

УДК 662.732  
DOI: 10.36979/1694-500X-2023-23-12-68-78

### НАГРЕВ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ТВЕРДЫМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

*Н.К. Джаманкызов, А.А. Асанов, Б.Т. Мекенбаев,  
Ю.Х. Исманов, Н.Т. Ниязов*

*Аннотация.* Рассматривается нагрев сыпучих материалов твердыми теплоносителями при их смешивании в реакторе-пиролизере для получения полукокса из угля. С помощью упрощенного вида уравнения теплового баланса показано, как определяется количество материала твердого теплоносителя для обеспечения нагрева сыпучих частиц угля до требуемой температуры. Найдены аналитические формулы для температур компонентов смеси в зависимости от времени их движения в реакторе, что позволило определить время наступления равновесного значения температуры в зависимости от их геометрических и теплофизических параметров. Полученные результаты моделирования дают хорошее совпадение с экспериментальными данными. Следовательно, предложенная модель может быть использована при проектировании пиролизных машин и при решении ряда других инженерных задач.

*Ключевые слова:* сыпучие материалы; твердый теплоноситель; полукокс; пиролиз; уголь; температура; теплообмен.

---

### ЧУБУРМА МАТЕРИАЛДАРДЫ КАТУУ ЖЫЛУУЛУК АЛЫП ЖУРҮҮЧҮЛӨР МЕНЕН ЫСЫТУУ

*Н.К. Джаманкызов, А.А. Асанов, Б.Т. Мекенбаев,  
Ю.Х. Исманов, Н.Т. Ниязов*

*Аннотация.* Макалада көмүрдөн жарым кокс алуу үчүн пиролизердик реактордо аралаштырылган катуу жылуулук алып жүрүүчүлөр менен чубурма материалдарды ысытуу каралат. Жылуулук балансы теңдемесинин жөнөкөйлөштүрүлгөн түрүн колдонуу менен көмүрдүн чубурма бөлүкчөлөрүн талап кылынган температурага чейин ысытууну камсыз кылуу үчүн катуу жылуулук алып жүрүүчү материалдын өлчөмү кандайча аныкталганы көрсөтүлгөн. Аралашма компоненттеринин реактордогу кыймылынын убактысына жараша алардын температурасы үчүн аналитикалык формулалар табылды, бул алардын геометриялык жана термофизикалык параметрлерине жараша тең салмактуулук температурасынын маанисинин башталуу убактысын аныктоого мүмкүндүк берди. Алынган моделдештирүү натыйжалары эксперименталдык маалыматтар менен жакшы дал келет. Демек, сунуш кылынган модель пиролиздик машиналарды долбоорлоодо жана башка бир катар инженердик маселелерди чечүүдө колдонулушу мүмкүн.

*Түйүндүү сөздөр:* чубурма материалдар; катуу жылуулук өткөргүч; жарым кокс; пиролиз; көмүр; температура; жылуулук алмашуу.

---

### HEATING OF BULK MATERIALS WITH SOLID HEAT CARRIERS

*N.K. Dzhamankyzov, A.A. Asanov, B.T. Mekenbaev,  
Yu. Kh. Ismanov, N.T. Niyazov*

*Abstract.* The article regards the heating of bulk materials with solid heat carriers during their mixing in a pyrolyzer reactor to obtain semi-coke from coal. Using a simplified form of the heat balance equation, it is shown how the amount of solid coolant material is determined to ensure heating of bulk coal particles to the required temperature. Analytical formulas are found for the temperatures of the mixture components depending on the time of their movement in the reactor, which made it possible to determine the time for the equilibrium temperature of the mixture components to reach, depending on their geometric and thermophysical parameters. The obtained simulation results are in good

agreement with the experimental data. Therefore, the proposed model can be used in the design of pyrolysis machines and in solving a number of other engineering problems.

*Keywords:* bulk materials; solid coolant; char; pyrolysis; coal; temperature; heat exchange.

**Введение.** Кыргызская Республика бедная на нефть и газ, но обладает огромными запасами дешевого местного топлива – угля, общие геологические ресурсы которых оцениваются более чем в 6,4 млрд. тонн. Тем не менее, потребности топливно-энергетического комплекса республики покрываются за счет снижения объемов добычи местного угля и увеличения объемов импорта нефти, природного газа и угля для северных регионов республики [1].

Ограничение использования твердого топлива связывают с большим ущербом окружающей среде от угольной энергетики, транспортными затратами при доставке угля до потребителя, а также качеством бурых углей, характеризующихся низкой калорийностью и высоким содержанием летучих веществ и влаги. Данная ситуация привела к устойчивой ориентации предприятий на использование угля в узком топливном сегменте – только для генерации энергии. Вместе с тем, экономический и технологический потенциал таких углей может быть реализован путем использования их как сырья для получения экологически «чистых» топливных продуктов с повышенными потребительскими свойствами. В этом случае выбросы вредных веществ при использовании таких продуктов из угля в разы ниже, чем в случае прямого их сжигания.

Создание новых, экологически чистых продуктов переработки бурых углей, и вовлечение их потенциала в экономику страны, предопределили необходимость разработки технических систем для их производства. Важная роль в таких системах отводится пиролизным установкам. Применение пиролизных установок с подвижным слоем, в отличие от других технологий, в которых используются аналогичные процессы (сжигание, сушка, обжиг), имеет свою особенность, причем имеющиеся рекомендации по их применению невозможно полностью использовать из-за значительных различий исходных условий, рабочих процессов и требований к конечной продукции. Такая же ситуация с использованием твердых теплоносителей, нашедших применение при производстве жидкого топлива из сланцев [2].

Следует отметить, что в последнее время наблюдается устойчивая тенденция увеличения интереса как к твердым продуктам термической переработки угля, так и к жидким или газообразным. Недостаточная изученность технологии высокоскоростного пиролиза угля является основной причиной ее невостребованности в производстве. Отмеченные обстоятельства определяют актуальность проблемы разработки научно обоснованной теории, расчета и проектирования пиролизных установок со шнековыми напорными органами для скоростного полукоксования углей [1, 2].

В решении указанной проблемы имеются определенные подвижки, тем не менее, потребность в развитии теоретических и прикладных основ создания пиролизных установок для полукоксования углей со шнековыми органами возрастает. Имеющаяся научно-техническая литература не позволяет получить полной информации о параметрах комплексов для полукоксования углей в кипящем слое и твердым теплоносителем, степени их обоснованности, рекомендаций по применению, выбору параметров в зависимости от свойств угля, предъявляемых требований к качеству получаемой продукции, показателям производительности оборудования. Все это послужило основой для проведения исследований пиролиза угля.

Результаты моделирования нагрева дисперсных материалов представлены во многих работах, в том числе в работах [3–8]. Получено много полезных результатов. Например, в [3] на основе уравнения теплового баланса с помощью численного эксперимента установлено, что мелкая фракция сланца (1–7 мм) прогревается в течение 30–60 с и в дальнейшем становится источником тепла для более крупных частиц. При этом в интервале времени 500–600 сек после подачи исходного сланца наступает режим теплового равновесия и происходит последующий процесс низкотемпературной карбонизации в режиме изотермической выдержки. В работе [7] представлена одномерная стационарная численная

модель пиролиза угля твердым теплоносителем в движущемся слое, где показано, что размер частицы существенно влияет на скорость нагрева, а доля шихты является определяющим фактором пиролиза. Автор работы [9], также с помощью численного эксперимента показал, что изменение соотношения материалов или начальной температуры горючего сланца изменяет равновесную температуру и время, необходимое для ее достижения. При этом в работе в качестве теплопередачи учтены механизмы конвективного теплообмена в критериальной форме и межчастичное тепловое излучение. В основе идеи рассмотрения теплопередачи между частицами и жидкостью в пористой среде лежит одночастичный подход, т. е. ситуация рассмотрена для одной частицы. Соответствующие значения масштаба длины и скорости совместно с геометрической функцией достаточны, чтобы сопоставить результаты, полученные для одиночной частицы, с результатами для упаковки [7, 9].

В настоящей работе рассматривается теория нагрева равномерно смешанных смесей мелких частиц бурого угля с нагретыми частицами (зола или другие материалы) теплоносителя, которые перемещаются по длине шнека со скоростью  $u$ .

Целью работы является создание математической модели в приближении, не учитывающем разложение минеральных летучих веществ, получение аналитических выражений, которые дают возможность быстро рассчитать материальные и энергетические потоки, выявить и оценить факторы, влияющие на нагрев, учет которых, в свою очередь, позволит создать требуемую конструкцию оборудования для обеспечения оптимальных режимов работы реактора.

**Расчет температур компонентов смеси.** Рассмотрим процесс нагревания твердого топлива (коксового угля) нагретыми теплоносителями в реакторе-пиролизере шнекового типа. Для выяснения основных закономерностей теплообмена между частицами твердого топлива и теплоносителя воспользуемся моделью идеального вытеснения, в которой каждый элементарный объем движущейся среды рассматривается перемещающимся вдоль оси реактора, который, в свою очередь, рассматривается как замкнутая система. Будем считать, что на входе в шнековый реактор происходит мгновенное и равномерное смешение частиц топлива и теплоносителя (это предположение оправдано ввиду наличия шнекового смешительного устройства в реакторе).

Рассмотрим некоторый объем  $dV$  произвольного слоя, заполненного частицами теплоносителя и угля, который движется вдоль оси пиролизера со скоростью  $u$ . Известно, что в дисперсной среде межчастичное пространство заполнено воздухом и его доля –  $\varepsilon$  определяется выражением:

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_s}{V_t}, \quad (1)$$

где  $V_s = V_1 + V_2$  – суммарный объем твердых частиц теплоносителя и угля, имеющих форму сферы, соответственно, а  $V_t$  – общий объем. Здесь и в дальнейшем индексом «1» обозначаются все величины, относящиеся к горячему теплоносителю, а индексом «2» – к холодному топливу или углю.

Если

$$b = V_1 / V_2 \quad (2)$$

представляет собой объемное отношение частиц теплоносителя к частице топлива, т. е. угля, то в этом случае в оставшейся части движущегося объема  $dV$  частицы теплоносителя занимают долю объема –  $b/(1+b)$ , а частицы угля долю, равную  $1/(1+b)$ . Тогда выражения для поверхностей вышеуказанных частиц в единице объема  $dV$  с учетом воздушных пор

$$a_1 = \frac{6(1-\varepsilon)}{d_1}, \quad a_2 = \frac{6(1-\varepsilon)}{d_2}, \quad \left( \frac{m^2}{m^3} \right)$$

и площадь поверхностей частиц обоих видов в движущем слое, можно записать в следующем виде:

$$S_1 = a_1 \frac{b}{1+b}, \quad S_2 = a_2 \frac{1}{1+b}, \quad \left( \frac{M^2}{M^3} \right). \quad (3)$$

В соотношениях (3) учтена сферическая форма исследуемых частиц обоих видов,  $d_1$  и  $d_2$  – диаметры частиц теплоносителя и угля соответственно.

При этих допущениях рассмотрим некоторый элементарный объем  $dV$  смеси, в котором происходит теплообменный процесс низкотемпературного коксования. При известной (требуемой) мощности реактора по топливу можно написать уравнение теплового баланса, позволяющее находить нужное количество (расход) теплоносителя, достаточное для нагрева топлива до заданной температуры. В первом приближении теплоту разложения органического вещества не будем учитывать, предположив, что степень разложения такого вещества при начальном нагреве минимальна. Тогда уравнение теплового баланса, описывающее теплообмен между частицей теплоносителя и частицей угля, имеет вид:

$$(1 - \varepsilon) \frac{b}{1+b} M_1 c_1 (T_1(\varepsilon) - T_{1,0}) + (1 - \varepsilon) \frac{1}{1+b} M_2 c_2 (T_2(\varepsilon) - T_{2,0}) = 0, \quad (4)$$

где  $M_1, c_1, M_2, c_2$  – массовый расход (кг/с), теплоемкость частиц теплоносителя и топлива ( $M_2$  – требуемый массовый расход топлива для рассматриваемого реактора) соответственно:  $T_{1,0}, T_{2,0}, T_1(\tau), T_2(\tau)$  – начальные и конечные значения в зависимости от времени  $\tau$  температуры теплоносителя и топлива.

Из соотношения (4) видно, что на начальном этапе остывающие частицы теплоносителя и нагревающиеся частицы топлива имеют различные значения температуры, т. е.  $T_1(\tau) \neq T_2(\tau)$ . Через некоторое время, при  $\tau = \tau_0$ , их температуры выравниваются и в системе устанавливается равновесное значение температуры:  $\theta(\tau_0) = T_1(\tau_0) = T_2(\tau_0)$ . В этом случае уравнение (4) преобразуется к виду:

$$b M_1 c_1 (\theta(\tau_0) - T_{1,0}) + M_2 c_2 (\theta(\tau_0) - T_{2,0}) = 0. \quad (5)$$

При  $\tau > \tau_0$  процесс в смеси происходит в изотермическом режиме. Выражение (5) позволяет находить долю горячих частиц теплоносителя, которая необходима для того, чтобы нагреть частицы топлива до наступления равновесной температуры смеси:

$$n = b \frac{M_1}{M_2} = \frac{V_1}{V_2} \frac{M_1}{M_2} = \frac{c_2 (\theta(\tau_0) - T_{2,0})}{c_1 (T_{1,0} - \theta(\tau_0))}. \quad (6)$$

Следовательно, при известном расходе материала топлива  $M_2$  и при учете характеристик рассматриваемого реактора, можно определить расход материала теплоносителя, необходимый для доведения температуры смеси до ее равновесного значения  $M_1 = n M_2 / b$ .

Например, при смешивании керамических (шамотных) шариков с температурой  $T_{1,0} = 600$  °С и теплоемкостью  $0,88$  кДж/(кг·К) с частицами угля с температурой  $20$  °С и теплоемкостью  $1$  кДж/(кг·К), для достижения равновесной температуры  $\theta(\tau_0) = 500$  °С требуется, согласно (6), частиц теплоносителя в шесть раз больше,  $n \approx 6,02$ , чем частиц топлива. Для стальных шариков с теплоемкостью  $c_1 = 0,409$  кДж/(кг·К) число  $n$  станет еще больше,  $n \approx 13$ . Если в качестве частиц теплоносителя взять нагретую золу сланца, то, согласно (6), получим  $n \approx 5,3$ , т. е. доля частиц теплоносителя уменьшается. Из сказанного видно, что выгодней всего в качестве теплоносителя брать частицы

материала с теплоемкостью  $c_1 > c_2$  или тот же материал, который нагревают, поскольку в этом случае  $c_2 = c_1$ . Поэтому на практике часто нагрев мелкодисперсных углей осуществляется нагретой золой этого же сорта угля. Следствием такого выбора является увеличение количества обрабатываемых топливных материалов в пиролизере, поскольку в этом случае уменьшается расход массы теплоносителя. Для этого случая, согласно (6), требуемая доля теплоносителя легко определяется через отношение разностей соответствующих температур.

Далее рассмотрим уравнение теплового баланса для диапазона времени  $0 \leq \tau \leq \tau_0$ , которое можно записать в следующем виде:

$$\beta(T_1(\tau) - \theta) + (T_2(\tau) - \theta) = 0, \quad (7)$$

где  $\beta = \frac{b M_1 c_1}{M_2 c_2}$ .

Однако уравнение (7) не вносит никакого вклада в выяснение физической сущности процесса переноса теплоты в исследуемом объеме смеси. Поэтому для переноса тепла от горячей частицы теплоносителя к частицам топлива требуется еще одно уравнение, учитывающее все механизмы теплопередачи и имеющее вид:

$$\frac{(1 - \varepsilon)}{1 + b} \rho_2 V_2 c_2 dT_2 = \alpha_{эф} S_2 (T_1(\tau) - T_2(\tau)) d\tau. \quad (8)$$

Здесь  $\rho_2$  – плотность частиц топлива;  $\alpha_{эф}$  – суммарный коэффициент теплоотдачи. Как видно из (8), непременным условием возникновения теплового потока является наличие разности температур между частицами в смеси, под действием которой происходит перенос тепла. Количество передаваемого тепла определяется суммарной величиной теплоотдачи за промежуток времени, в течение которого градиент температур падает до нуля, и площадью поверхности частиц топлива в рассматриваемом объеме смеси.

Различают три элементарных вида теплообмена: теплопроводность, конвекцию и лучистый теплообмен. Однако в дисперсной среде теплопередача не ограничивается одной теплопроводностью, как в сплошных средах, а складывается из следующих, одновременно действующих процессов: а) теплопроводность от одной твердой частицы к соседней в местах их непосредственного контакта – контактная теплопередача –  $\alpha_k$ ; б) молекулярная теплопроводность в среде, заполняющей промежутки между частицами –  $\alpha_m$ ; в) излучение от частицы к частице –  $\alpha_u$ ; г) конвекция газа и влаги, содержащихся между частицами. Рассмотрим роль всех механизмов теплопередачи и установим те пределы, в которых пренебрежение ими оказывается закономерным.

Механизм (а): частицы топлива-угля окружены соседними частицами теплоносителя в пиролизере с подвижным слоем. Площадь контакта между двумя сферическими частицами (теплоносителя и топлива) в движущемся слое зависит от размера частиц, деформации при нагреве, рабочих параметров и т. д. [7, 8]. Следует отметить, что диаметр контакта  $d_{pa}$  между углем и частицей теплоносителя рассчитать сложно. Предложение Лыкова [10] дает ориентир для оценки диаметра контакта, а именно  $d_2 = 0,2 d_1$ . Исходя из этого, отношение площади контакта к площади поверхности угля можно рассчитать и выразить как  $R_{ac}$ . Для каждой расчетной единицы объема в движущемся слое площадь поверхности теплоносителя и топлива-угля может быть приблизительно описана выражением (3).

Кондуктивный (т. е. через теплопроводность) теплообмен между частицами теплоносителя и топлива-угля определяется уравнением [7]:

$$\alpha_k = \frac{2k_1k_2}{k_1 + k_2} (1 - R_{12}) \frac{1}{d_1 + d_2}, \quad (12)$$

где теплопроводность между частицами теплоносителя и частицами угля определяется из выражения:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}} = \frac{k_1k_2}{k_1 + k_2}.$$

Механизм (б): теплопередача в основном осуществляется посредством теплового движения, т. е. теплопроводностью воздушного слоя, заполняющего свободный объем между частицами. Коэффициент теплообмена с молекулярной теплопроводностью воздуха –  $\lambda_g$  и с учетом межчастичных пор имеет вид:

$$\alpha_m = \frac{\lambda_g}{d_2} Nu \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}, \quad (13)$$

где  $Nu$  – число Нуссельта.

Механизм (в): радиационный теплообмен между поверхностями частиц теплоносителя и угольных частиц зависит от разницы температур.

В пиролизере с подвижным слоем, где разница температур велика, преобладающим механизмом теплопередачи является излучение.

Коэффициент теплоотдачи радиационного теплообмена при переносе теплоты посредством излучения между частицами теплоносителя и топлива-угля можно представить в виде:

$$\alpha_u = \gamma\sigma(1 - R_{12}) \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \frac{T_1^4 - T_2^4}{T_1 - T_2}, \quad (14)$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – постоянная Стефана–Больцмана;  $\gamma$  – степень черноты, определяемая экспериментально.

Механизм (г): естественная конвекция, возникающая в слое материала под действием температурного градиента, который обусловлен различием в плотности воздуха, заполняющего промежутки между частицами смеси. Характерной особенностью этого теплообмена является то, что перенос тепла сопровождается и перемещением самого воздуха. Несмотря на большую сложность теоретического рассмотрения естественной конвекции, после ряда допущений установлено [8], что: а) количество тепла, передаваемого посредством теплопередачи, линейно зависит от радиуса частицы; б) конвекционный ток в мелкозернистой среде практически отсутствует, в) естественная конвекция начинает проявляться в межчастичном пространстве размером более 10 мм, но максимально возможный процент этого вида теплообмена в общей теплопередаче составляет 5,5 % [8]. Поскольку в данной работе исследуются мелкозернистые материалы, то вклад конвективного теплообмена можно считать пренебрежительно малым.

Вынужденная конвекция возникает под действием посторонних факторов. Как правило, скорость потока при вынужденном движении значительно больше, чем при свободном, поэтому интенсивность теплоотдачи в этом случае будет выше. Однако в рассматриваемой задаче отсутствует вынуждающая причина, вызывающая движение газа, а значит необходимость ее учета тоже отпадает.

Таким образом, выражение для эффективного коэффициента теплоотдачи будет иметь вид:

$$\alpha_{\text{эф}} = \left( \frac{2k_1k_2}{k_1 + k_2} \frac{1}{d_1 + d_2} + \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \gamma\sigma \frac{T_1^4 - T_2^4}{T_1 - T_2} \right) (1 - R_{12}) + \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \frac{\lambda_g}{d_2} Nu. \quad (15)$$



Поскольку в (8) температуры частиц смеси изменяются до их равновесного значения –  $\theta$ , то разность температур, если представить ее в виде  $T_1(\tau) - T_2(\tau) = T_1(\tau) - \theta + \theta - T_2(\tau)$  и используя (7) и (3), после несложных преобразований уравнение (8) запишем в виде:

$$\frac{dT_2}{\theta - T_2(\tau)} = -\frac{\alpha_{эф}}{\rho_2 c_2 d_2} d\tau. \quad (16)$$

Интегрируя это уравнение от  $T_{2,0}$  до  $\theta$ , находим время  $\tau_0$  – момент времени, при котором в смеси установится равновесное значение температуры:

$$\tau_0 = \frac{\rho_2 c_2 d_2}{\alpha_{эф}} \ln(\theta - T_{2,0}). \quad (17)$$

Время  $\tau_0$  является одним из ключевых параметров в исследованиях при выборе и оптимизации параметров пиролизных машин, производящих полукокс. Важность этого параметра заключается в том, что её величина определяется сортом исследуемого угля ( $\rho_2 c_2$ ), зависит от диаметра размола и начальной температуры угля, от механизмов передачи тепла в дисперсной среде. Знание этих зависимостей позволяет правильно подготовить исходный материал, регулировать параметры пиролизера, такие как длина барабанного реактора, время пребывания смеси в реакторе и т. д., что обеспечивает требуемый выход готовой продукции – полукокса. Из выражения (17) видно, что чем меньше диаметр размола угля, тем быстрее достигается равновесие температур между частицами в смеси. В зависимости от того, чему равна начальная температура угля (уголь прогрет, или его температура равна комнатной) меняется и зависимость  $\tau_0$  от температуры, которая в общем случае представляет собой логарифмическую функцию. Наконец, изменение коэффициентов теплопередачи также приводит к изменению времени достижения равновесного значения температуры  $\tau_0$ , так как, чем больше количество перенесенного тепла, тем быстрее достигается равновесие.

На практике часто требуется знание зависимости температуры частиц топлива и теплоносителя от времени. В случае нагрева, интегрирование выражения (16) в пределах от  $T_{2,0}$  до текущего значения  $T_2(\tau)$  приводит к соотношению:

$$T_2(\tau) = \theta - (\theta - T_{2,0}) e^{-\frac{\alpha_{эф}}{\rho_2 c_2 d_2} \tau}. \quad (18)$$

Аналогичным образом, для случая остывания частиц теплоносителя, получаем:

$$T_1(\tau) = \theta + (T_{1,0} - \theta) e^{-\frac{\alpha_{эф}}{\rho_1 c_1 d_1} \tau}. \quad (19)$$

На рисунке 1 приведен график зависимости температур частиц теплоносителя и топлива от времени, полученный согласно формулам (18) и (19) при следующих значениях исходных параметров:  $d_1 = 0,005$  м;  $k_1 = 0,29$  Вт/(м·К);  $c_1 = 840$  Дж/(кг·К);  $T_{1,0} = 973$  К;  $\rho_1 = 1550$  кг/м<sup>3</sup>;  $d_2 = 0,001$ ;  $k_2 = 0,19$  Вт/(м·К);  $c_2 = 1520$  Дж/(кг·К);  $T_{2,0} = 293$  К;  $\rho_2 = 1250$  кг/м<sup>3</sup>;  $\Theta = 773$  К;  $\varepsilon = 0,4$ .

Из расчетных кривых, описывающих нагрев частиц угля (рисунок 1), видно, что перегретыми будут мелкие фракции, которые, в свою очередь, также будут являться теплоносителями для остальных фракций топлива-угля. Чем больше размер частицы, тем позже достигается равновесие температур между частицами в смеси, т. е. тратится больше времени. Аналогичные результаты получены в работах [3, 7, 9]. На рисунках 2–4 приведены результаты численного эксперимента, выявляющие роль

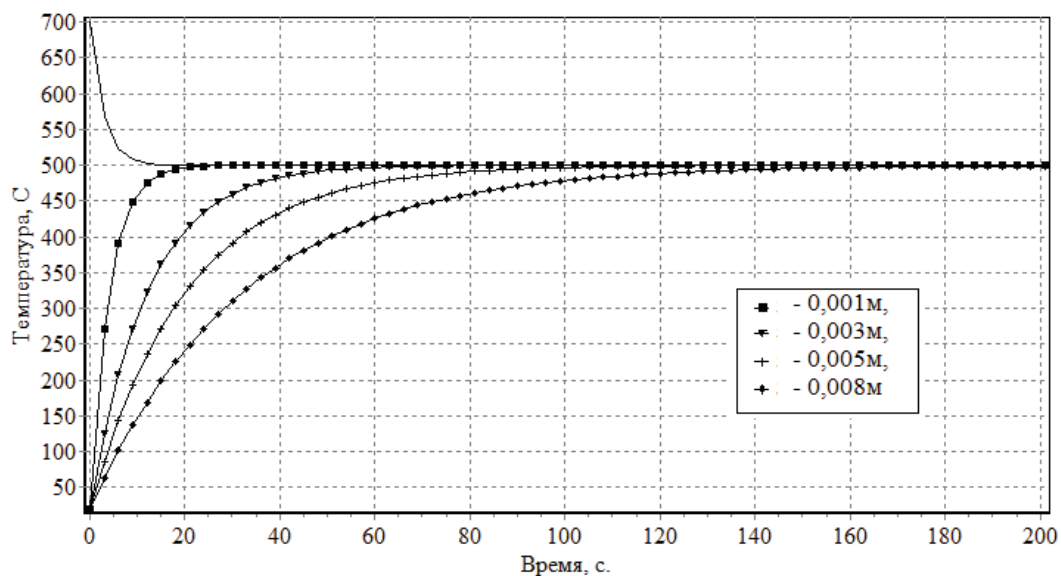


Рисунок 1 – Кривые, описывающие нагрев частиц угля и охлаждение частиц теплоносителя. Диаметр частиц теплоносителя  $d_1 = 0,001$  м. Здесь учитываются все механизмы теплопередачи в соответствии с (15)

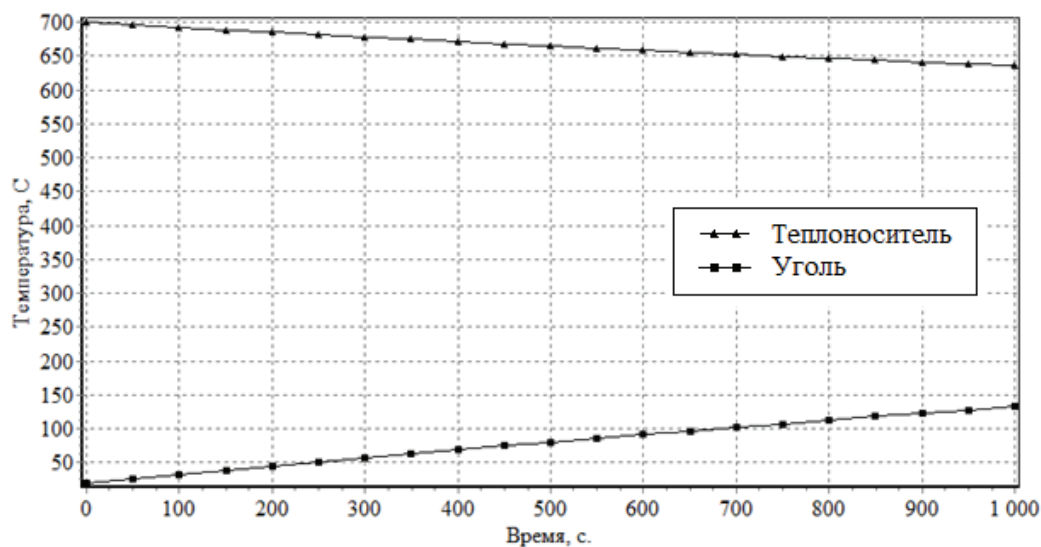


Рисунок 2 – Изменение температуры частиц только за счет контактной теплопередачи



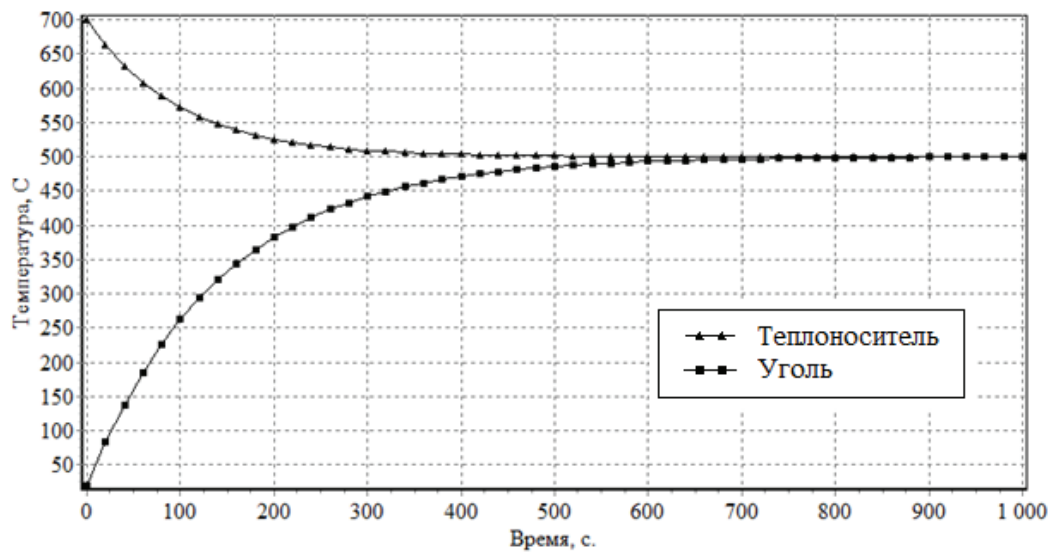


Рисунок 3 – Изменение температуры частиц только посредством теплопередачи через излучение

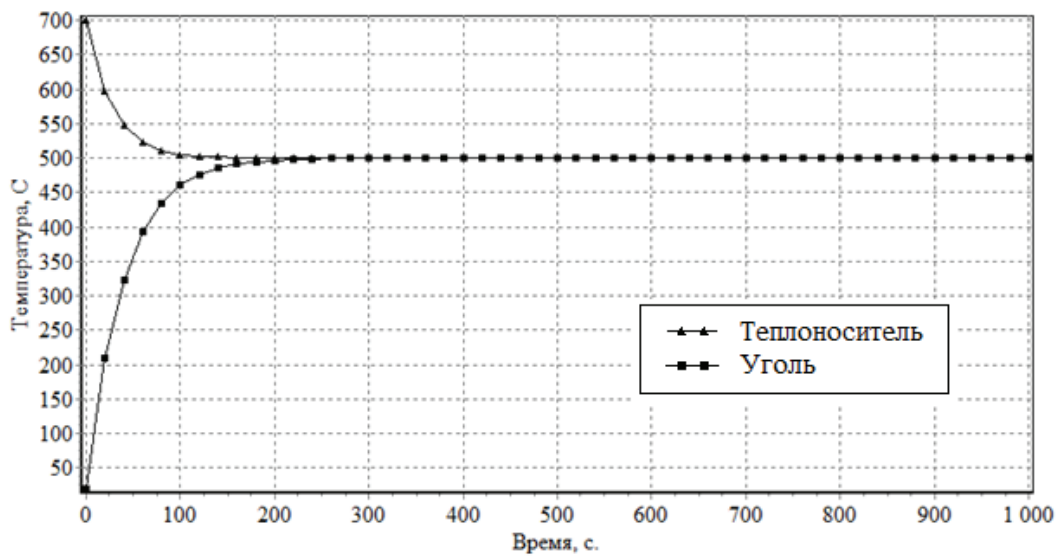


Рисунок 4 – Изменение температуры частиц при учете только теплопередачи посредством теплопроводности воздушной прослойки

механизмов теплопередачи. Для этого уравнения (18) и (19) решены для каждого компонента (15) в отдельности. Как видно из этих графиков, времена достижения равновесной температуры становятся различными, что указывает на различное количество перенесенного тепла при разных механизмах теплоотдачи. Результаты показали, что наибольшее количество тепла переносится посредством теплопроводности воздушной прослойки. В самих ранних работах при расчетах нагрева дисперсных материалов твердыми теплоносителями учитывали только этот механизм [11]. Следующий по вкладу механизм теплопередачи – тепловое излучение. При высоких температурах роль этого механизма в теплопередаче существенно растет. Это было отмечено во многих работах. Следует отметить, что наличие пор между частицами оказывает существенное влияние на оба механизма теплопередачи. Наименьший вклад в теплопередачу дает перенос тепла через прямой контакт частиц теплоносителя с частицами угля, что объясняется малой площадью контакта по сравнению с площадью самих частиц.

**Заключение.** Разработана математическая модель в приближении, не учитывающем разложение минеральных летучих веществ, получение аналитических выражений, которые дают возможность быстро рассчитать материальные и энергетические потоки, выявить и оценить факторы, влияющие на нагрев.

Предложенная модель учитывала все основные механизмы теплопередачи, такие как теплопроводность при контакте между частицами в смеси, молекулярная теплопроводность воздушной прослойки и лучистый теплообмен. Однако по результатам моделирования было определено, что основной вклад в теплопередачу от частиц теплоносителя к частицам топлива дают теплопроводность воздушной прослойки между частицами и тепловое излучение, причем при высоких температурах роль этого механизма в теплопередаче существенно растет.

Найденные аналитические формулы описывают поведение температур частиц теплоносителя и топлива-угля в зависимости от времени, и дают возможность исследовать характер изменения времени достижения равновесной температуры в смеси в зависимости от теплофизических и геометрических параметров этих частиц. Полученные результаты с удовлетворительной точностью совпадают с результатами эксперимента. Следовательно, при проектировании пиролизных машин и при решении ряда других инженерных задач эти формулы могут оказать неоценимую помощь.

Поступила: 12.12.2023; рецензирована: 26.12.2023; принята: 28.12.2023.

#### *Литература*

1. Асанов А.А. Энергоэффективное использование углей Кыргызстана / А.А. Асанов. Бишкек: Из-во «Инсанат», 2018. 292 с.
2. Волков Э.П. Моделирование энерготехнологических процессов / Э.П. Волков, Г.Я. Герасимов. М.: РАН, 2021. 226 с.
3. Simonov V.F. Development of algorithm for calculating the parameters of a drum reactor for low-temperature carbonization of oil shale with ash-based heat-transfer agent / V.F. Simonov, A.N. Mrakin, A.A. Selivanov, A.A. Morev, and O.V. Afanas'eva // Chemical and Petroleum Engineering. Vol. 52. Nos. 9–10. January, 2017 (Russian Original Nos. 9–10, Sept.–Oct., 2016).
4. Зройчиков Н.А. Экспериментальное исследование массообменных процессов при пиролизе горючего сланца в установках с твердым теплоносителем / Н.А. Зройчиков, О.П. Потапов, С.А. Фадеев, Г.И. Двоскин, В.В. Хасхачих // Надежность и безопасность энергетики. 2016. № 4. С. 29–35.
5. Морев А.А. Перспективные направления и способы переработки сернистых горючих сланцев Поволжья / А.А. Морев // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. URL: <https://science-education.ru/ru/article/viewid=11638> (дата обращения: 26.12.2022).
6. Герасимов Г.Я. Термическая деструкция твердого топлива в реакторе-пиролизере барабанного типа / Г.Я. Герасимов, Г.К. Тер-Оганесян // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37. № 3. С. 70–75.
7. Liang P. Simulation of coal pyrolysis by solid beat carrier in a moving-bed pyrolyzer / P. Liang, Z. Wang, J. Bi // Fuel. 2008. № 87. Pp. 435–442.
8. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов / А.Ф. Чудновский. М.: Физматлитература, 1962. 456 с.

9. *Vanpuyveld D.R.* Dynamic modeling of retort thermodynamics of oil shales / D.R. Vanpuyveld // *Oil Shale*. 2007. Vol. 24. No. 4. Pp. 509–525.
10. *Luikov A.V., Shashkov A.G., Vasilev L.L.* // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1968. V.11. Pp. 117–139.
11. *Баскаков А.П.* Изучение теплообмена между частицами твердого мелкозернистого теплоносителя в засыпке / А.П. Баскаков, С.К. Корочкина // *Тепло- и массоперенос. Общие вопросы теплообмена*. М.: Госэнергоиздат, 1963. С. 660–667.