и коэффициент теплоотдачи для естественной конвекции при движении газа в поровом пространстве засыпки.

Взаимодействие неподвижного пористого слоя резиновой крошки и летучего газа, образуемого в результате пиролиза, описывается граничным условием третьего рода.

$$-\lambda_{sol} \frac{\partial T_{sol}}{\partial l} = \alpha (T_g - T_{sol}),$$

где  $\lambda_{sol}$  – теплопроводность резины, Вт/(м·К);  $T_g$  – температура газа летучих веществ, находящихся в слое, К;  $T_{sol}$  – температура поверхности резиновой крошки, К.

Пиролиз твердого материала осуществляется на границе раздела твердой и газовой фазы. В качестве решения этой сопряженной задачи используются граничные условия четвертого рода для твердого тела резиновой крошки и квази неподвижной газовой среды:

$$\lambda_{sol} \left( \frac{\partial T_{sol}}{\partial n} \right) = \lambda_g \left( \frac{\partial T_g}{\partial n} \right).$$

Значение энергии активации в процессе пиролиза рассчитывалось по дериватограмме резиновой крошки в токе гелия. Кривые термогравиметрического анализа демонстрируют, как изменяется масса вещества (линия ТГ), с какой интенсивностью это происходит (ДТГ) и как изменяется температура (ДТА) при непрерывном нагревании с постоянной скоростью. Из-за того, что на линии ТГ сложно точно определить начало и конец процесса разложения, особенно если реакции происходят последовательно или накладываются друг на друга, этот метод не всегда подходит для анализа [22]. Однако максимумы на кривой ДТГ показывают, где происходит максимальная скорость изменения массы, то есть где температура реакции достигает своего пика. Поэтому кривые ДТГ позволяют наиболее точно определить истинные температуры реакции. Де-

риватограмма резиновой крошки в токе гелия представлена на рис. 2.

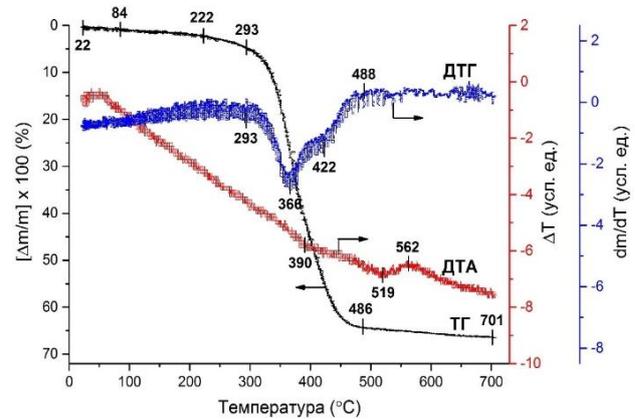


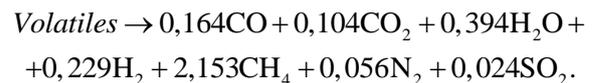
Рис. 2. Дериватограмма резиновой крошки  
 Fig. 2. Rubber crumb thermogram

Зависимость скорости реакции первого порядка от температуры описывается уравнением Аррениуса:

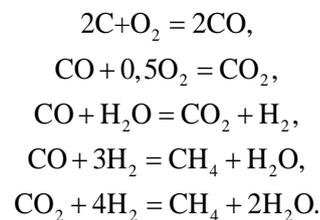
$$k = A \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right),$$

где  $A$  – эмпирическая постоянная (предэкспоненциальный множитель), 1/мин;  $E$  – энергия активации, кДж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, кДж/моль·К;  $T$  – абсолютная температура, К.

Было получено уравнение регрессии для летучих соединений, которые образуются в результате пиролиза.



В разрабатываемой математической модели пиролиза изношенных шин было подключено пять уравнений химических реакций, характерных для углеродосодержащих материалов:



Приведенный выше набор уравнений был решен с использованием метода конечных объемов в комплексе прикладных программ «Ansys».

## Результаты и обсуждение

Чтобы определить, какое количество энергии необходимо для запуска процесса разложения ре-

зиновой крошки при нагревании в температурном диапазоне от 350 до 650 °С, был использован метод Ингрэма–Мариера. Этот метод основан на использовании логарифмической формы кинетического уравнения, которое описывает зависимость скорости потери массы образца от температуры [30].

$$\log \frac{dw}{dT} = \log T - \log a + \log C - \frac{E}{2,303RT},$$

где  $dw/dT$  – потеря массы с единицы площади образца за температурный интервал  $dT$ ;  $T$  – абсолютная температура, К;  $a$  – линейная скорость нагрева образца, К/мин;  $C$  – константа (логарифм частотно-

го множителя);  $E$  – энергия активации, кДж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К).

Значение энергии активации при пиролизе изношенных шин составляет  $E=188,6$  кДж/моль.

В результате решения уравнений по математической модели процесса пиролиза образуются летучие вещества, которые представляют собой сложную смесь, содержащую несколько видов углеводородов. Эта смесь состоит преимущественно из  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ , лёгких и тяжёлых углеводородов (смола). Результаты зависимости выхода летучих веществ от температуры представлены на рис. 3.

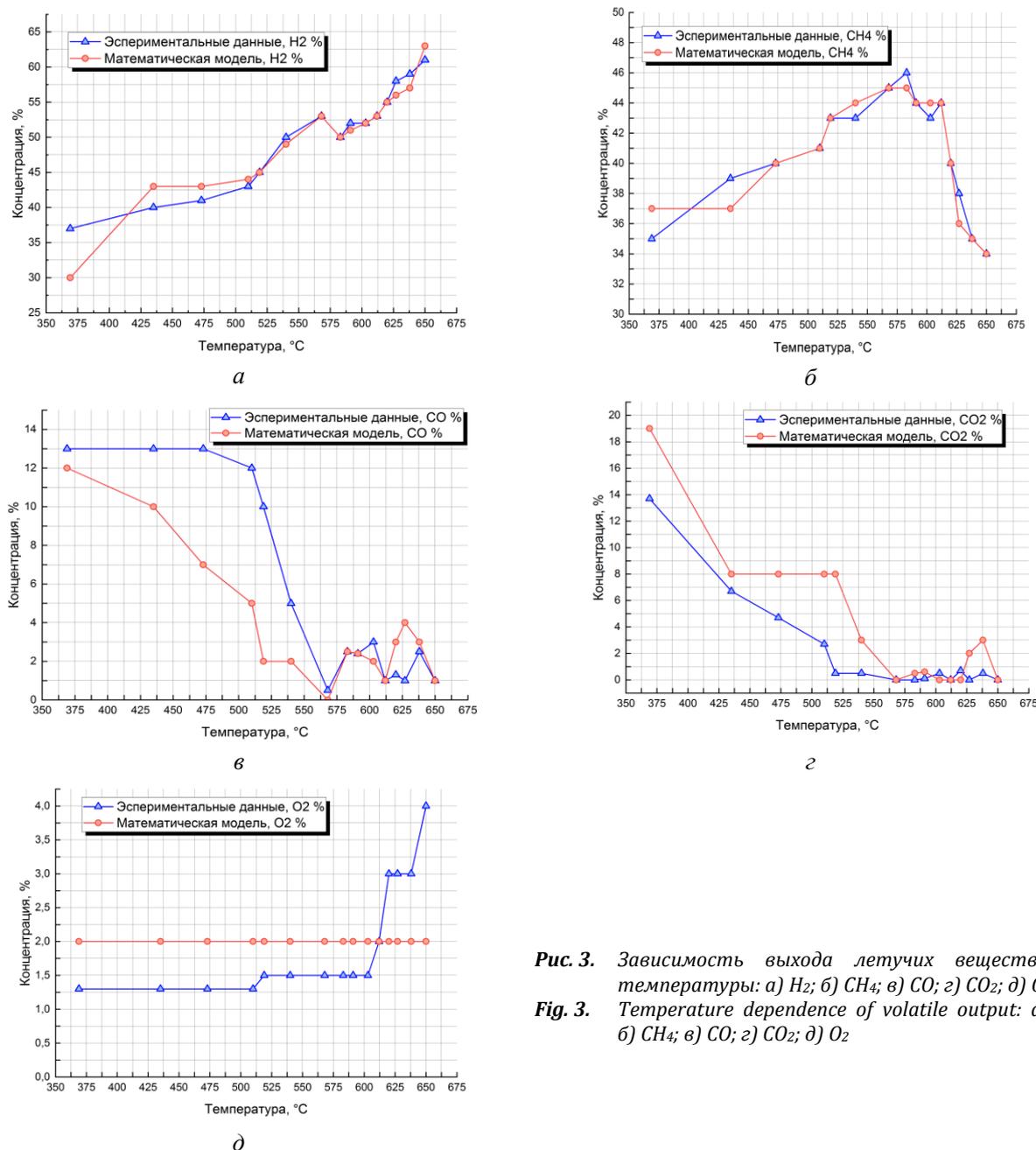


Рис. 3. Зависимость выхода летучих веществ от температуры: а)  $H_2$ ; б)  $CH_4$ ; в)  $CO$ ; г)  $CO_2$ ; д)  $O_2$   
 Fig. 3. Temperature dependence of volatile output: а)  $H_2$ ; б)  $CH_4$ ; в)  $CO$ ; г)  $CO_2$ ; д)  $O_2$

Из табл. 1 видно, что летучие в органической массе резины составляют значительную величину 65,1 (мас. %). Из графиков (рис. 3, *a–d*) видно, что процесс выхода летучих начался при температуре 368 °С. Образование и выход CO и CO<sub>2</sub> составил около 13–14 (об. %), а моделирование показало выход 12 и 19 (об. %), соответственно. С повышением температуры выход CO и CO<sub>2</sub> начал уменьшаться. Выход CO по модели стал снижаться практически сразу после повышения температуры, а по экспериментальным данным оставался на уровне появления и до температуры 475 °С. При этом рост выхода водорода продолжался во всем диапазоне температур процесса пиролиза примерно с 35 до 60 (об. %). Рост выхода метана с 35 (об. %) прекратился на максимуме в 45 (об. %) при температуре 585 °С. Затем следовало снижение выхода метана вплоть до 34 (об. %) при температуре 650 °С. При достижении этой температуры выход водорода и метана поддерживался до прекращения выхода летучих веществ. Стоит отметить, что, согласно экспериментальным данным, дальнейшее увеличение конечной температуры процесса практически не влияет на содержание водорода и метана в газе [28].

Описанные выше процессы с выходом газообразных веществ полученного состава по эксперименту и модели в указанном температурном диапазоне можно пояснить следующими предположениями. Реакция  $2C+O_2=2CO$  происходит при недостатке кислорода. Снижение концентрации образованного CO может происходить по приведенным реакциям в модели. Снижение концентрации углекислого газа, вероятно, объясняется реакцией Сабатье с образованием метана и воды  $CO_2+4H_2=CH_4+2H_2O$ , протекающей при повышенной температуре и в присутствии катализатора. В нашем случае катализатором может выступать минеральная часть, состоящая из оксидов металлов: цинка, железа, алюминия. Из табл. 1 известно, что водорода в массовом выражении имеется значительное количество. Кроме этого, при исчерпании водорода, находящегося в исходном материале, реакция Сабатье затухает. Поэтому, вероятно, при повышении температуры выше 585 °С происходит истощение источника водорода в сырье и снижение образования метана. Отметим, что образовавшийся газообразный водород, выделившийся из сырья, практически не принимает участия в образовании метана. Из [31] известно, что газообразный водород, используемый в качестве донора при ожигении угля, не оказывает влияния на образование жидких продуктов термохимических превращений по сравнению с водорододонорным жидким растворителем.

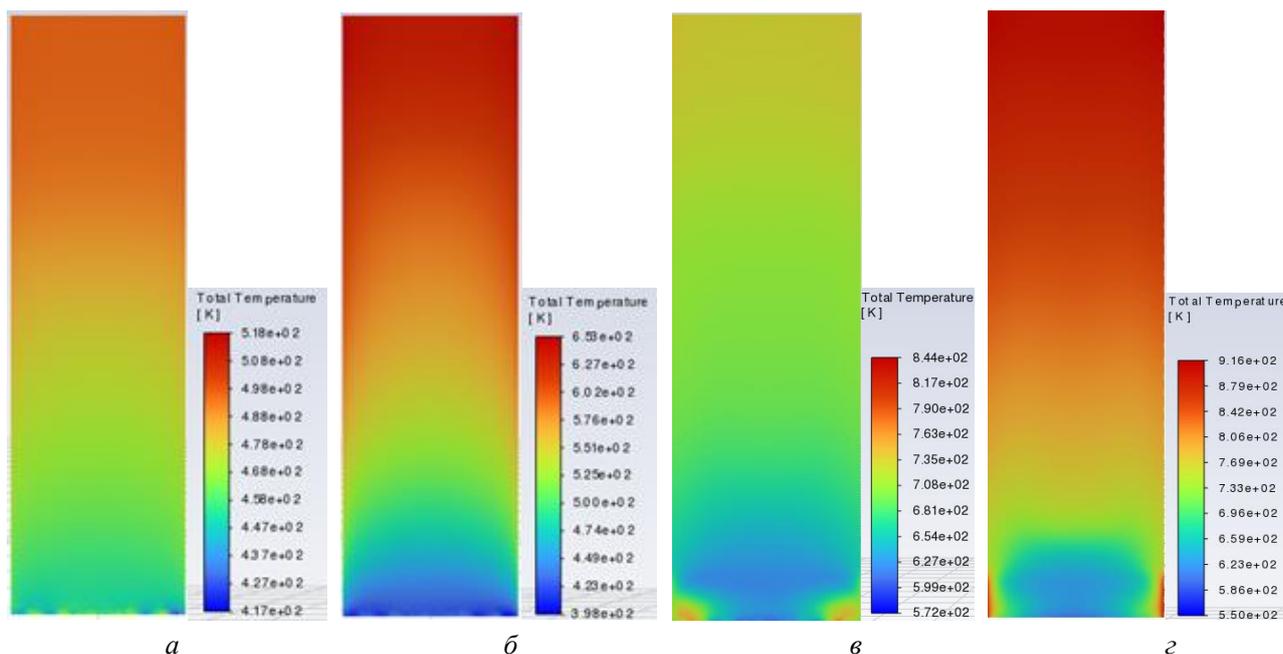
Расхождение расчетных и экспериментальных данных по выходу кислорода (рис. 3, *d*) в диапазоне температур процесса пиролиза от 368 до 600 °С

составляет 0,5–0,7 (об. %) в диапазоне концентраций 1,3 и 2,0 (об. %). Опытные данные показывают, что с повышением температуры процесса пиролиза до 600 °С содержание кислорода на выходе увеличивается. Вероятно, это связано с тем, что процесс образования CO и его переход в CO<sub>2</sub> затухает в результате снижения движущей силы (уменьшение концентрации кислорода) для проведения реакции с образованием оксидов углерода. В этой связи увеличение содержания кислорода в газовой фазе с 1,5 до 4,0 (об. %) оправдано.

Из представленного в работе уравнения регрессии летучих соединений видно, что в результате пиролиза также происходит образование N<sub>2</sub> и SO<sub>2</sub>, что подтверждается данными [31, 32] и содержанием азота и серы в исходном сырье, представленным в табл. 1. В диапазоне температур от 350 до 470 °С модель показывает содержание N<sub>2</sub> и SO<sub>2</sub> на уровне не более 0,1 и 0,15 (об. %) соответственно. При дальнейшем увеличении температуры содержание этих газов снизилось и составляло менее 0,1 (об. %) вплоть до прекращения их выхода при температуре 600 °С. Данные эксперимента также показывают низкое содержание азота и диоксида серы в полученном газе, а основным серосодержащим соединением, который не отражен в модели, является H<sub>2</sub>S с концентрацией 1–1,2 (об. %). Низкое содержание серы и азота в полученном газе можно объяснить невысокой максимальной температурой и скоростью нагрева 10–12 °С в минуту. Основная часть органической серы (до 95 %) по данным [31, 32] содержится в твердом остатке.

Расчитанные численным методом результаты распределения температур по сечению реактора в ходе процесса пиролиза в моменты времени, соответствующие 30, 40, 50 и 65 минутам, представлены на рис. 4.

Температура в зоне расположения резиновой крошки в нижней части составляет: 450, 400, 610 и 650 °С. Во время пиролиза 30 мин. происходит начало перехода органической массы резины из твердого в пластическое состояние. После этого начинается выход летучих веществ, т. е. процесс парообразования, который требует подвода большей энергии в аллотермическом режиме при использовании внешнего подвода за счет электрической энергии, чем при переходе из твердого состояния в жидкое (дополнительное количество теплоты на увеличение объема газовой фазы). В связи с этим температура в процессе выхода летучих веществ снизилась в течение 30–40 мин. из-за недостаточности подвода теплоты. После выхода летучих веществ происходит повышение температуры в слое образовавшегося карбонизата, который реагирует с кислородом, находящимся в резине, с образованием оксидов углерода.

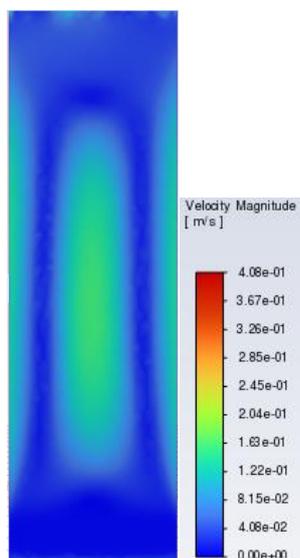


**Рис. 4.** Изображение полей температур в процессе пиролиза в моменты времени: а) 30 мин; б) 40 мин; в) 50 мин; г) 65 мин

**Fig. 4.** Image of temperature fields in the pyrolysis at time points: а) 30 min; б) 40 min; в) 50 min; г) 65 min

Анализ температурных полей показывает, что в верхней части пиролизера были зафиксированы температуры 480, 620, 720 и 880 °С. При скорости движения образовавшихся продуктов пиролиза в условиях аллотермического процесса подвода теплоты газообразные продукты пиролиза резины подвергнуты интенсивному нагреву. При росте выхода газообразных продуктов в интервале между 30 и 40 мин. температура была меньше в верхней части пиролизера, чем в дальнейшее время, когда выход продуктов снижались, а их температура естественно возрастала.

На рис. 5 приведено изменение скорости движения газообразных продуктов в момент 40 мин., что соответствует характерному времени их наибольшего выхода. Поле скоростей показывает, что существует две области различных скоростей движения газообразных продуктов пиролиза. Максимальные скорости движения около 0,1–0,2 м/с сосредоточены в пристенной области подвода теплоты и в центральной части пиролизера. Существует кольцевая, вероятно, закрученный поток с меньшей скоростью 0,04 м/с. Это, вероятно, обусловлено интенсивным газообразованием в пристенной более нагретой области и восходящим потоком в центральной части пиролизера, имеющим наибольший выход газообразных продуктов.



**Рис. 5.** Поле скорости в процессе пиролиза в момент времени 40 мин

**Fig. 5.** Velocity field during pyrolysis at 40 min

### Заключение

В работе получены характеристики процесса пиролиза измельченных в гранулы размером 3 мм использованных автомобильных покрышек в вертикальном цилиндрическом реакторе: состав продуктов, температура в объеме пиролизера и скорость газообразных продуктов в зависимости от времени процесса, на основе численного моделирования. Модель пиролиза включает уравнения сохранения массы, импульса и энергии. Предложена регрессионная зависимость для описания выхода летучих веществ из гранулированных отработанных резинотехнических изделий и содержащихся в газовой фазе. Определено значение энергии активации при пиролизе изношенных шин. Полученные в результате моделирования значения кон-

центраций водорода и метана качественно и количественно согласуются с экспериментальными данными в рассматриваемом температурном диапазоне от 350 до 650 °С. Характер изменения концентраций угарного и углекислого газа показывает снижение при повышении температуры. Средняя величина отклонения от экспериментальных дан-

ных по газам не превышает 15 %. Материальный баланс по содержанию кислорода, полученный в модели, не соответствует опытным данным при температуре более 600 °С, что потребует дальнейшей доработки представленной модели.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гардер А.Д., Богомолов А.Р. Пиролиз как перспективное направление в энергосбережении переработки отходов // Приоритетные направления развития науки и технологий: Труды Международной научно-практической конференции. – Тула, 30 мая 2024. – Тула: Тульский гос. ун-т, 2024. – С. 82–85.
2. Распоряжение Правительства РФ от 25 января 2018 г. № 84-р. – М., 2018. – 59 с.
3. Жежера Н.И. Интенсификация газообмена в крошке изношенных шин при пиролизе переменным давлением. – М.: Креативная экономика, 2011. – 176 с.
4. Fazli A., Rodrigue D. Waste rubber recycling: a review on the evolution and properties of thermoplastic elastomers // *Materials*. – 2020. – Vol. 13 (3). – P. 782. DOI: 10.3390/ma13030782;
5. Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» от 24.06.1998 N 89-ФЗ. – М.: Собрание законодательства Российской Федерации, 1998. – № 26. – 3009 с.
6. Каучук и резина. Наука и технология: монография / под ред. Дж. Марка, Б. Эрмана, Ф. Эйрича / пер. с англ. под ред. А.А. Берлина, Ю.Л. Морозова. – М.: Интеллект, 2011. – 767 с.
7. Goevert D. The value of different recycling technologies for waste rubber tires in the circular economy—a review // *Frontiers in Sustainable*. – 2024. – Vol. 4. DOI: 10.3389/frsus.2023.1282805.
8. Rowhani A., Rainey Th.J. Scrap tyre management pathways and their use as a fuel – a review // *Energies*. – 2016. – Vol. 9. – P. 888. DOI: 10.3390/en9110888.
9. Hoang A.T., Nguyen T.H., Nguyen H.P. Scrap tire pyrolysis as a potential strategy for waste management pathway: a review // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. – 2020. – P. 1–18. DOI: 10.1080/15567036.2020.1745336.
10. Islam M.R., Parveen M. Innovation in pyrolysis technology for management of scrap tire: a solution of energy and environment // *International Journal of Environmental Science and Development*. – 2010. – Vol. 1. – № 1. DOI: 10.7763/IJESD.2010.V1.18.
11. Experimental analysis of temperature influence on waste tire pyrolysis / Z. Cepic, V. Mihajlovic, S. Đurić, M. Stosic // *Energies*. – 2021. – Vol. 14. – P. 5403. DOI: 10.3390/en14175403.
12. Ямпольский Ю.П. Элементарные реакции и механизм пиролиза углеводов. – М.: Химия, 1990. – 212 с.
13. Influence of process variables on oils from tire pyrolysis and hydrolysis in a swept fixed bed reactor / A.M. Mastral, R. Murillo, M.S. Callén, T. García, C.E. Snape // *Energy Fuel*. – 2000. – Vol. 14. – P. 739–744. DOI: 10.1021/ef990183e.
14. Pyrolysis of scrap tyres / I. de Marco Rodriguez, M. Laresgoiti, M. Cabrero, A. Torres, M. Chomón, B. Caballero // *Fuel Processing Technology*. – 2001. – Vol. 72 (1). – P. 9–22. DOI: 10.1016/s0378-3820(01)00174-6.
15. Prabir Basu. Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction. Practical design and theory. – Oxford: Elsevier, 2018. – 551 p.
16. Kaminsky W., Mennerich C., Zhang Z. Feedstock recycling of synthetic and natural rubber by pyrolysis in a fluidized bed // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2009. – Vol. 85 (1–2). – P. 334–337. DOI: 10.1016/j.jaap.2008.11.012.
17. Yan J. Waste biorefineries. Advanced design concepts for integrated waste to energy processes. – Oxford: Elsevier, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2021-0-01133-0>.
18. Recovery of carbon black from waste tire in continuous commercial rotary kiln pyrolysis reactor / J. Xu, J. Yu, W. He, J. Huang, J. Xu, G. Li // *Science of The Total Environment*. – 2021. – 772:145507. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145507.
19. Xue Q., Heindel T.J., Fox R.O. A CFD model for biomass fast pyrolysis in fluidized-bed reactors // *Chemical Engineering Science*. – 2011. – Vol. 66 (11). – P. 2440–2452. DOI: 10.1016/j.ces.2011.03.010.
20. Суханов О.И., Жарфаров Ф.Г., Ишмурзин А.А. Моделирование процесса утилизации отходов // *НефтеГазХимия*. – 2021. – № 3–4. – С. 66–73. DOI: 10.24412/2310-8266-2021-3-4-66-73.
21. A CFD study of biomass pyrolysis in a downer reactor equipped with a novel gas–solid separator-II thermochemical performance and products / X. Yu, M. Hassan, R. Ocone, Y. Makkawi // *Fuel Processing Technology*. – 2015. – Vol. 133. – P. 51–63. DOI: 10.1016/j.fuproc.2015.01.002.
22. Williams P.T., Besler S. Pyrolysis-thermogravimetric analysis of tyres and tyre components // *Fuel*. – 1995. – Vol. 74 (9). – P. 1277–1283. DOI: 10.1016/0016-2361(95)00083-H.
23. Seidelt S., Müller-Hagedorn M., Bockhorn H. Description of tire pyrolysis by thermal degradation behaviour of main components // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2006. – Vol. 75 (1). – P. 11–18. DOI: 10.1016/j.jaap.2005.03.002.
24. Devolatilization characteristics of large particles of tyre rubber under combustion conditions / M. Larsen, L. Schultz, P. Glarborg, L. Skaarupjensen, K. Damjohansen, F. Frandsen // *Fuel*. – 2006. – Vol. 85. – P. 1335–1345. DOI: 10.1016/j.fuel.2005.12.014.
25. Rudniak L., Machniewski P.M. Modelling and experimental investigation of waste tyre pyrolysis process in a laboratory reactor // *Chemical and Process Engineering*. – 2017. – Vol. 38 (3). – P. 445–454. DOI: 10.1515/cpe-2017-0034.
26. Соловьев М.Е., Маркин М.И. Математическое моделирование пиролиза резиновых отходов в горизонтальном цилиндрическом реакторе // *Вестник ИГЭУ*. – 2024. – № 2. – С. 92–99. DOI: 10.17588/2072-2672.2024.2.092-099.
27. Процесс низкотемпературного пиролиза крупногабаритных шин / Н.Д. Вилисов, С.В. Конаков, Т.С. Макеева, К.Ю. Ушаков // *Энергетика и энергосбережение: теория и практика: Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции*. – Кемерово, 8–10 декабря 2021. – Кемерово: КузГТУ имени Т.Ф. Горбачёва, 2021. – С. 126-1–126-6.

28. Пиролиз резиновой крошки, полученной из крупногабаритных шин грузового автотранспорта / С.С. Азиханов, И.Я. Петров, К.Ю. Ушаков, В.З. Горина, А.Р. Богомолов // Журнал прикладной химии. – 2022. – Т. 95. – № 6. – С. 787–802. DOI: 10.31857/S0044461822060123.
29. Ergun S. Fluid flow through packed columns // Chem. Eng. Prog. – 1952. – Vol. 48 (2). – P. 89–94.
30. Ingraham T.R., Marier P. Activation energy calculation from a linearly-increasing-temperature experiment // Can. J. Chem. Eng. – 1964. – Vol. 42. – № 4. – P. 161–163. DOI: 10.1002/cjce.5450420406.
31. Ушаков К.Ю. Процессы переработки низкометаморфизованных барзасских углей в жидкие углеводороды: дис. ... канд. техн. наук. – Кемерово, 2022. – 137 с.
32. Захарян Е.М., Максимов А.Л. Пиролиз шин. Особенности процесса и состав продуктов реакции (обзор) // Журнал прикладной химии. – 2021. – Т. 94. – № 10–11. – С. 1226–1264. DOI: 10.31857/S0044461821100017.

### Информация об авторах

**Александр Дмитриевич Гардер**, аспирант кафедры теплоэнергетики, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачёва, Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. sawa0104@mail.ru

**Александр Романович Богомолов**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплоэнергетики, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачёва, Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28; barom@kuzstu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4746-0106>

Поступила в редакцию: 25.11.2024

Поступила после рецензирования: 11.02.2025

Принята к публикации: 04.09.2025

### REFERENCES

1. Garder A.D., Bogomolov A.R. Pyrolysis as a promising direction in energy saving of waste recycling. Priority directions of science and technology development. *Proc. of the International Scientific and Practical Conference*. Tula, May 30, 2024. Tula, Tula State University Publ., 2024. pp. 82–85. (In Russ.)
2. *Decree of the Government of the Russian Federation dated January 25, 2018 No. 84-r*. Moscow, 2018. 59 p. (In Russ.)
3. Zhezhera N.I. *Intensification of gas exchange in the crumbs of worn tires during pyrolysis by variable pressure*. Moscow, Creative Economy Publ., 2011. 176 p. (In Russ.)
4. Fazli A., Rodrigue D. Waste rubber recycling: a review on the evolution and properties of thermoplastic elastomers. *Materials*, 2020, vol. 13 (3), 782 p. DOI: 10.3390/ma13030782;
5. *Federal Law 89-FZ, dated 24 June 1998, "On Production and Consumption Waste"*. Moscow, Legislation Bulletin of the Russian Federation Publ., 1998. No. 26, 3009 p. (In Russ.)
6. Mark J., Ehrman B., Eyrich F. *Science and technology of rubber: monograph*. Translated from English by A.A. Berlin, Y.L. Morozov. Moscow, Intellect Publ., 2011. 767 p. (In Russ.)
7. Goevert D. The value of different recycling technologies for waste rubber tires in the circular economy – a review. *Frontiers in Sustainable*, 2024, vol. 4. DOI: 10.3389/frsus.2023.1282805
8. Rowhani A., Rainey Th.J. Scrap tyre management pathways and their use as a fuel – a review. *Energies*, 2016, vol. 9, 888 p. DOI: 10.3390/en9110888
9. Hoang A.T., Nguyen T.H., Nguyen H.P. Scrap tire pyrolysis as a potential strategy for waste management pathway: a review. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2020, pp. 1–18. DOI: 10.1080/15567036.2020.1745336
10. Islam M.R., Parveen M. Innovation in pyrolysis technology for management of scrap tire: a solution of energy and environment. *International Journal of Environmental Science and Development*, 2010, vol. 1, no. 1. DOI: 10.7763/IJESD.2010.V1.18
11. Cepic Z., Mihajlovic V., Đurić S., Stosic M. Experimental analysis of temperature influence on waste tire pyrolysis. *Energies*, 2021, vol. 14, 5403 p. DOI: 10.3390/en14175403
12. Yampolsky Yu.P. *Elementary reactions and the mechanism of pyrolysis of hydrocarbons*. Moscow, Khimiya Publ., 1990. 212 p. (In Russ.)
13. Mastral A.M., Murillo R., Callén M.S., García T., Snape C.E. Influence of process variables on oils from tire pyrolysis and hydrolysis in a swept fixed bed reactor. *Energy Fuel*, 2000, vol. 14, pp.739–744. DOI: 10.1021/ef990183e
14. De Marco Rodriguez I., Laresgoiti M., Cabrero M., Torres A., Chomón M., Caballero B. Pyrolysis of scrap tyres. *Fuel Processing Technology*, 2001, vol. 72 (1), pp. 9–22. DOI: 10.1016/s0378-3820(01)00174-6
15. Prabir Basu. *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction. Practical design and theory*. Oxford, Elsevier, 2018. 551 p.
16. Kaminsky W., Mennerich C., Zhang Z. Feedstock recycling of synthetic and natural rubber by pyrolysis in a fluidized bed. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2009, vol. 85 (1–2), pp. 334–337. DOI: 10.1016/j.jaap.2008.11.012
17. Yan J. *Waste biorefineries. Advanced design concepts for integrated waste to energy processes*. Oxford, Elsevier, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2021-0-01133-0>
18. Xu J., Yu J., He W., Huang J., Xu J., Li G. Recovery of carbon black from waste tire in continuous commercial rotary kiln pyrolysis reactor. *Science of The Total Environment*, 2021, 772:145507. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145507
19. Xue Q., Heindel T.J., Fox, R.O. A CFD model for biomass fast pyrolysis in fluidized-bed reactors. *Chemical Engineering Science*, 2011, vol. 66 (11), pp. 2440–2452. DOI: 10.1016/j.ces.2011.03.010
20. Sukhanov O.I., Zhagfarov F.G., Ishmurzin A.A. Modeling of the waste disposal process. *NefteGazoKhimiya*, 2021, no. 3–4, pp. 66–73. (In Russ.) DOI: 10.24412/2310-8266-2021-3-4-66-73

21. Yu X., Hassan M., Ocone R., Makkawi Y. A CFD study of biomass pyrolysis in a downer reactor equipped with a novel gas–solid separator-II thermochemical performance and products. *Fuel Processing Technology*, 2015, vol. 133, pp. 51–63. DOI: 10.1016/j.fuproc.2015.01.002
22. Williams P.T., Besler S. Pyrolysis-thermogravimetric analysis of tyres and tyre components. *Fuel*, 1995, vol. 74 (9), pp. 1277–1283. DOI: 10.1016/0016-2361(95)00083-H
23. Seidelt S., Müller-Hagedorn M., Bockhorn H. Description of tire pyrolysis by thermal degradation behaviour of main components. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2006, vol. 75 (1), pp. 11–18. DOI: 10.1016/j.jaap.2005.03.002
24. Larsen M., Schultz L., Glarborg P., Skaarupjensen L., Damjohansen K., Frandsen F. Devolatilization Characteristics of Large Particles of Tyre Rubber under Combustion Conditions. *Fuel*, 2006, vol. 85, pp. 1335–1345. DOI: 10.1016/j.fuel.2005.12.014
25. Rudniak L., Machniewski P.M. Modelling and experimental investigation of waste tyre pyrolysis process in a laboratory reactor. *Chemical and Process Engineering*, 2017, vol. 38 (3), pp. 445–454. DOI: 10.1515/cpe-2017-0034
26. SOlyovov M.E., Markin M.I. Mathematical modeling of pyrolysis of rubber waste in a horizontal cylindrical reactor. *Bulletin of IGEU*, 2024, no. 2, pp. 92–99. (In Russ.) DOI: 10.17588/2072-2672.2024.2.092-099
27. Vilisov N.D., Konakov S.V., Makeeva T.S., Ushakov K.Yu. The process of low-temperature pyrolysis of oversized tires. *Materials of the VI All-Russian scientific and practical conference. Energy and energy saving: theory and practice*. Kemerovo, December 8–10, 2021. Kemerovo, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University Publ., 2021. pp. 126-1–126-6. (In Russ.)
28. Azikhanov S.S., Petrov I.Ya., Ushakov K.Yu., Gorina V.Z., Bogomolov A.R. Pyrolysis of crumb tire rubber obtained from waste largesized tires of trucks. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2022, vol. 95, no. 6, pp. 787–802. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0044461822060123
29. Ergun S. Fluid flow through packed columns. *Chem. Eng. Prog*, 1952, vol. 48 (2), pp. 89–94.
30. Ingraham T.R., Marier P. Activation energy calculation from a linearly-increasing-temperature experiment. *Can. J. Chem. Eng.*, 1964, vol. 42, no. 4, pp. 161–163. DOI: 10.1002/cjce.5450420406
31. Ushakov K.Yu. *The processes of processing low-metamorphosed Barzas coal into liquid hydrocarbons*. Cand. Diss. Kemerovo, 2022. 137 p. (In Russ.)
32. Zakharyan E.M., Maksimov A.L. Tire pyrolysis. Process features and composition of reaction products (review). *Journal of Applied Chemistry*, 2021, vol. 94, no. 10–11, pp. 1226–1264. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0044461821100017

#### Information about the authors

**Alexander D. Garder**, Postgraduate Student, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennaya street, Kemerovo, 650000, Russian Federation. cawa0104@mail.ru

**Alexander R. Bogomolov**, Dr. Sc., Associate Professor, Head of the Thermal Power Engineering Department, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennaya street, Kemerovo, 650000, Russian Federation; barom@kuzstu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4746-0106>

Received: 25.11.2024

Revised: 11.02.2025

Accepted: 04.09.2025