

УДК 66.092-977:66.011

Михаил Евгеньевич Соловьев

Ярославский государственный технический университет, доктор физико-математических наук, профессор кафедры информационных систем и технологий, Россия, Ярославль, e-mail: me_s@mail.ru

Максим Игоревич Маркин

Ярославский государственный технический университет, старший преподаватель кафедры экономики и управления, Россия, Ярославль, e-mail: markinmi@ystu.ru

Математическое моделирование пиролиза резиновых отходов в горизонтальном цилиндрическом реакторе

Авторское резюме

Состояние вопроса. Переработка амортизированных резиновых изделий представляет собой важную экологическую и технико-экономическую проблему. Среди различных способов переработки таких отходов одним из наиболее эффективных является процесс пиролиза, поскольку позволяет получать топливо и энергию, а также обеспечивает возможность вторичного использования технического углерода и металла. Математическое моделирование данного процесса необходимо для решения задач оптимизации и автоматизированного управления. В связи с этим моделирование процесса пиролиза в горизонтальных цилиндрических реакторах периодического типа, которые в настоящее время получают все большее распространение, является актуальной задачей.

Материалы и методы. Для математического описания процесса используется модель с распределенными параметрами в виде двумерного уравнения теплопроводности и системы уравнений химической кинетики реакций термодеструкции полимера. Решение поставленной задачи осуществляется численно методом конечных элементов.

Результаты. В результате численного решения уравнений математической модели получены нестационарные распределения температуры и степени превращения углеводородов по сечению реактора при неоднородном его заполнении. Исследована кинетика реакции термодеструкции полимера в реакторах разного диаметра.

Выводы. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования кинетики деструкции материала при заданных условиях нагрева реактора, что может быть полезным при конструировании реакторов и автоматизации управления процессом пиролиза.

Ключевые слова: пиролиз резиновых отходов, кинетическая модель, цилиндрический реактор периодического типа, двумерное уравнение теплопроводности, уравнение химической кинетики

Mikhail Evgenievich Soloviev

Yaroslavl State Technical University, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Information Systems and Technologies Department, Russia, Yaroslavl, e-mail: me_s@mail.ru

Maxim Igorevich Markin

Yaroslavl State Technical University, Senior Lecturer of Economics and Management Department, Russia, Yaroslavl, e-mail: markinmi@ystu.ru

Mathematical modeling of pyrolysis of rubber waste in horizontal cylindrical reactor

Abstract

Background. Recycling of cushioned rubber products is an important environmental and technical-economic issue. Among the various methods of processing such waste, one of the most effective is the pyrolysis process, since it allows us to obtain fuel and energy, and provides the possibility of secondary use of carbon black and metal. Mathematical modeling of this process is necessary to solve problems of optimization and automated control. Thus, the purpose of this study is to simulate the pyrolysis process in a horizontal cylindrical batch reactor, which is currently becoming increasingly widespread.

Materials and methods. To mathematically describe the process, a model with distributed parameters is used in the form of a two-dimensional thermal conductivity equation and a system of equations of chemical kinetics of polymer thermal destruction reactions. The problem is solved numerically using the finite element method.

Results. As a result of the numerical solution of the equations of the mathematical model, non-stationary distributions of temperature and degree of conversion over the cross section of the reactor with non-uniform filling have been obtained. The authors have studied the kinetics of the reaction of polymer thermal destruction in reactors of different diameters.

Conclusions. The results obtained can be used to predict the kinetics of material destruction under given reactor heating conditions, which can be useful when we design reactors and automate pyrolysis process control.

Key words: pyrolysis of rubber waste, kinetic model, cylindrical batch reactor, two-dimensional heat equation, chemical kinetics equation

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.2.092-099

Введение. Проблема переработки изношенных шин и других резиновых отходов имеет глобальный характер [1]. Существуют различные способы переработки вторичных резин [2], среди которых пиролиз можно отнести к наиболее энергетически эффективным. Суть данного процесса состоит в нагревании резиновых отходов без доступа воздуха при температурах выше 350 °C [2, 3]. На выходе получается парогазовая смесь углеводородов, которые могут быть разделены на фракции и использованы в качестве топлива [4, 5], а также твердая углеродная фракция, которая после дальнейшей очистки и измельчения может быть переработана в технический углерод и отходы металла [6, 7]. Процесс может быть организован как по периодической, так и по непрерывной схеме [8]. В настоящее время широкое распространение получил вариант конструктивного оформления реактора в виде горизонтального вращающегося цилиндра [9, 10].

К числу преимуществ пиролиза шин можно отнести следующие: 1) экологичность – процесс не сопровождается вредными выбросами, в отличие от сжигания шин; 2) энергетическую эффективность – в отличие от переработки шин методом измельчения данный процесс не только не требует высоких энергозатрат, но и сам является источником тепловой энергии, которая может быть преобразована в электрическую, а также высокоэнергетического топлива; 3) универсальность – процессом пиролиза можно перерабатывать любые резиновые отходы, как твердые, так и жидкие и вязкотекучие; 4) возможность полной автоматизации процесса позволяет снизить влияние человеческого фактора и улучшить эффективность работы.

Математическое моделирование процесса переработки изношенных шин является важным инструментом для оптимизации процесса, прогнозирования результатов, анализа влияния различных факторов и снижения времени и затрат на разработку технологий [11–13]. Особый интерес представляет моделирование процесса пиролиза шин в силу его большей сложности по сравнению с другими способами переработки [14, 15]. Следует отметить, что подходы к математическому описанию процессов пиролиза основываются либо на использовании моделей с сосредоточенными параметрами [14–16], либо на использовании аппарата нейронных сетей [17]. Недостаток этих подходов состоит в том, что для практического использования таких моделей требуются эксперименты непосредственно на производственном оборудовании, поскольку параметры идентификации, полученные в результате экспериментов на лабораторной установке, нельзя в таком случае перенести на производственную установку. При использовании нейронных сетей к этому еще добавляется необходимость подготовки большого объема экспериментальных данных для обучения сети.

Целью настоящего исследования является создание математической модели пиролизного реактора с распределенными параметрами, позволяющей использовать результаты моделирования не только при оптимизации существующего процесса, но и при проектировании нового оборудования с отличающимися от существующего размерами и конструктивными особенностями.

Методы исследования. На рис. 1 приведена упрощенная схема пиролизного реактора. Резиновые отходы загружаются

внутри цилиндрической реторты 1, которая заключена в теплоизолированный кожух 2. В процессе работы реактора реторта обогревается газо-жидкостными горелками, расположенными вдоль оси цилиндра в нижней части реактора (на схеме не показаны). Дымовые газы, проходя между кожухом и внешней поверхностью реторты, выходят через патрубок 3. Разными производителями выпускаются как неподвижные, так и вращающиеся реакторы данного типа. В последнем случае для равномерного распределения тепла по поверхности реторты она укреплена на роликах и приводится во вращение механизмом, расположенным в задней части реактора. Отходы загружаются через люк в передней части реактора, через него же осуществляется выгрузка металлической проволоки, остающейся после пиролиза шин. Продукты пиролиза – парогазовая смесь углеводородов и технический углерод – выгружаются через осевое отверстие в задней части реактора.

Основная часть реторты обогревается достаточно однородно по длине оси цилиндра. С учетом этой цилиндрической симметрии рассмотрим двумерную модель распределения температуры и степени конверсии углеводородного материала резиновых отходов в среднем сечении реактора.

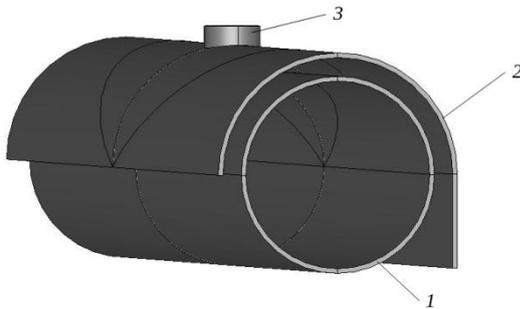


Рис. 1. Схема пиролизного реактора: 1 – реторта; 2 – теплоизолированный от внешней среды кожух; 3 – патрубок для отвода дымовых газов

Расчетная схема среднего сечения реторты в рамках данной модели показана на рис. 2. Область Ω внутри реторты в форме круга заданного диаметра D_r (центр системы координат, связанной с ретортой, совпадает с центром круга) с границей $\partial\Omega$ разбита на сетку треугольных конечных элементов.

Зависимость температуры от времени и координат в рассматриваемой области

$T = T(t, x, y)$ описывается уравнением нестационарной теплопроводности

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) \text{ в области } \Omega \times]0, t_{end}[, \quad (1)$$

где c, ρ, λ – теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности среды соответственно, являющиеся в общем случае функциями координат и времени.

В качестве параметра, характеризующего теплофизические свойства материала, рассматривался коэффициент температуропроводности $a = \frac{\lambda}{c\rho}$.

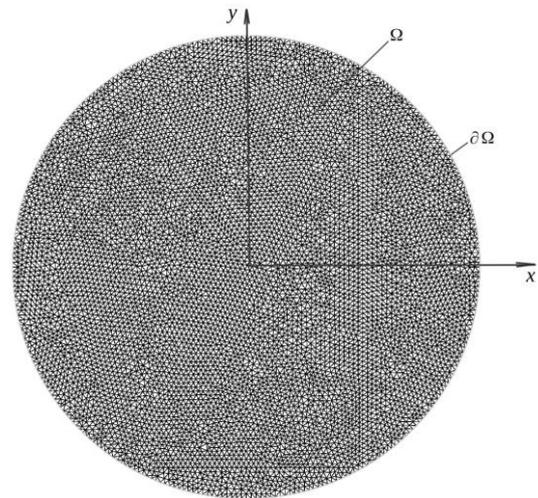


Рис. 2. Расчетная схема среднего сечения реторты

Уравнение (1) дополняется начальными условиями

$$T(0, x, y) = T_0(x, y) \forall \Omega \quad (2)$$

и граничными условиями

$$T(t, x, y) = \mu(t, x, y) \quad (3)$$

на границе $\partial\Omega \times]0, t_{end}[$.

Начальное распределение температуры принималось постоянным и равным температуре окружающей среды T_0 в момент запуска реактора. Функция температуры на границе на основе анализа работы производственного реактора была принята в виде

$$\mu(t) = T_0 + dT_{\max}(1 - \exp(-k_{\mu}t)), \quad (4)$$

где dT_{\max} – максимальное увеличение температуры стенки реактора; k_{μ} – коэффициент скорости увеличения температуры, для которого было принято значение $9 \cdot 10^{-3}$ с.

Загруженный реактор частично заполнен резиновыми отходами, в том числе изношенными шинами легковых и грузовых

машин, заполняющими среднюю часть реактора, а также отходами производства шин (в нижней части реактора). Поскольку коэффициенты температуропроводности парогазовой фракции в верхней части реактора, изношенных шин в средней части реактора и резиновых отходов в нижней части реактора различаются, для коэффициента температуропроводности была принята его зависимость от вертикальной координаты y в форме кусочной функции следующего вида:

$$a(y) = a_0(y \leq (D_r \alpha_0 - D_r / 2)) + \sum_{i=1}^2 a_i(y > (D_r \alpha_{i-1} - D_r / 2)) \wedge (y \leq (D_r \alpha_i - D_r / 2)), \quad (5)$$

где a_i , α_i – коэффициенты температуропроводности, $\text{мм}^2/\text{с}$, и коэффициенты высоты слоев соответственно, для которых были приняты оценки $a_i = [0,12 \cdot 10^{-6}, 0,9 \cdot 10^{-6}, 19,0 \cdot 10^{-6}]$, $\alpha_i = [0,2, 0,6, 1,0]$.

При численном решении для производной температуры по времени принималась разностная аппроксимация с шагом по времени τ , так что задачу (1) можно представить в разностной форме по времени

$$\frac{T^{m+1} - T^m}{\tau} = \nabla(a \nabla T^{m+1}) \text{ в } \Omega \quad (6)$$

с граничными условиями $T^{m+1}(x, y) = \mu^{m+1}$ на границе $\partial\Omega$.

В вариационной постановке эта задача в пространстве $L^2(0, t_{\text{end}}; H^1(\Omega))$ принимает вид

$$\int_{\Omega} \left\{ \frac{T^{m+1} - T^m}{\tau} v + a \nabla T^{m+1} \cdot \nabla v \right\} + \quad (7)$$

$$+ \int_{\partial\Omega} \mu^{m+1} v = 0,$$

где $v \in H^1(\Omega)$ – произвольная функция.

Данную задачу решали методом конечных элементов с триангуляцией области Ω . В результате решение получали в виде конечно-элементной аппроксимации T_h^m функции температуры. На этой сетке решалось уравнение кинетики реакций термомеханической деструкции полимера.

В соответствии с упрощенной моделью пиролиза резин, предложенной в [18], кинетика данного процесса описывается тремя необратимыми реакциями, протекающими в конденсированной фазе. Хотя в результате пиролиза резин образуется более сотни различных химических соединений, выделить их в индивидуальном виде представляется затруднительным, в связи с чем

на практике в производственных установках пиролиза резиновых отходов образующуюся парогазовую смесь путем конденсации разделяют на три фракции углеводородов, различающихся интервалами температур кипения [19]. Таким образом, ход трех брутто-реакций, отвечающих каждой фракции углеводородов, можно представить в виде дифференциальных уравнений формальной кинетики:

$$\frac{d\alpha_i}{dt} = (1 - \alpha_i) A_i \exp(-E_i / RT(t)), \quad (8)$$

где α_i – степень конверсии реагента i -й реакции ($\alpha_i = (m_0 - m)/m_0$, m – масса); A_i , E_i – предэкспоненциальные множители и энергии активации реакций соответственно; R – универсальная газовая постоянная; $T(t)$ – зависимость температуры от времени в соответствующей точке сечения реактора.

Общую зависимость массы деструктируемого полимера от времени в относительных единицах $c(t)$ описывали как взвешенную сумму функций $\alpha_i(t)$ трех групп соединений:

$$c(t) = \sum_i b_i \alpha_i(t), \quad (9)$$

где b_i – относительная доля каждой группы ($\sum_i b_i = 1$).

Параметры реакций были подобраны так, чтобы характер изменения доли оставшегося твердого вещества соответствовал экспериментальным данным, представленным в [20]. В результате были получены оценки параметров, значения которых представлены в таблице.

Оценки кинетических параметров реакций деструкции отходов резины

Номер реакции, i	b_i	$A_i, \text{с}^{-1}$	$E_i, \text{кДж/моль}$
1	0,2	1.0E6	60
2	0,6	1.0E11	150
3	0,2	4.0E16	250

Дифференциальные уравнения кинетики деструкции (8) решали численно методом Рунге-Кутты четвертого порядка на сетке T_h^m функций температуры.

Результаты исследования. На рис. 3, 4 в качестве примера приведены рассчитанные распределения температуры $T(x, y)$ и общей конверсии полимера $c(x, y)$ по сечению реторты после часа прогрева реактора диаметром 0,5 м.



Рис. 3. Распределение температуры по сечению реторты реактора диаметром 0,5 м после часа прогрева

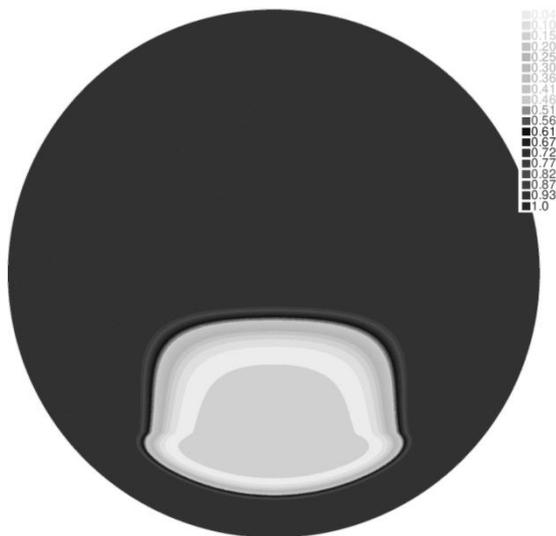


Рис. 4. Распределение степени конверсии полимера по сечению реторты реактора диаметром 0,5 м после часа прогрева

Анализ полученных результатов (рис. 3, 4) показывает, что распределения не симметричны, что является следствием рассмотренного случая неоднородной загрузки реактора, при которой коэффициент температуропроводности несимметрично распределен по сечению реторты в соответствии с формулой (5). Такой способ загрузки используется в производстве, когда в одном реакторе осуществляется переработка разного вида отходов. В случае однородной загрузки реактора данные распределения были бы симметричными относительно оси OZ реторты и для моделирования процесса

достаточно было бы решения одномерной пространственной задачи с учетом цилиндрической симметрии реактора.

На практике размеры пиролизных реакторов достаточно сильно варьируются [21–23]. Так, цилиндрические лабораторные реакторы могут иметь диаметры до 0,2 м, диаметры опытно-промышленных реакторов варьируются в пределах от 0,3 до 1 м, промышленные реакторы имеют диаметры выше 1 м. При этом лабораторные реакторы обычно неподвижные, тогда как опытно-промышленные реакторы могут быть как неподвижными, так и вращающимися.

Представляло интерес оценить влияние диаметра реактора на кинетику реакции деструкции полимерного материала.

На рис. 5 приведены кинетические кривые термодеструкции полимера, рассчитанные для реакторов разных диаметров при одинаковой скорости нагрева с поверхности.

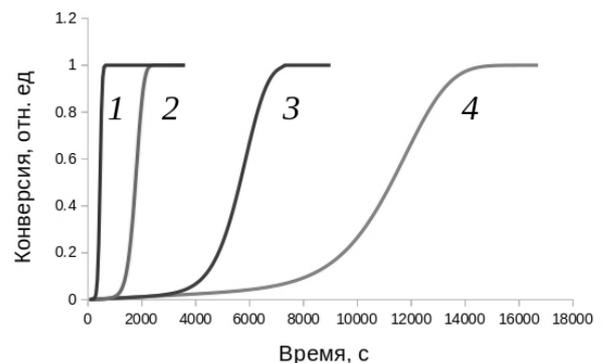


Рис. 5. Зависимость конверсии полимера в центре реактора от времени прогрева в реакторах разных диаметров (м): 1 – 0,2; 2 – 0,5; 3 – 1,0; 4 – 1,5

В реакторе диаметром 0,2 м (лабораторный тип) кинетическая кривая конверсии почти совпадает с кинетической кривой нагрева стенки (4), что позволяет в таких реакторах изучать кинетику реакций деструкции различных полимерных материалов. Однако в реакторах диаметром 0,5 м и выше время прогрева материала становится лимитирующим процессом, так что общее время реакции составляет 6 и более часов, в зависимости от диаметра реактора и степени его загрузки.

Необходимо отметить, что в приведенных расчетах не учитывалось перемещение материала вследствие вращения реактора. В связи с этим полученные результаты в полной мере соответствуют

лишь неподвижным реакторам. Для вращающихся производственных реакторов при полной их загрузке перемешивание не происходит до тех пор, пока не прореагирует около половины материала отходов, вследствие чего появится свободный объем для их относительного перемещения. Анализ кривых конверсии (рис. 5) показывает, что для этого требуется более половины времени реакции. С учетом того что вращение реторты осуществляется достаточно медленно, можно заключить, что в этот период рассмотренная модель будет справедлива. После того как реагирующий материал приобретет достаточную степень свободы для возможного перемешивания, появляется возможность более быстрого перераспределения температуры и ускорения реакции. Данный процесс нами не учитывался, поскольку в этом случае, помимо уравнений теплопроводности и химической кинетики, необходимо решать существенно более сложную задачу механики сыпучего материала (уравнения механики сыпучих сред).

Выводы. Параметры представленной математической модели процесса пиролиза изношенных автомобильных шин и резиновых отходов в горизонтальном цилиндрическом реакторе были выбраны на основе анализа процесса пиролиза в реальном опытно-промышленном реакторе и литературных данных по кинетике деструкции резин. Предложенная математическая модель процесса пиролиза включает уравнение теплопроводности, решаемое численно методом конечных элементов в двумерной постановке, и систему дифференциальных уравнений кинетики пиролиза, решаемую на сеточной функции, описывающей распределение температуры по сечению реактора.

На основе анализа работы реального реактора сделан вывод о том, что предложенная математическая модель описывает первую, лимитирующую стадию его работы, когда процесс внутреннего перемешивания материала за счет вращения реактора отсутствует. На примере решения уравнений модели для реакторов разного диаметра продемонстрировано влияние размеров реактора на длительность реального производственного процесса, определяемую стадией прогрева материала при отсутствии его перемешивания.

Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования кинетики деструкции материала при заданных

условиях нагрева реактора, что может быть полезным при конструировании реакторов и автоматизации управления процессом.

Список литературы

1. **An Overview** of Rubber Recycling / S. Bandyopadhyay, S.L. Agrawal, R. Ameta, et al. // *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*. – 2008. – Vol. 24, No. 2. – P. 73–112. DOI.org/10.1177/147776060802400201.
2. **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, No. 1–2. – P. 334–337. DOI.org/10.1016/j.jaap.2008.11.012.
3. **Waste tyre pyrolysis – Impact of the process and its products on the environment** / D. Czajczyńska, K. Czajka, R. Krzyżyńska, H. Jouhara // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2020. – Vol. 20. – P. 100690. DOI.org/10.1016/j.tsep.2020.100690.
4. **Хожиева Р.Б., Хайитов Р.Р.** Исследование процесса получения углеводородов из резиновых отходов // *Universum: технические науки: электрон. научн. журн.* – 2021. – Вып. 6(87). – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11903>
5. **Чич С.К.** Пиролиз как оптимальный метод утилизации отработанных автомобильных шин // *Новые технологии*. – 2009. – № 3. – С. 23–27.
6. **Папин А.В., Игнатова А.Ю., Макаревич Е.А.** Пути утилизации отработанных автошин и анализ возможности использования технического углерода пиролиза отработанных автошин // *Вестник КузГТУ*. – 2015. – № 2(108). – С. 96–100.
7. **Исследование** физико-химических характеристик твердого остатка пиролиза резинотехнических изделий / О.В. Касьянова, Д.С. Шапранко, Ю.Н. Дудникова, З.Р. Исмагилов // *Вестник КузГТУ*. – 2019. – № 2(132). – С. 101–110.
8. **The Development** of a Waste Tyre Pyrolysis Production Plant Business Model for the Gauteng Region, South Africa / N. Nkosi, E. Muzenda, T.A. Mamvura, et al. // *Processes*. – 2020. – Vol. 8, No. 7. – P. 766–774. DOI.org/10.3390/pr8070766.
9. **Rani S., Agnihotri R.** Recycling of scrap tyres // *International Journal of Materials Science and Applications*. – 2014. – Vol. 3, No. 5. – P. 164–167. DOI.org/10.11648/j.ijmsa.20140305.16.
10. **Opportunities** and barriers for producing high quality fuels from the pyrolysis of scrap tires / I. Hita, M. Arabiourrutia, M. Olazar, et al. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – Vol. 56. – P. 745–759. DOI.org/10.1016/j.rser.2015.11.081.
11. **Демьянова В.С., Камбург В.Г., Дяркин Р.А.** Моделирование процесса утилизации продуктов переработки изношенных автомобильных шин в промышленности строительных материалов // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2012. – № 2/10(56). – С. 50–52.

12. **Гусев А.Д., Петухова Н.А., Карпунин Г.А.** К вопросу переработки изношенных автомобильных шин // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2014. – № 6. – С. 11–14.

13. **Моделирование** процесса переработки изношенных автомобильных шин при их утилизации / И.В. Лучин, И.Н. Кравченко, М.Ю. Конкин, И.А. Золотов // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 6. – С. 20–24.

14. **Собкалов А.В., Пименова М.А., Ивахнюк Г.К.** Математическое моделирование окислительного пиролиза автошин в барабанных печах // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2013. – № 4. – С. 49–58.

15. **Попов С.К., Ванюшкин В.Д., Валинчева А.А.** Моделирование и исследование процесса охлаждения твердых продуктов пиролиза отработанных шин // Вестник МЭИ. – 2020. – № 6. – С. 18–28. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-6-18-28.

16. **Суханов О.И., Жагфаров 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.

17. **Моделирование** процесса пиролиза резин на основе нейросетей / Т.Б. Минигалиев, В.П. Дорожкин, О.А. Коробейникова, С.Н. Гусев // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – № 11. – С. 195–200.

18. **Липанов А.М., Болкисев А.А.** О моделировании термического разложения полибутадиена с учетом образования полимерного каркаса // Химическая физика и мезоскопия. – 2013. – Т. 15, № 2. – С. 236–241.

19. **Моделирование** кинетики термодеструкции резин при пиролизе резиновых отходов / М.Е. Соловьев, В.Ф. Каблов, С.Л. Балдаев, М.О. Федорова // От химии к технологии шаг за шагом. – 2023. – Т. 4, вып. 1. – С. 70–85. – URL: <http://chemintech.ru/index.php/tor/2023-4-1>

20. **Kinetic** study of the effect of the heating rate on the waste tyre pyrolysis to maximise limonene production / N.M. Mkhize, B. Danon, P. van der Gryp, J.F. Görgens // Chemical Engineering Research and Design. – 2019. – Vol. 152. – P. 363–371. DOI.org/10.1016/j.cherd.2019.09.036.

21. **Dick D.T., Agboola O., Ayeni A.O.** Pyrolysis of waste tyre for high-quality fuel products: A review // AIMS Energy. – 2020. – No. 8(5). – P. 869–895. DOI: 10.3934/energy.2020.5.869.

22. **A Review** on the Thermochemical Recycling of Waste Tyres to Oil for Automobile Engine Application / M.I. Jahirul, F.M. Hossain, M.G. Rasul, A.A. Chowdhury // Energies. – 2021. – No. 14(13). – P. 3837. DOI.org/10.3390/en14133837.

23. **Lewandowski W.M., Januszewicz K., Kosakowski W.** Efficiency and proportions of waste tyre pyrolysis products depending on the re-

actor type – A review // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2019. – Vol. 140. – P. 25–53. DOI.org/10.1016/j.jaap.2019.03.018.

References

1. Bandyopadhyay, S., Agrawal, S.L., Ameta, R., Dasgupta, S., Mukhopadhyay, R., Deuri, A.S., Suresh, C. An Overview of Rubber Recycling. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 2008, vol. 24, no. 2, pp. 73–112. DOI.org/10.1177/147776060802400201.

2. 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, no. 1–2, pp. 334–337. DOI.org/10.1016/j.jaap.2008.11.012.

3. Czajczyńska, D., Czajka, K., Krzyżyńska, R., Jouhara, H. Waste tire pyrolysis – Impact of the process and its products on the environment. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, vol. 20, p. 100690. DOI.org/10.1016/j.tsep.2020.100690.

4. Khozhieva, R.B., Khayitov, R.R. Issledovanie protsessa polucheniya uglevodorodov iz rezinovykh otkhodov [Study of the process of obtaining hydrocarbons from rubber waste]. *Universum: tekhnicheskie nauki: elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2021, issue 6(87). Available at: <https://7univerzum.com/ru/tech/archive/item/11903>

5. Chich, S.K. Piroлиз kak optimal'nyy metod utilizatsii otrabotannykh avtomobil'nykh shin [Pyrolysis as an optimal method for recycling waste tires]. *Novye tekhnologii*, 2009, no. 3, pp. 23–27.

6. Papin, A.V., Ignatova, A.Yu., Makarevich, E.A. Puti utilizatsii otrabotannykh avtoshin i analiz vozmozhnosti ispol'zovaniya tekhnicheskogo ugleroda piroliza otrabotannykh avtoshin [Ways of recycling waste tires and analysis of the possibility of using carbon black for pyrolysis of used tires]. *Vestnik KuzGTU*, 2015, no. 2(108), pp. 96–100.

7. Kas'yanova, O.V., Shapranko, D.S., Dudnikova, Yu.N., Ismagilov, Z.R. Issledovanie fiziko-khimicheskikh kharakteristik tverdogo ostatka piroliza rezino-tekhnicheskikh izdeliy [Study of the physico-chemical characteristics of the solid residue of pyrolysis of rubber products]. *Vestnik KuzGTU*, 2019, no. 2(132), pp. 101–110.

8. Nkosi, N., Muzenda, E., Mamvura, T.A., Belaid, M., Patel, B. The Development of a Waste Tire Pyrolysis Production Plant Business Model for the Gauteng Region, South Africa. *Processes*, 2020, vol. 8, no. 7, pp. 766–774. DOI.org/10.3390/pr8070766.

9. Rani, S., Agnihotri, R. Recycling of scrap tires. *International Journal of Materials Science and Applications*, 2014, vol. 3, no. 5, pp. 164–167. DOI.org/10.11648/j.ijmsa.20140305.16.

10. Hita, I., Arabiourrutia, M., Olazar, M., Bilbao, J., Arandes, J.M., Sánchez, P.C. Opportunities and barriers for producing high quality fuels from the pyrolysis of scrap tires. *Renewable and Sustainable*

Energy Reviews, 2016, vol. 56, pp. 745–759. DOI.org/10.1016/j.rser.2015.11.081.

11. Dem'yanova, V.S., Kamburg, V.G., Dyar'kin, R.A. Modelirovanie protsessy utilizatsii produktov pererabotki iznoshennykh avtomobil'nykh shin v promyshlennosti stroitel'nykh materialov [Modeling the process of recycling products from the processing of worn-out tires in the construction materials industry]. *East European Journal of Advanced Technologies*, 2012, no. 2/10(56), pp. 50–52.

12. Gusev, A.D., Petukhova, N.A., Karpukhin, G.A. K voprosu pererabotki iznoshennykh avtomobil'nykh shin [On the issue of recycling worn-out tires]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*, 2014, no. 6, pp. 11–14.

13. Luchin, I.V., Kravchenko, I.N., Konkin, M.Yu., Zolotov, I.A. Modelirovanie protsessy pererabotki iznoshennykh avtomobil'nykh shin pri ikh utilizatsii [Modeling the process of recycling used car tires during their disposal]. *Modern science-intensive technologies*, 2014, no. 6, pp. 20–24.

14. Sobkalov, A.V., Pimenova, M.A., Ivakhnyuk, G.K. Matematicheskoe modelirovanie oksidativnogo piroliza avtoshin v barabannykh pechakh [Mathematical modeling of oxidative pyrolysis of tires in drum furnaces]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii*, 2013, no. 4, pp. 49–58.

15. Popov, S.K., Vanyushkin, V.D., Valineeva, A.A. Modelirovanie i issledovanie protsessy okhlazhdeniya tverdykh produktov piroliza otrabotannykh shin [Modeling and research of the cooling process of solid products of pyrolysis of used tires]. *Vestnik MEI*, 2020, no. 6, pp. 18–28. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-6-18-28.

16. Sukhanov, O.I., Zhagfarov, F.G., Ishmurzin, A.A. Modelirovanie protsessy otkhodov [Modeling the waste disposal process]. *NefteGazoKhimiya*, 2021, no. 3–4, pp. 66–73. DOI: 10.24412/2310-8266-2021-3-4-66-73.

17. Minigaliev, T.B., Dorozhkin, V.P., Korobeynikova, O.A., Gusev, S.N. Modelirovanie

protsessy piroliza rezin na osnove neyrosetey [Modeling the process of rubber pyrolysis based on neural networks]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2010, no. 11, pp. 195–200.

18. Lipanov, A.M., Bolkisev, A.A. O modelirovanii termicheskogo razlozheniya polibutadiena s uchetom obrazovaniya polimernogo karkasa [On modeling the thermal decomposition of polybutadiene taking into account the formation of a polymer framework]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya*, 2013, vol. 15, no. 2, pp. 236–241.

19. Solov'ev, M.E., Kablov, V.F., Baldaev, S.L., Fedorova, M.O. Modelirovanie kinetiki termodestruksii rezin pri pirolize rezinovykh otkhodov [Modeling the kinetics of thermal destruction of rubber during pyrolysis of rubber waste]. *Ot khimii k tekhnologii shag za shagom*, 2023, vol. 4, no. 1, pp. 70–85. Available at: <http://chemintech.ru/index.php/tor/2023-4-1>

20. Mkhize, N.M., Danon, B., van der Gryp, P., Görgens, J.F. Kinetic study of the effect of the heating rate on the waste tire pyrolysis to maximize limonene production. *Chemical Engineering Research and Design*, 2019, vol. 152, pp. 363–371. DOI.org/10.1016/j.cherd.2019.09.036.

21. Dick, D.T., Agboola, O., Ayeni, A.O. Pyrolysis of waste tyre for high-quality fuel products: A review. *AIMS Energy*, 2020, no. 8(5), pp. 869–895. DOI: 10.3934/energy.2020.5.869.

22. Jahirul, M.I., Hossain, F.M., Rasul, M.G., Chowdhury, A.A. A Review on the Thermochemical Recycling of Waste Tyres to Oil for Automobile Engine Application. *Energies*, 2021, no. 14(13), p. 3837. DOI.org/10.3390/en14133837.

23. Lewandowski, W.M., Januszewicz, K., Kosakowski, W. Efficiency and proportions of waste tyre pyrolysis products depending on the reactor type: A review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2019, vol. 140, pp. 25–53. DOI.org/10.1016/j.jaap.2019.03.018.