

# ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА (05.14.04)

УДК 620.9:662.92.001.5

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-6-18-28

## Моделирование и исследование процесса охлаждения твердых продуктов пиролиза отработанных шин

С.К. Попов, В.Д. Ванюшкин, А.А. Валинеева

Ежегодно в мире производится 1,5 млрд автомобильных шин, каждая из которых со временем попадает в поток отходов. Рост объемов отходов шин и ограниченные возможности для захоронения приводят к необходимости разработки методов их утилизации. Представлен обзор работ в области утилизации отходов шин с предложенными вариантами переработки механическими и термохимическими методами. Показан интерес исследователей к пиролизу, как технологии термохимической конверсии отходов шин для производства ценных продуктов: твердой фракции — коксового остатка (технического углерода), жидкой углеводородной фракции (пиролизного масла) и неконденсирующейся газообразной фракции (пиролизного газа). Ряд публикаций ориентирован на повышение потребительских свойств каждой из фракций. Выявлены условия и созданы способы повышения качества коксового остатка до уровня активированного угля.

Охлаждение твердых продуктов пиролиза может стать лимитирующим фактором для работы пиролизной установки. Выгрузка коксового остатка при повышенных температурах с охлаждением на открытом воздухе ведет к выгоранию. Для разработки эффективного теплообменника-охладителя коксового остатка необходимо знание физических свойств этого вещества.

Разработан и реализован метод определения теплопроводности мелкодисперсного коксового остатка, базирующийся на использовании физического и математического моделирования процесса охлаждения.

Проведены эксперименты по исследованию процесса охлаждения слоя коксового остатка на воздухе в диапазоне температур от 500 °С до температуры окружающей среды. Получены зависимости температуры от времени в нескольких точках слоя засыпки. Создана математическая модель измерительной камеры, воспроизводящая условия эксперимента. Посредством изучения модели можно определить теплопроводность коксового остатка, приближающую с удовлетворительной точностью расчетные температурные кривые процесса охлаждения к экспериментальным.

На основе анализов экспериментальных данных выделены два температурных интервала, в каждом из которых найдена линейная зависимость теплопроводности засыпки от температуры. Коэффициенты функций получены посредством минимизации функции отклика при использовании метода Бокса–Уилсона. Достигнутые результаты используются для разработки объектов промышленной теплоэнергетики.

*Ключевые слова:* отходы шин, пиролиз, охлаждение коксового остатка, теплопроводность, математическое и физическое моделирование.

*Для цитирования:* Попов С.К., Ванюшкин В.Д., Валинеева 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.

## Modeling and Studying the Cooling of Waste Tire Solid Pyrolysis Products

S.K. Popov, V.D. Vaniushkin, A.A. Valineeva

Every year, 1.5 billion tires are produced around the world, and each of them eventually falls into the waste stream. The growing volume of waste tires and limited possibilities for their disposal generate the need to develop methods for recycling them. A review of papers addressing the waste tire recycling problem with the use of proposed mechanical and thermochemical processing methods is presented. It is shown that researchers take interest in pyrolysis as a technology for thermochemical conversion of waste tire to produce valuable products: a solid fraction represented by coke residue (carbon black), a liquid hydrocarbon fraction (pyrolysis oil), and non-condensing gaseous fraction (pyrolysis gas). In a number of published papers, focus is placed on improving the consumer properties of each fraction. Conditions under which the coke residue quality can be improved to the level of activated carbon are, and methods for implementing this are developed.

The cooling of solid pyrolysis products can be a limiting factor for the pyrolysis plant operation. Unloading of the coke residue at increased temperatures with outdoor cooling can lead to its burning out. To develop an efficient coke residue cooling heat exchanger, it is necessary to know the physical properties of this substance.

A method for determining the thermal conductivity of fine coke residue based on the use of physical and mathematical modeling of the cooling process has been developed and implemented.

Experiments on studying the coke residue bed cooling process in air in the temperature range from 500 °C to the ambient temperature were carried out. The time dependences of temperature at several points of the bed layer are obtained.

A measuring chamber mathematical model reproducing the experimental conditions is developed. By studying the model, it is possible to determine the coke residue thermal conductivity, which approximates the calculated cooling process temperature curves to those obtained in the experiment with satisfactory accuracy.

Based on the analysis of experimental data, two temperature ranges are identified, and a linear dependence of the bed thermal conductivity on the temperature is found in each of them. The coefficients of these functions are determined by minimizing the response function using the Box–Wilson method. The obtained results are used for the development of industrial thermal power engineering facilities.

*Key words:* waste tires, pyrolysis, coke residue cooling, thermal conductivity, mathematical modeling, physical modeling.

*For citation:* Popov S.K., Vaniushkin V.D., Valineeva A.A. Modeling and Studying the Cooling of Waste Tire Solid Pyrolysis Products. Bulletin of MPEI. 2020;6:18—28. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-6-18-28.

## Введение

Ежегодно в мире производится 1,5 млрд автомобильных шин [1, 2], при этом почти 1,0 млрд из них ежегодно заканчивают свой срок службы, а более 50% выбрасываются на свалки без какой-либо обработки. Последнее представляет собой серьезную проблему, поскольку структура и состав резины делают эти отходы чрезвычайно устойчивыми к биологическому разложению. К 2030 г. количество шин, идущих в отход, достигнет 1,2 млрд в год.

По оценкам Европейской ассоциации производителей шин и резины в 2009 г. было утилизировано 3,2 млн т отходов шин. Коэффициент утилизации составил 96%, из которых 18% были восстановлены или использованы повторно, 38% — переработаны и 40% — использованы для производства энергии [2]. В 2015 г. годовой поток отходов шин в мире составил примерно 17 млн т [3]. Рост объемов отходов шин и ограниченные возможности для захоронения ведут к необходимости разработки различных методов утилизации и переработки.

Согласно правилам Европейского Союза, отходы шин должны быть восстановлены или переработаны [4]. Основные три компонента шин легкового автомобиля — металл (16,5%), текстиль (5,5%) и вулканизированный каучук (78%) [3, 5]. Текстильная и металлическая фракции могут быть отделены механическими методами и переработаны без технических ограничений. Один из возможных вариантов использования отходов шин — включение в состав цемента, расходного для производства бетона [2].

В последнее время растет интерес к процессам термохимической конверсии отходов шин [3]. К числу перспективных термохимических методов переработки относятся окислительная конверсия с использованием различных кислородсодержащих окислителей, а также безокислительная конверсия (пиролиз). Исследован и доведен до промышленной реализации процесс паровой конверсии отходов [6 — 9]. Изучается пиролиз как технология переработки отходов шин для производства ценных продуктов: твердой фракции — коксового остатка (технического углерода), жидкой углеводородной фракции (пиро-

лизного масла) и неконденсирующейся газообразной фракции (пиролизного газа) [3, 6, 10 — 12].

В [13] исследовано влияние температуры на удельные выходы продуктов пиролиза отходов шин, а также проведен сопоставительный анализ вариантов использования коксового остатка: сжигания, газификации (паровая и углекислотная), получения активированного угля как товарного продукта. Показано, что активированный уголь, добытый из отходов шин, сопоставим по удельной поверхности с коммерческим активированным углем.

Изучено влияние температуры пиролиза отходов шин на удельные выходы и состав продуктов [14], в том числе, в среде водорода. Установлено, что температурный диапазон 450...500 °C благоприятен для получения коксового остатка независимо от наличия/отсутствия водорода. Более высокие температуры характерны для выхода жидкой и газообразной фракций.

Рассмотрен двухстадийный процесс каталитического пиролиза отходов шин [15]. Образующийся на первой стадии пиролизный газ пропускается через вторую ступень — каталитический реактор. Проанализировано влияние температур пиролиза и катализа, отношения массы катализатора к массе отходов шин, скорости нагрева на удельный выход пиролизного масла, коксового остатка и пиролизного газа.

Неконденсирующаяся газообразная фракция, образующаяся при пиролизе отходов шин, содержит  $H_2$ , углеводороды  $C_1 — C_6$ , а также  $CO_2$ ,  $CO$  и  $H_2S$ , небольшие количества азотных соединений [1, 4, 16]. В публикации [4] дан обзор исследований по использованию пиролизного газа в качестве топлива с энергосберегающим эффектом. Пиролизный газ обладает высокой теплотворной способностью — около 30...40 МДж/м<sup>3</sup>. Энергии, получаемой при сгорании пиролизного газа, достаточно не только для проведения процесса пиролиза, но и для других применений.

Пиролизное масло, полученное из отходов шин, — химически сложное и содержит алифатические, ароматические, гетероатомные и полярные фракции. По топливным характеристикам оно близко к легкому жидкому топливу и может быть использовано в печах и двигателях [1]. Для повышения его качества, как хими-

ческого сырья, богатого ароматическими углеводородами, либо для производства водорода из отходов шин, применяют катализаторы [1].

Исследовано влияние ряда факторов на параметры жидкой фракции при пиролизе отходов шин в атмосфере азота [17]. Максимальный удельный выход пиролизного масла наблюдался при 500 °С, а при добавлении 5%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и 10%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  содержание серы снизилось на 83,75%. Возможности получения жидкого топлива, близкого по характеристикам к дизельному, и повышения товарной ценности жидкой и твердой фракций продуктов пиролиза приведены в [17 — 21].

Ряд исследований ориентирован на повышение качества коксового остатка с целью получения более качественного технического углерода и активированного угля [1, 22]. В работах [13, 16] показана возможность получения коксового остатка с характеристиками, близкими к коммерческому активированному углю, но содержание золы в коксовом остатке (свыше 11,5%) намного более высокое.

При разработке технологии активации коксового остатка значительное количество работ посвящено производству активированного угля через физическую активацию, что влечет за собой снижение выхода углерода и высокое потребление энергии.

Производство активированного угля путем химической активации с использованием пропитки КОН позволяет отказаться от вторичного нагрева, необходимого для физической активации, повысить показатели энергоэффективности и снизить количество выбросов [22].

Свойства активированного углерода, добытого пиролизом отходов шин при температурах 600...900 °С с химической активацией путем добавки КОН, описаны в [22, 23]. Удельная внутренняя поверхность углерода определена методом BET (Brunauer, Emmett and Teller), а также оценена посредством йодного числа. Установлена эффективность добавки КОН. С ростом температуры пиролиза удельный выход коксового остатка снизился с 26 до 11%, при этом максимум удельной внутренней поверхности (474 м<sup>2</sup>/г) отмечен при 700 °С [23].

Выполнен ряд исследований процесса пиролиза измельченных отходов шин с различными добавками углеродсодержащих материалов [9, 20, 24 — 29], а также других химических соединений [17, 22, 23, 30].

Характеристики коксового остатка, полученного при совместном пиролизе отходов резины и листовых опилок с последующей активацией для получения коммерческого активированного угля, изложены в [31]. Установлено, что после пиролиза и активации полученный углерод характеризуется удельной поверхностью от 600 до 900 м<sup>2</sup>/г, что выше, чем требования к активированному углю согласно стандарту США (American Water Works Association B600 standard).

Наиболее распространенными пиролизными реакторами являются шахтная печь с плотным фильтру-

емым слоем, вращающаяся барабанная печь, реактор с вакуумированием и псевдооживленным (кипящим) слоем [1], шнековый реактор [6 — 9]. В работе [32] предложен вариант реализации пиролиза отходов шин в реакторе с пониженным давлением (ниже 10 кПа) при температуре 480...520 °С.

Выполнен поиск оптимальных условий пиролиза измельченных отходов шин в реакторе с плотным фильтруемым слоем в атмосфере азота [33]. Установлена оптимальная температура процесса (430 °С), при которой удельный выход коксового остатка составил 32,5%, пиролизного масла — 51,0%.

В [34] представлен обзор условий реализации пиролиза отходов шин в реакторах различного типа. При выполнении термогравиметрического анализа установлено, что температура начала термической деградации отходов шин составляет 350 °С, а развитый процесс пиролиза протекает в диапазоне 450...700 °С. Сделан вывод о предпочтительности использования вращающихся барабанных печей, печей с кипящим или подвижным слоем для реализации непрерывного процесса пиролиза.

Охлаждение твердых продуктов пиролиза может стать лимитирующим фактором для работы установки. Выгрузка коксового остатка при повышенных температурах с охлаждением на открытом воздухе может приводить к выгоранию. В экспериментах [35, 36] наблюдалось выгорание слоя коксового остатка в начальной стадии охлаждения не на свободной поверхности слоя, а на глубине до 10 мм.

Для разработки эффективного теплообменника-охлаждителя коксового остатка необходимо знание его физических свойств. Определение плотности и порозности мелкодисперсного коксового остатка реализуется сравнительно несложно [35], удельную теплоемкость принимают равной удельной теплоемкости углерода. Наибольшую проблему составляет определение теплопроводности коксового остатка в температурном диапазоне до 500 °С — температуры выгрузки из пиролизной печи.

В статье приведены результаты разработки и реализации метода определения теплопроводности, сочетающего физический эксперимент, статистическую обработку данных и математическое моделирование с использованием различных программных продуктов.

#### **Физическое моделирование охлаждения коксового остатка**

Физическое моделирование охлаждения твердых продуктов пиролиза выполнено в лаборатории кафедры энергетики высокотемпературной технологии (ЭВТ) НИУ «МЭИ» (г. Москва) на экспериментальном стенде, состоящем из измерительной камеры, туннельной печи и системы измерений, автоматизированного сбора и обработки информации.

Для моделирования условий охлаждения слоя коксового остатка использована измерительная камера —

стальная емкость с установленными термоэлектрическими преобразователями (хромель-алюмелевыми или К-типе (обозначение типа термопары согласно стандарту калибровки ANSI)), заполняемая исследуемым веществом. По высоте слоя высотой 70 мм вблизи осевой вертикальной плоскости размещены три термопары на расстоянии 8, 35 и 60 мм от дна камеры [36].

Экспериментальный стенд оборудован системой автоматизированного сбора и обработки информации в составе модуля ввода-вывода USB-4718-AE компании Advantech™, соединенного с персональным компьютером, и программного обеспечения Advantech Automation™, позволяющего записывать и обрабатывать сигналы до 8 термопарных каналов с различным шагом по времени.

Заполненную коксовым остатком камеру устанавливали в предварительно разогретую туннельную печь, отапливаемую природным газом. Исследуемым материалом служил мелкодисперсный технический углерод, полученный в промышленной установке пиролиза отходов шин при температуре 500 °С.

Процесс нагрева был организован так, чтобы получить приблизительно однородное температурное поле в засыпке со средней температурой в диапазоне 450...600 °С. Процесс охлаждения проходил на открытом воздухе, после извлечения камеры из печи и размещения ее на огнеупорном основании из шамотного легковеса марки ШЛ-0,4. Фиксация температур в охлаждаемом слое длилась не менее 4 часов.

Посредством программного обеспечения Advantech Automation™ файл с результатами измерений в формате Excel формировался каждые 5 с с последующим импортированием в среду Mathcad для анализа.

Результаты одного из экспериментов представлены на рис. 1, 2. Из данных рис. 1, 2 следует, что наиболее интенсивно охлаждается нижний слой засыпки (кривая 3). Средний слой (кривая 1) охлаждается с отставанием по сравнению с верхним и нижним слоями засыпки, поэтому, начиная с 4400 с, температура в точке размещения средней термопары превышает температуру, показываемую верхней термопарой (кривая 2).

Известен ряд экспериментальных методик по определению тепловых свойств твердых тел, основанных на теории регулярного теплового режима [37 — 40].

Согласно [37, 39], необходимыми признаками регулярного теплового режима являются:

- линейная зависимость логарифма избыточной температуры в некоторой точке тела от времени;
- одинаковый угол наклона линейных зависимостей, построенных для двух точек тела.

Анализ графиков на рис. 2 говорит о том, что оба указанных признака регулярного теплового режима наблюдаются для средней и верхней термопар (кривые 1, 2) по истечении 5500 с, когда средняя термопара показывает 260 °С.

На основе представленных данных можно вычислить темп охлаждения  $m_i$  в  $i$ -й точке тела, 1/с:

$$m_i = \frac{\ln(t_i(\tau_1) - t_{oc}) - \ln(t_i(\tau_2) - t_{oc})}{\tau_2 - \tau_1},$$

где  $t_i(\tau_1)$ ,  $t_i(\tau_2)$  — температуры, показываемые  $i$ -й термопарой в моменты времени  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ;  $t_{oc}$  — температура окружающей среды.

Если взять  $\tau_1 = 5500$  с,  $\tau_2 = 9500$  с, то темп охлаждения для средней термопары составит  $m_{\text{сред}} = 4,65 \cdot 10^{-4}$  1/с,

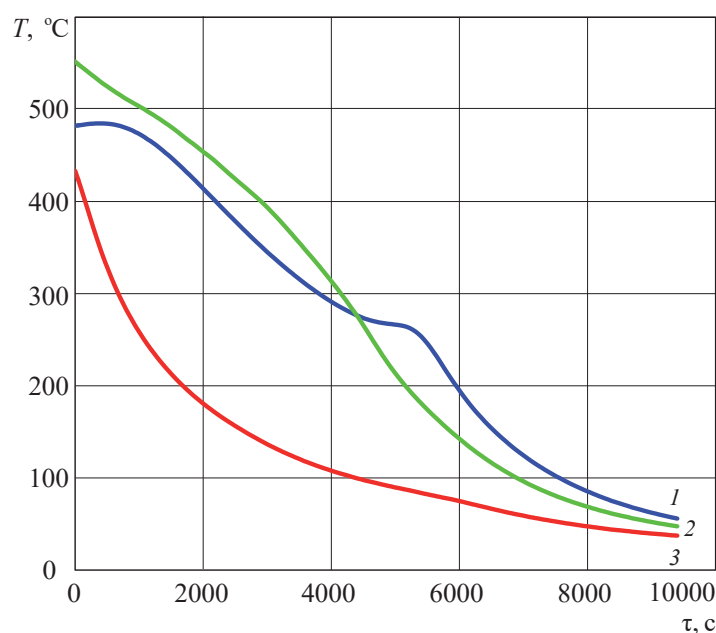


Рис. 1. Временные зависимости температур по слоям исследуемого материала:

1 — 3 — средняя, верхняя и нижняя термопары

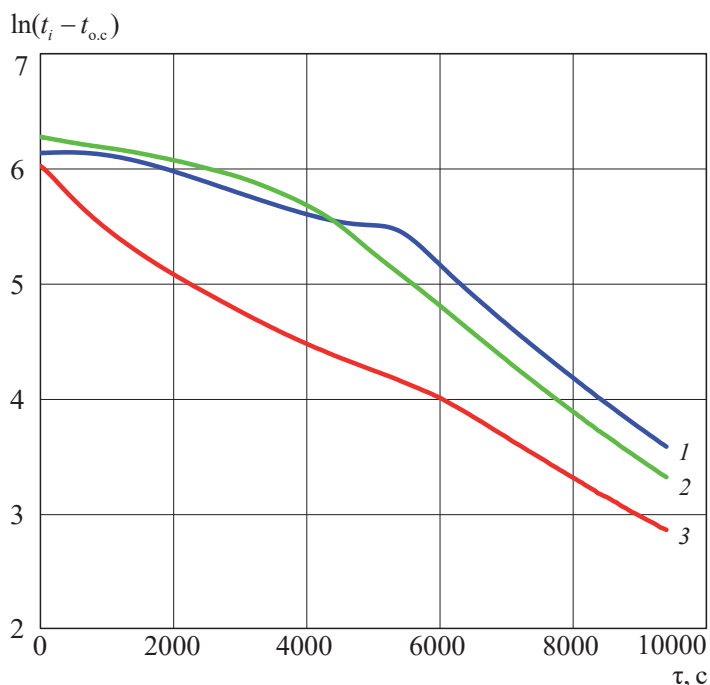


Рис. 2. Временные зависимости для логарифмов избыточных температур:  
1 — 3 — средняя, верхняя и нижняя термопары

а для верхней термопары —  $m_{\text{верх}} = 4,44 \cdot 10^{-4}$  1/с. Различие незначительное — 4,5%, и это позволяет принять гипотезу о равенстве темпов охлаждения в двух точках и заключить, что наблюдаемый режим охлаждения считается регулярным по истечении 5500 с.

Однако в предшествующем высокотемпературном интервале от  $t_{\text{нач}} = 480$  °С до 260 °С режим охлаждения иррегулярный. Следовательно, способы определения теплофизических свойств засыпки, основанные на теории регулярного теплового режима, в указанном температурном диапазоне неприменимы. Между тем, указанный диапазон значителен: он составляет около 50% от общего диапазона охлаждения с  $t_{\text{нач}}$  до  $t_{0,c}$ .

Таким образом, следует использовать другие подходы к определению теплофизических свойств коксового остатка (технического углерода). Перспективным представляется вариант, основанный на сочетании математического моделирования и накопленных экспериментальных данных. Для его реализации разработана математическая модель измерительной камеры, воспроизводящая процесс охлаждения на открытом воздухе.

#### Математическое моделирование условий эксперимента

В эксперименте измерительная камера размерами 120×130×80 мм с прогретой засыпкой высотой 70 мм устанавливается симметрично на огнеупорное основание. В силу симметрии условий теплообмена система имеет две вертикальные плоскости симметрии. Следовательно, в качестве расчетной области можно

рассматривать четверть объема камеры и основания. Таким образом, расчетная область представляет собой два твердых тела — прямоугольных параллелепипеда, установленных друг на друга. Нижний параллелепипед высотой 65 мм — огнеупорное основание, верхний высотой 70 мм — мелкодисперсная засыпка. Нижняя плоскость основания в пределах расчетной области имеет размеры 130×65 мм, нижняя плоскость камеры — 65 мм по оси  $Ox$  и 60 мм — по оси  $Oz$ .

У камеры тонкие стальные стенки и днище, поэтому их толщинами и термическим сопротивлением можно пренебречь. Координаты спаев трех термопар, находящихся в слое засыпки, известны.

В плоскости соприкосновения камеры и основания — идеальный тепловой контакт. В силу симметрии ограждающие поверхности расчетной области, лежащие в плоскостях  $xOy$  и  $yOz$ , — адиабатны. Нижняя поверхность основания также адиабатна. На прочих ограждающих поверхностях, контактирующих с окружающей средой, в том числе на верхней свободной поверхности засыпки, заполняющей камеру, — свободно-конвективный и радиационный теплообмен. Внутренние источники теплоты отсутствуют.

В начальный момент засыпка в камере изотермична и имеет заданную температуру в диапазоне 450...600 °С. Огнеупорное основание также изотермично и обладает температурой окружающей среды.

Теплофизические свойства засыпки и основания (теплопроводность, удельная теплоемкость) могут зависеть от температуры. Таким образом, моделируемый процесс — трехмерная нестационарная теплопрово-

дность в системе «измерительная камера – огнеупорное основание» без внутренних источников теплоты.

Коэффициент суммарной теплоотдачи от стенок камеры в окружающую среду  $\alpha_{o,c}$  (Вт/(м<sup>2</sup>·К)) является суммой коэффициентов конвективной и радиационной теплоотдачи:

$$\alpha_{o,c} = \alpha_{конв} + \alpha_{рад}. \quad (1)$$

Коэффициент радиационной теплоотдачи в (1) определяется уравнением

$$\alpha_{рад} = \sigma_0 \varepsilon_{пов} \frac{T_{пов}^4 - T_{o,c}^4}{T_{пов} - T_{o,c}}, \quad (2)$$

где  $T_{пов}$  — температура излучающей поверхности, К;  $\varepsilon_{пов}$  — коэффициент теплового излучения (степень черноты) излучающей поверхности;  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) — постоянная Стефана–Больцмана;  $T_{o,c} = t_{o,c} + 273$  К.

Для расчета коэффициента конвективной теплоотдачи  $\alpha_{конв}$  требуется определить режим течения воздуха, омывающего стенки измерительной камеры в процессе свободной конвекции. В условиях эксперимента число Рэлея Ra при температуре поверхности камеры  $t_{пов} \in [50, 600]$  °С варьируется в пределах от  $8,82 \cdot 10^5$  до  $1,81 \cdot 10^6$ . Согласно [41], при свободной конвекции в зависимости от геометрии системы смена режима течения с ламинарного на турбулентный происходит в диапазоне  $Ra \in [10^7, 10^9]$ . Следовательно, в эксперименте наблюдаются смешанный, либо ламинарный режимы течения. В разработанной модели для расчета  $\alpha_{конв}$  применена формула

$$Nu = \left( 0,825 + \frac{0,387 Ra^{1/6}}{\left( 1 + (0,492/Pr)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2, \quad (3)$$

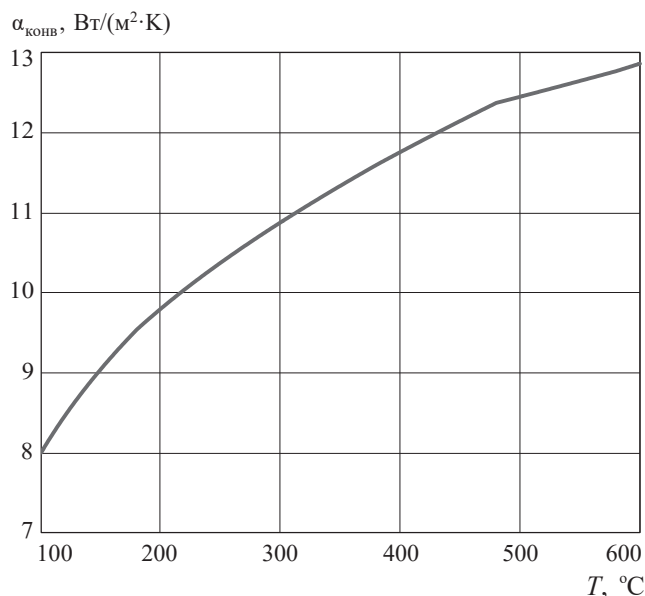


Рис. 3. Зависимость коэффициента конвективной теплоотдачи  $\alpha_{конв}$  от температуры вертикальной стенки

рекомендованная в [42, 43] для значений  $Ra \in [10^4, 10^{13}]$ . Результаты расчетов по соотношениям (1) — (3) изображены на рис. 3, 4.

В анализируемом температурном диапазоне  $\alpha_{конв}$  меняется от 8,0 до 12,9 Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $\alpha_{o,c}$  — от 16,1 до 66,1 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Численное решение трехмерной нестационарной задачи теплопроводности выполнено методом контрольного объема [44, 45]. В итерационном процессе расчета температурных полей использован метод переменных направлений [44]. Программная реализация сделана в Microsoft Visual C++.

Модель позволяет определить изменение во времени температуры засыпки в точках размещения спаев термопар при известных температурных зависимостях теплофизических свойств основания и засыпки — мелкодисперсного коксового остатка с заданной порозностью.

### Расчетно-экспериментальное определение теплопроводности

Разработан и реализован расчетно-экспериментальный метод определения теплопроводности мелкодисперсного коксового остатка, сочетающий экспериментальное исследование процесса охлаждения и его математическое моделирование.

Основная идея метода: используя математическую модель измерительной камеры, установить на основе ее исследования теплопроводность коксового остатка, приближающую с удовлетворительной точностью расчетные температурные кривые процесса охлаждения к экспериментальным во всем диапазоне исследованных температур. Погрешность определения теплопроводности оценивается посредством среднеквадратичного отклонения расчетных температур от эксперименталь-

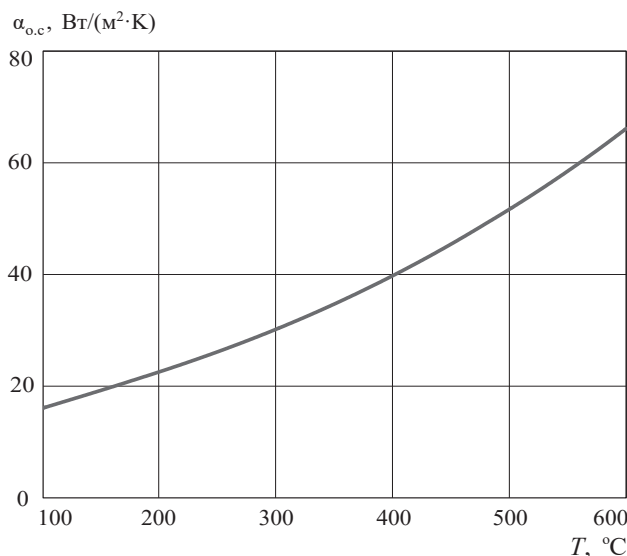


Рис. 4. Зависимость коэффициента суммарной теплоотдачи  $\alpha_{o,c}$  от температуры вертикальной стенки

ных в заданной точке объема коксового остатка за время проведения эксперимента:

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{эксп}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{эксп}}} (t_{\text{эксп}}(i) - t_{\text{расч}}(i))^2}, \quad (4)$$

где  $N_{\text{эксп}}$  — количество точек экспериментального температурного графика, равноотстоящих во времени;  $t_{\text{эксп}}(i)$  — температура в  $i$ -й момент времени, измеренная термопарой, °C;  $t_{\text{расч}}(i)$  — температура в  $i$ -й момент времени в точке размещения термопары, рассчитанная посредством математической модели, °C.

В рамках предложенного подхода решаемая задача может быть отнесена к классу обратных задач теплопроводности [46]. Наиболее близкой по предметной области является задача, изложенная в [47].

Решение обратной задачи теплопроводности состоит в определении теплофизических свойств засыпки (при известных свойствах основания). Она считается решенной, если значения теплофизических свойств засыпки, использованные в модели, обеспечивают минимум  $\Delta$ .

Оценим максимальное значение величины  $\Delta$ . Максимум  $\Delta_{\text{max}}$  наблюдается при нулевой теплопроводности засыпки, в данном случае не охлаждаемой, т. е. в любой момент времени температура в любой ее точке (в том числе и в точке размещения средней термопары) равна начальной температуре  $t_{\text{нач}} = 480$  °C (см. кривая 1, рис. 1). Следовательно, для условий эксперимента получим  $\Delta_{\text{max}} = 257$  °C.

Экспериментальная кривая охлаждения засыпки в точке размещения средней термопары продемонстрирована на рис. 5. Ее характер заметно меняется при переходе через граничную температуру  $t_{\text{гр}} = 270$  °C. Процесс охлаждения ускоряется, т. е. темп охлаждения возрастает. Это дает основание выдвинуть гипотезу, что в материале при  $t_{\text{гр}}$  происходят структурные

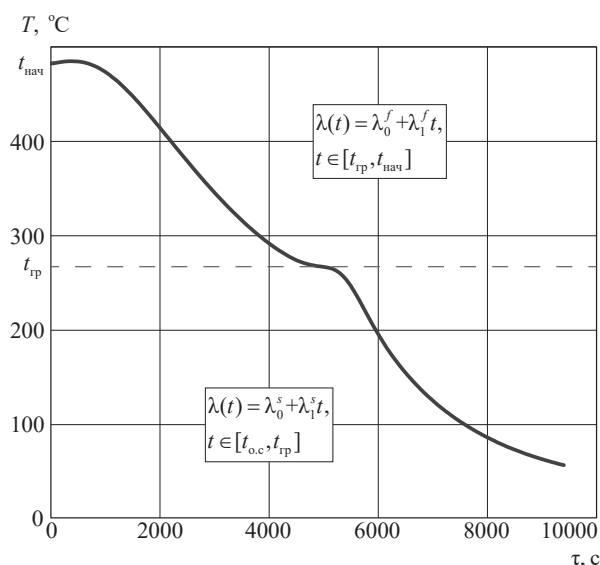


Рис. 5. Характерные участки экспериментальной кривой

превращения, меняющие (повышающие) теплопроводность в области  $t < t_{\text{гр}}$ .

Указанная гипотеза формализуется следующим образом. Температурная зависимость для теплопроводности засыпки описывается совокупностью двух линейных функций в смежных диапазонах температур:

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \lambda_0^f + \lambda_1^f t, & t \in [t_{\text{гр}}, t_{\text{нач}}]; \\ \lambda(t) &= \lambda_0^s + \lambda_1^s t, & t \in [t_{o,c}, t_{\text{гр}}], \end{aligned} \quad (5)$$

где коэффициенты  $\lambda_0^f, \lambda_1^f$  относятся к первому (*first*) температурному диапазону охлаждения от  $t_{\text{нач}}$  до  $t_{\text{гр}}$ , а  $\lambda_0^s, \lambda_1^s$  — ко второму (*second*) диапазону от  $t_{\text{гр}}$  до  $t_{o,c}$  (см. рис. 5). При этом на границе диапазонов при  $t = t_{\text{гр}}$  функция  $\lambda(t)$  неразрывна:

$$\lambda_0^f + \lambda_1^f t_{\text{гр}} = \lambda_0^s + \lambda_1^s t_{\text{гр}}. \quad (6)$$

В уравнения (5) входят четыре неизвестных коэффициента  $\lambda_0^f$ ,  $\lambda_1^f$ ,  $\lambda_0^s$ ,  $\lambda_1^s$ , однако с учетом (6) независимыми являются лишь три. Выберем  $\lambda_0^f$ ,  $\lambda_1^f$ ,  $\lambda_0^s$  в качестве трех искомых независимых коэффициентов и организуем их поиск методами планирования многофакторного эксперимента и реализации «крутого восхождения» посредством математической модели измерительной камеры. Используем полный факторный эксперимент с варьированием каждого из трех факторов на двух уровнях: ПФЭ  $2^3$  [48]. При этом функцией отклика выберем среднеквадратичное отклонение  $\Delta$ , определяемое (4).

Реализация крутого восхождения позволяет достичь снижения функции отклика до уровня  $\Delta_{\min} = 19,45$  °C, что составляет 7,6% от максимума  $\Delta_{\max}$ . Значение минимума достигается при  $\lambda_0^f = 0,062$  Вт/(м·°C),  $\lambda_1^f = 1,683 \cdot 10^{-5}$  Вт/(м·°C<sup>2</sup>),  $\lambda_0^s = 0,065$  Вт/(м·°C).

Графическое представление данных эксперимента для средней термопары и соответствующего расчета по математической модели с найденной функцией теплопроводности засыпки показано на рис. 6.

### Заключение

Разработан и апробирован расчетно-экспериментальный метод определения теплопроводности мелкодисперсных материалов при высоких температурах, основанный на физическом и математическом моделировании.

В результате реализации метода установлены температурные зависимости теплопроводности коксового остатка (технического углерода) — твердого продукта пиролиза отходов автомобильных шин:  $\lambda = 0,065 +$

### Литература

1. Williams P.T. Pyrolysis of Waste Tyres: a Review // Waste Management. 2013. V. 33. No. 8. Pp. 1714—1728.
2. Thomas B., Ramesh C.G. A Comprehensive Review on the Applications of Waste Tire Rubber in Cement Concrete // Renewable and Sustainable Energy Rev. 2016. V. 54. Pp. 1323—1333.
3. Ramirez-Canon A., Muñoz-Camelo Ya.F., Singh P. Decomposition of Used Tyre Rubber by Pyrolysis: Enhancement of the Physical Properties of the Liquid Fraction Using a Hydrogen Stream // Environments. 2018. V. 5. Pp. 72—83.
4. Czajczynska D., Krzyzyska R., Jouhara H., Spencer N. Use of Pyrolytic Gas from Waste Tire as a Fuel: a Review // Energy. 2017. V. 134. Pp. 1121—1131.
5. Evans R., Evans A. The Composition of a Tyre: Typical Components. Banbury: The Waste and Resources Action Programme, 2006.
6. Kalitko V.A. Steam-thermal Recycling of Tire Shreds: Calculation of the Rate of Explosion-Proof Feed of Steam // J. Engineering Phys. and Thermophys. 2008. V. 81. No. 4. Pp. 781—786.
7. Kalitko U. Waste Tire Pyrolysis: Heat-mass Balances & New Engineering Solutions with Steam // J. Solid Waste Techn. and Management. 2012. V. 6. Pp. 1—32.

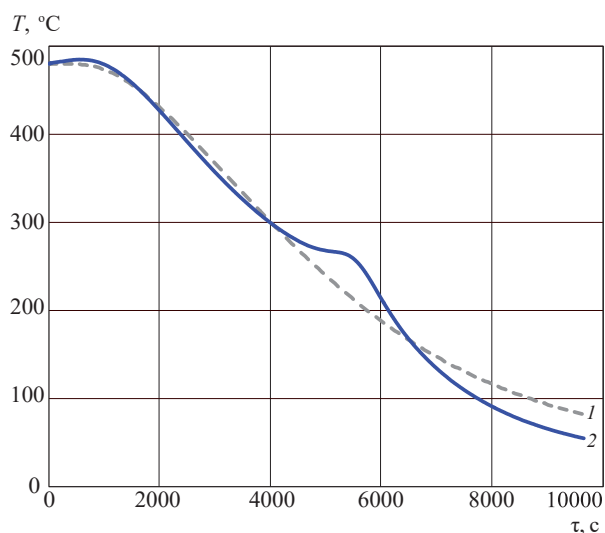


Рис. 6. Сопоставление температурных кривых:

1 — математическая модель; 2 — экспериментальные данные

$+ 0,572 \cdot 10^{-5}t$  — в интервале 60...270 °C;  $\lambda = 0,062 + 1,683 \cdot 10^{-5}t$  — в интервале 270...480 °C. Полученные результаты являются необходимыми исходными данными для создания и исследования математической модели теплообменника-охладителя коксового остатка с целью разработки ресурсосберегающих технических решений.

Созданный метод и поддерживающие его программные средства могут быть использованы при определении теплопроводности других мелкодисперсных материалов в области высоких температур.

### References

1. Williams P.T. Pyrolysis of Waste Tyres: a Review. Waste Management. 2013;3;8:1714—1728.
2. Thomas B., Ramesh C.G. A Comprehensive Review on the Applications of Waste Tire Rubber in Cement Concrete. Renewable and Sustainable Energy Rev. 2016; 54:1323—1333.
3. Ramirez-Canon A., Muñoz-Camelo Ya.F., Singh P. Decomposition of Used Tyre Rubber by Pyrolysis: Enhancement of the Physical Properties of the Liquid Fraction Using a Hydrogen Stream. Environments. 2018;5:72—83.
4. Czajczynska D., Krzyzyska R., Jouhara H., Spencer N. Use of Pyrolytic Gas from Waste Tire as a Fuel: a Review. Energy. 2017;134: 1121—1131.
5. Evans R., Evans A. The Composition of a Tyre: Typical Components. Banbury: The Waste and Resources Action Programme, 2006.
6. Kalitko V.A. Steam-thermal Recycling of Tire Shreds: Calculation of the Rate of Explosion-Proof Feed of Steam. J. Engineering Phys. and Thermophys. 2008;81;4: 781—786.
7. Kalitko U. Waste Tire Pyrolysis: Heat-mass Balances & New Engineering Solutions with Steam. J. Solid Waste Techn. and Management. 2012;6:1—32.



8. **Kalitko U.** Triple-screw Reactor & Jet Venturi Condenser for Scrap Tire Pyrolysis Recycling with Steam. 2013. V. 4. Pp. 1—2.
9. **Kalitko U.** Waste Moving-stirring Bed in Thermal Processing of Auger or Kiln Pyrolysis Reactor: Math Model Engineering Solution for the Effective Cross-Section Charge of Reactors [Электрон. ресурс] [www.researchgate.net/publication/275649560](http://www.researchgate.net/publication/275649560) (дата обращения 17.01.2020).
10. **Castaldi M.J., Kwon E., Weiss B.** Beneficial use of Waste Tires: an Integrated Gasification and Combustion Process Design via Thermogravimetric Analysis (TGA) of Styrene-Butadiene Rubber (SBR) and Polyisoprene (IR) // *Environmental Eng. Sci.* 2007. V. 24. No. 8. Pp. 1160—1178.
11. **Naveed S., Malik A., Ramzan N., Akram M.** A Comparative Study of Gasification of Food Waste (FW), Poultry Waste (PW), Municipal Solid Waste (MSW) and Used Tires (UT) // *Nucleus.* 2009. V. 46. Pp. 77—81.
12. **Kiser J.V.L.** Scrap-tire Pyrolysis: The Impossible Dream? // *Scrap Magazine.* 2002. V. 59. No. 5. Pp. 34—41.
13. **Zabaniotou A.A., Stavropoulos G.** Pyrolysis of Used Automobile Tires and Residual Char Utilization // *J. Analytical & Appl. Pyrolysis.* 2003. V. 70 (2). Pp. 711—722.
14. **Day M., Shen Z., Cooney J.D.** Pyrolysis of Auto Shredder Residue: Experiments with a Laboratory Screw Kiln Reactor // *J. Analytical & Appl. Pyrolysis.* 1999. V. 51 (1—2). Pp. 181—200.
15. **Shen B., Wu C., Wang R., Guo B., Liang C.** Pyrolysis of Scrap Tires with Zeolite USY // *J. Hazardous Materials.* 2006. V. 137. No. 2. Pp. 1065—1073.
16. **Zhang X., Wang T., Chang J.** Vacuum Pyrolysis of Waste Tires with Basic Additives // *Waste Management.* 2008. V. 28. No. 11. Pp. 2301—2310.
17. **Aydın H., İlkılıç C.** Optimization of Fuel Production from Waste Vehicle Tires by Pyrolysis and Resembling to Diesel Fuel by Various Desulfurization Methods // *Fuel.* 2012. V. 102. Pp. 605—612.
18. **Shah J., Jan M.R., Mabood F.** Catalytic Conversion of Waste Tyres into Valuable Hydrocarbons // *J. Polymers and the Environment.* 2007. V. 15. Pp. 207—211.
19. **Murillo R. e. a.** Activation of Pyrolytic Tire Char with CO<sub>2</sub>: Kinetic Study // *J. Analytical and Appl. Pyrolysis.* 2004. V. 71. No. 2. Pp. 945—957.
20. **Murillo R. e. a.** The Application of Thermal Processes to Valorise Waste Tyre // *Fuel Proc. Technol.* 2006. V. 87. No. 2. Pp. 143—147.
21. **Williams P.T., Brindle A.J.** Fluidised Bed Pyrolysis and Catalytic Pyrolysis of Scrap Tyres // *Environmental Technologies.* 2003. V. 24. No. 7. Pp. 921—929.
22. **Teng H., Lin Yu-Chuan, Hsu Li-Yeh.** Production of Activated Carbon from Pyrolysis of Waste Tires Impregnated with Potassium Hydroxide // *J. Air & Waste Management Association.* 2000. V. 50. No. 11. Pp. 1940—1946.
23. **Dinusha I.** Activated Carbon from Waste Tires // *Proc. Eng. Projects and Seminar.* Kandy: University of Peradeniya, 2018.
8. **Kalitko U.** Triple-screw Reactor & Jet Venturi Condenser for Scrap Tire Pyrolysis Recycling with Steam. 2013;4:1—2.
9. **Kalitko U.** Waste Moving-stirring Bed in Thermal Processing of Auger or Kiln Pyrolysis Reactor: Math Model Engineering Solution for the Effective Cross-Section Charge of Reactors [Electron. Resurs] [www.researchgate.net/publication/275649560](http://www.researchgate.net/publication/275649560) (Data Obrashcheniya 17.01.2020).
10. **Castaldi M.J., Kwon E., Weiss B.** Beneficial use of Waste Tires: an Integrated Gasification and Combustion Process Design via Thermogravimetric Analysis (TGA) of Styrene-Butadiene Rubber (SBR) and Polyisoprene (IR). *Environmental Eng. Sci.* 2007;24:8:1160—1178.
11. **Naveed S., Malik A., Ramzan N., Akram M.** A Comparative Study of Gasification of Food Waste (FW), Poultry Waste (PW), Municipal Solid Waste (MSW) and Used Tires (UT). *Nucleus.* 2009;46:77—81.
12. **Kiser J.V.L.** Scrap-tire Pyrolysis: The Impossible Dream? *Scrap Magazine.* 2002;59:5:34—41.
13. **Zabaniotou A.A., Stavropoulos G.** Pyrolysis of Used Automobile Tires and Residual Char Utilization. *J. Analytical & Appl. Pyrolysis.* 2003;70 (2):711—722.
14. **Day M., Shen Z., Cooney J.D.** Pyrolysis of Auto Shredder Residue: Experiments with a Laboratory Screw Kiln Reactor. *J. Analytical & Appl. Pyrolysis.* 1999;51 (1—2):181—200.
15. **Shen B., Wu C., Wang R., Guo B., Liang C.** Pyrolysis of Scrap Tires with Zeolite USY. *J. Hazardous Materials.* 2006;137:2:1065—1073.
16. **Zhang X., Wang T., Chang J.** Vacuum Pyrolysis of Waste Tires with Basic Additives. *Waste Management.* 2008;28:11:2301—2310.
17. **Aydın H., İlkılıç C.** Optimization of Fuel Production from Waste Vehicle Tires by Pyrolysis and Resembling to Diesel Fuel by Various Desulfurization Methods. *Fuel.* 2012;102:605—612.
18. **Shah J., Jan M.R., Mabood F.** Catalytic Conversion of Waste Tyres into Valuable Hydrocarbons. *J. Polymers and the Environment.* 2007;15:207—211.
19. **Murillo R. e. a.** Activation of Pyrolytic Tire Char with CO<sub>2</sub>: Kinetic Study. *J. Analytical and Appl. Pyrolysis.* 2004;71:2:945—957.
20. **Murillo R. e. a.** The Application of Thermal Processes to Valorise Waste Tyre. *Fuel Proc. Technol.* 2006;87:2:143—147.
21. **Williams P.T., Brindle A.J.** Fluidised Bed Pyrolysis and Catalytic Pyrolysis of Scrap Tyres. *Environmental Technologies.* 2003;24:7:921—929.
22. **Teng H., Lin Yu-Chuan, Hsu Li-Yeh.** Production of Activated Carbon from Pyrolysis of Waste Tires Impregnated with Potassium Hydroxide. *J. Air & Waste Management Association.* 2000;50:11:1940—1946.
23. **Dinusha I.** Activated Carbon from Waste Tires. *Proc. Eng. Projects and Seminar.* Kandy: University of Peradeniya, 2018.

24. **Mohan D., Pittman C.U., Steele P.H.** Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: a Critical Review // *Energy Fuels*. 2006. V. 20. No. 3. Pp. 848—889.
25. **Paradela F., Pinto F., Ramos A.M., Gulyurtlu I., Cabrita I.** Study of the slow Batch Pyrolysis of Mixtures of Plastics, Tyres and forestry Biomass Wastes // *J. Analytical and Appl. Pyrolysis*. 2009. V. 85. No. 1—2. Pp. 392—398.
26. **Cao Q., Liu G., Bao W.R., Lu Y.K.** Influence of Co-pyrolysis and Catalysis of Biomass with Waste Tyre on Pyrolytic Oil Properties // *J. Chem. Industry and Eng.* 2007. V. 58. No. 5. Pp. 1283—1289.
27. **Cao Q., Jin L.E., Bao W.R., Lu Y.K.** Investigations into the Characteristics of Oils Produced from Co-pyrolysis of Biomass and Tire // *Fuel Proc. Technol.* 2009. V. 90. No. 3. Pp. 337—342.
28. **Navarro M.V. e. a.** Application of a Particle Model to Pyrolysis. Comparison of Different Feedstock: Plastic, Tyre, Coal and Biomass // *Fuel Proc. Technol.* 2012. V. 103. Pp. 1—8.
29. **Wen-Liang Wang, Jian-Min Chang, Li-Ping Cai, Sheldon Q.Shi.** Quality Improvement of Pyrolysis Oil from Waste Rubber by Adding Sawdust // *Waste Management*. 2014. V. 34. No. 12. Pp. 2603—2610.
30. **Луговой Ю.В.** Кинетика пиролиза полимерного корда в присутствии хлоридов металлов подгруппы железа: дис. ... канд. техн. наук. Иваново: Изд-во Тверского гос. техн. ун-та, 2010.
31. **Geng J. e. a.** Fabrication of Activated Carbon Using Two-step Co-pyrolysis of Used Rubber and Larch Sawdust // *Bioresources*. 2017. V. 12 (4). Pp. 8641—8652.
32. **Roy C., Chaala A., Darmstadt H.** The Vacuum Pyrolysis of Used Tires. End-uses for Oil and Carbon Black Products // *J. Analytical and Appl. Pyrolysis*. 1999. V. 51. Pp. 201—221.
33. **Barbooti M.M., Mohammed Th., Hussain A.A., Abas F.** Optimization of Pyrolysis Conditions of Scrap Tires Under Inert Gas Atmosphere // *J. Analytical and Appl. Pyrolysis*. 2013. V. 4. Pp. 165—170.
34. **Hita I., Arabiourrutia M., Olazar M., Bilbao J., Arandes J.M., Castano P.** Opportunities and Barriers for Producing High Quality Fuels from the Pyrolysis of Scrap Tires // *Renewable and Sustainable Energy Rev.* 2016. V. 56. Pp. 745—759.
35. **Бернадинер П.И., Ванюшкин В.Д., Попов С.К., Свистунов И.Н.** Режимы охлаждения твердых продуктов пиролиза // *Энергосбережение — теория и практика: Труды IX Междунар. школы-семинара молодых ученых и специалистов*. М.: Издат. дом МЭИ, 2018. С. 390—394.
36. **Ванюшкин В.Д., Попов С.К., Свистунов И.Н.** Экспериментальное исследование процесса охлаждения продуктов пиролиза отходов шин // *Инженерно-физический журнал*. 2020. Т. 93. № 2. С. 398—402.
37. **Кондратьев Г.М.** Регулярный тепловой режим. М.: ГИТТЛ, 1954.
38. **Кондратьев Г.М.** Тепловые измерения. М.—Л.: Машгиз, 1957.
24. **Mohan D., Pittman C.U., Steele P.H.** Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: a Critical Review. *Energy Fuels*. 2006;20:3:848—889.
25. **Paradela F., Pinto F., Ramos A.M., Gulyurtlu I., Cabrita I.** Study of the slow Batch Pyrolysis of Mixtures of Plastics, Tyres and forestry Biomass Wastes. *J. Analytical and Appl. Pyrolysis*. 2009;85:1—2:392—398.
26. **Cao Q., Liu G., Bao W.R., Lu Y.K.** Influence of Co-pyrolysis and Catalysis of Biomass with Waste Tyre on Pyrolytic Oil Properties. *J. Chem. Industry and Eng.* 2007;58:5:1283—1289.
27. **Cao Q., Jin L.E., Bao W.R., Lu Y.K.** Investigations into the Characteristics of Oils Produced from Co-pyrolysis of Biomass and Tire. *Fuel Proc. Technol.* 2009;90:3:337—342.
28. **Navarro M.V. e. a.** Application of a Particle Model to Pyrolysis. Comparison of Different Feedstock: Plastic, Tyre, Coal and Biomass. *Fuel Proc. Technol.* 2012;103:1—8.
29. **Wen-Liang Wang, Jian-Min Chang, Li-Ping Cai, Sheldon Q.Shi.** Quality Improvement of Pyrolysis Oil from Waste Rubber by Adding Sawdust. *Waste Management*. 2014;34:12:2603—2610.
30. **Lugovoy Yu.V.** Kinetika Piroлиза Polimernogo Kor-da v Prisutstvii Khloridov Metallov Podgruppy Zheleza: Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. Ivanovo: Izd-vo Tverskogo Gos. Tekhn. Un-ta, 2010. (in Russian).
31. **Geng J. e. a.** Fabrication of Activated Carbon Using Two-step Co-pyrolysis of Used Rubber and Larch Sawdust. *Bioresources*. 2017;12 (4):8641—8652.
32. **Roy C., Chaala A., Darmstadt H.** The Vacuum Pyrolysis of Used Tires. End-uses for Oil and Carbon Black Products. *J. Analytical and Appl. Pyrolysis*. 1999;51:201—221.
33. **Barbooti M.M., Mohammed Th., Hussain A.A., Abas F.** Optimization of Pyrolysis Conditions of Scrap Tires Under Inert Gas Atmosphere. *J. Analytical and Appl. Pyrolysis*. 2013; 4:165—170.
34. **Hita I., Arabiourrutia M., Olazar M., Bilbao J., Arandes J.M., Castano P.** Opportunities and Barriers for Producing High Quality Fuels from the Pyrolysis of Scrap Tires. *Renewable and Sustainable Energy Rev.* 2016;56:745—759.
35. **Bernadiner P.I., Vanyushkin V.D., Popov S.K., Svistunov I.N.** Rezhimy Okhlazhdeniya Tverdykh Produktov Piroлиза. *Energoberezhenie — Teoriya i Praktika: Trudy IX Mezhdunar. Shkoly-seminara Molo-dykh Uchenykh i Spetsialistov*. М.: Izdat. Dom MEI, 2018:390—394. (in Russian).
36. **Vanyushkin V.D., Popov S.K., Svistunov I.N.** Eksperimental'noe Issledovanie Protsesta Okhlazhdeniya Produktov Piroлиза Otkhodov Shin. *Inzhenerno-Fizicheskiy Zhurnal*. 2020;93;2:398—402. (in Russian).
37. **Kondrat'ev G.M.** *Regulyarnyy Teplovoy Rezhim*. М.: GITTL, 1954. (in Russian).
38. **Kondrat'ev G.M.** *Teplovye Izmereniya*. М.—Л.: Mashgiz, 1957. (in Russian).

39. **Костановский А.В.** Регулярный тепловой режим и его приложение для измерения тепловых свойств твердых тел. Нестационарная теплопроводность. М.: Издат. дом МЭИ, 2006.

40. **Жумагулов М.Г.** Разработка тепловых режимов энерготехнологической установки по производству углеродистого теплоносителя: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2010.

41. **Крейт Ф., Блэк У.** Основы теплопередачи. М.: Мир, 1983.

42. **Цветков Ф.Ф., Керимов Р.В., Величко В.И.** Задачник по тепломассообмену. М.: Издат. дом МЭИ, 2010.

43. **Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications.** N.-Y.: McGraw-Hill Education, 2015.

44. **Патанкар С.В.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984.

45. **Патанкар С.В.** Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течи в каналах. М.: Изд-во МЭИ, 2003.

46. **Бек Дж., Дж. Бек, Блакуэлл Б., Сент-Клэр м.л. Ч.** Некорректные обратные задачи теплопроводности. М.: Мир, 1989.

47. **Крылова О.Б., Становой В.И., Буйлов А.А., Пуговкин А.У.** К определению теплофизических свойств насыпной металлической садки // Математическое моделирование процессов в теплотехнических установках: Межвуз. сб. науч. трудов. Иваново: Изд-во ИвГУ, 1986. С. 76—80.

48. **Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976.

39. **Kostanovskiy A.V.** Regulyarnyy Teplovoy Rezhim i Ego Prilozhenie dlya Izmereniya Teplovykh Svoystv Tverdykh Tel. Nestatsionarnaya Teploprovodnost'. M.: Izdat. Dom MEI, 2006. (in Russian).

40. **Zhumagulov M.G.** Razrabotka Teplovykh Rezhimov Energotekhnologicheskoy Ustanovki po Proizvodstvu Uglerodistogo Teplonositelya: Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. Omsk, 2010. (in Russian).

41. **Kreyt F., Blek U.** Osnovy Teploperedachi. M.: Mir, 1983. (in Russian).

42. **Tsvetkov F.F., Kerimov R.V., Velichko V.I.** Zadachnik po Teplomassoobmenu. M.: Izdat. Dom MEI, 2010. (in Russian).

43. **Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications.** N.-Y.: McGraw-Hill Education, 2015.

44. **Patankar S.V.** Chislennyye Metody Resheniya Zadach Teploobmena i Dinamiki Zhidkosti. M.: Energoatomizdat, 1984. (in Russian).

45. **Patankar S.V.** Chislennoe Reshenie Zadach Teploprovodnosti i Konvektivnogo Teploobmena pri Tehenii v Kanalakh. M.: Izd-vo MEI, 2003. (in Russian).

46. **Bek Dzh., Dzh. Bek, Blakuell B., Sent-Kler ml. Ch.** Nekorrektnyye Obratnyye Zadachi Teploprovodnosti. M.: Mir, 1989. (in Russian).

47. **Krylova O.B., Stanovoy V.I., Buylov A.A., Pugovkin A.U.** K Opredeleniyu Teplofizicheskikh Svoystv Nasypnoy Metallicheskoй Sadki. Matematicheskoe Modelirovanie Protssesov v teplotekhnicheskikh Ustanovkakh: Mezhvuz. Sb. Nauch. Trudov. Ivanovo: Izd-vo IvGU, 1986:76—80. (in Russian).

48. **Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskiy Yu.V.** Planirovanie Eksperimenta pri Poiske Optimal'nykh Usloviy. M.: Nauka, 1976. (in Russian).

#### Сведения об авторах:

**Попов Станислав Константинович** — доктор технических наук, профессор кафедры энергетики высокотемпературной технологии НИУ МЭИ, e-mail: PopovSK@mpei.ru

**Ванюшкин Вячеслав Дмитриевич** — старший инженер ООО «Энергоцентр», e-mail: VaniushkinVD@yandex.ru

**Валинеева Анна Александровна** — старший преподаватель кафедры энергетики высокотемпературной технологии НИУ МЭИ, e-mail: nnita@rambler.ru

#### Information about authors:

**Popov Stanislav K.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Energetic of High-Temperature Technologies Dept., NRU MPEI, e-mail: PopovSK@mpei.ru

**Vaniushkin Vyacheslav D.** — Senior Engineer of JSC «Energotsentr», e-mail: VaniushkinVD@yandex.ru

**Valineeva Anna A.** — Senior Lecturer of High-Temperature Technologies Dept., NRU MPEI, e-mail: nnita@rambler.ru

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 17.02.2020

**The article received to the editor:** 17.02.2020