

УДК 536.468

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ ЧАСТИЦ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Г. В. Кузнецов¹, В. В. Саломатов², С. В. Сыродой¹¹Томский политехнический университет, 6340050 Томск, ssyrodoy@yandex.ru²Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск

Решена задача зажигания частицы водоугольного топлива. Учитывались совместно протекающие процессы испарения воды и термического разложения твердого топлива. По результатам численного моделирования определены условия и характеристики зажигания частицы водоугольного топлива в достаточно типичных топочных условиях. Полученные значения времени задержки воспламенения хорошо согласуются с опубликованными экспериментальными данными.

Ключевые слова: водоугольное топливо, зажигание, испарение, термическое разложение, фильтрация, летучие, время задержки зажигания.

DOI 10.15372/FGV20150402

ВВЕДЕНИЕ

Зажигание частиц водоугольного топлива (ВУТ) представляет собой комплекс совместно протекающих физико-химических процессов (испарение влаги, сложный тепло- и массоперенос, термическое разложение твердого топлива, химическое взаимодействие углеродистых продуктов пиролиза с водяным паром, окисление газообразных горючих компонентов на поверхности частицы и др.) [1–12].

По результатам экспериментальных [1–3] и теоретических [4–9] исследований выделены основные стадии процесса зажигания частиц ВУТ: прогрев до начала испарения воды, непосредственно испарение, термическое разложение органической части ВУТ с выделением газообразных и образованием углеродистых твердых продуктов, взаимодействие последних с водяным паром и окислителем внешней среды. В [4–7] разработан подход к математическому моделированию процесса термодготовки и горения частицы ВУТ, в основе которого лежит разделение всего процесса зажигания на четыре последовательные стадии. Такая физическая модель позволяет существенно упростить алгоритм решения общей задачи и свести процедуру моделирования к после-

довательному решению четырех взаимосвязанных задач теплопереноса с учетом в каждой одного доминирующего физического или химического процесса. Подход [4–7] позволяет для каждой выделенной стадии получить приближенное решение, опирающееся на теоретический анализ предшествующей стадии [8, 9].

В то же время при достаточно большом характерном размере частиц водоугольного топлива возможно совместное протекание всех вышеперечисленных процессов: теплопроводности, испарения влаги, фильтрации водяных паров по пористой структуре частицы, термического разложения органической части ВУТ, термохимического взаимодействия горючих компонентов с окислителями, зажигания.

Цель настоящей работы — решение задачи зажигания частицы водоугольного топлива в рамках модели, учитывающей основные факторы и процессы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для частицы ВУТ по данным [10, 11] характерна повышенная реакционная способность (соответственно, пониженная по сравнению с углем температура зажигания). Так, например, водоугольная частица на основе антрацита загорается при температуре $425 \div 440$ °С, а сухая частица угля той же марки воспламеняется при температуре $800 \div 1000$ °С. В [10] данная особенность объясняется химическим взаимодействием водяно-

Работа выполнена в рамках госзадания «Наука» (шифр федеральной целевой научно-технической программы 2.1410.2014).

го пара и угля, продуктами которого являются низкорекционные комплексы [1, 3], ускоряющие окисление органической части топлива.

Частица водоугольного топлива, как правило, представляет собой неправильный многогранник, число граней которого изменяется случайным образом в зависимости от многих факторов (марки угля, содержания минеральных составляющих, технологии измельчения исходного твердого топлива, условий хранения и др.). По этим причинам моделирование реальной конфигурации частицы ВУТ крайне затруднительно. Но одним из возможных вариантов является частица в форме сферы. Вероятность такой конфигурации не больше и не меньше всех остальных [12], поэтому ее можно считать достаточно типичной и использовать при постановке задачи.

В наиболее общем случае частица ВУТ представляет собой многокомпонентную пористую структуру (вода, органическая часть, минеральная часть) с заполненными водой пора-ми.

В теории тепло- и огнезащиты использовались математические модели тепло- и массопереноса и физико-химических превращений [13, 14] в теплоогнезащитных материалах при интенсивном нагреве в условиях высокой температуры. Но модели типа [14] слишком сложны в реализации и решение задач на их базе возможно только при известных характеристиках (теплофизических, термодинамических, физико-механических) материалов в широком диапазоне изменения температуры (от начального состояния до полного завершения термического разложения органической части).

В данной работе рассматривается постановка задачи зажигания частицы, отличающаяся от известных [1–12] тем, что процессы тепло- и массопереноса описываются не дискретно во времени, как, например, в [4–7], или в пространстве, как в [8, 9], а непрерывно во всем промежутке времени, предшествующем зажиганию, и по всей толщине частицы.

Предполагалось, что в начальный момент времени ($t = 0$) частица ВУТ попадает в высокотемпературную газовую среду и нагревается за счет конвекции и излучения. Соответственно в частице начинается испарение влаги, и по мере прогрева ВУТ фронт испарения продвигается от поверхности нагрева в глубь частицы. В результате формируется слой пористого сухого топлива, температура в каж-

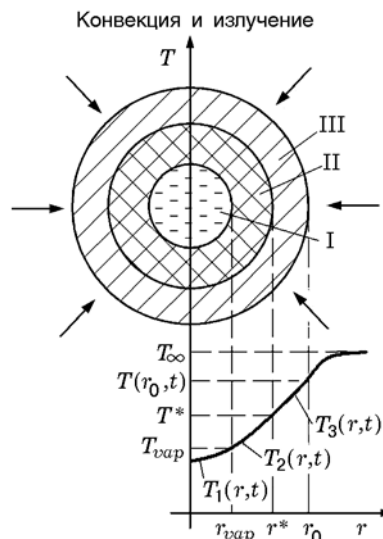


Рис. 1. Схема области решения задачи:

I — зона, соответствующая влагонасыщенному топливу (исходное состояние); II — зона, соответствующая сухому углю, температура которого меньше T^* ; III — зона, соответствующая сухому, термически разлагающемуся углю

дой точке которого с ростом времени повышается. Испарившаяся влага фильтруется через образовавшийся пористый углеродистый каркас. Водяной пар взаимодействует с углеродом (образующимся после завершения влагоудаления) с поглощением теплоты. При достижении на поверхности частицы условия $T_s \geq T^*$ (T_s — температура поверхности частицы, T^* — температура начала разложения сухого угля) начинается разложение органической части топлива. По мере дальнейшего прогрева и роста температуры в каждой точке частицы фронт $T(r, t) = T^*$ продвигается в глубь ВУТ. В итоге формируется структура топлива, которую можно разделить на три характерные зоны (I–III на рис. 1), соответствующие влагонасыщенному топливу (исходное состояние); сухому углю при температуре меньше T^* ; сухому, термически разлагающемуся углю при температуре выше T^* .

Продукты термической деструкции и химического взаимодействия углеродистого твердого остатка и водяных паров вдуваются в «пристенную» область, формируя газовую смесь, воспламеняющуюся при достижении критических значений температуры и концентрации (см. рис. 1).

При решении задачи (1)–(15) (см. ниже) теплофизические характеристики рассчитыва-

ются для каждой зоны в соответствии с ее физическим состоянием и изменением во времени границ между зонами.

Принимались следующие условия воспламенения: тепло, выделяемое в результате реакции окисления продуктов термического разложения и газификации, превышает поступающее из внешней среды; на границе системы частица ВУТ — высокотемпературная среда выполняется условие $\frac{dT}{dr} = 0$.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Система нестационарных дифференциальных уравнений теплопроводности, соответствующая вышеизложенной физической модели, имеет следующий вид:

уравнение энергии для исходной (влажной) части топлива [15]:

$$c_{1\rho_1} \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial t} = \lambda_1 \left[\frac{\partial^2 T_1(r, t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial r} \right], \quad (1)$$

$$t > 0, \quad 0 < r < r_{vap}, \quad T \leq T_{vap};$$

уравнение энергии для «обезвоженной» части ВУТ [15]:

$$c_2(r)\rho_2(r) \frac{\partial T_2(r, t)}{\partial t} = \lambda_2(r) \left[\frac{\partial^2 T_2(r, t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_2(r, t)}{\partial r} \right] - \sum Q_i W_i - u_{steam} c_{p, steam} \rho_{steam} \frac{\partial T_2(r, T)}{\partial r}, \quad (2)$$

$$- \sum Q_i W_i - u_{steam} c_{p, steam} \rho_{steam} \frac{\partial T_2(r, T)}{\partial r},$$

$$t > 0, \quad r_{vap} < r < r_0, \quad T \geq T_{vap};$$

уравнение химической кинетики для органической части топлива [16]:

$$\frac{\partial \eta_2(r, t)}{\partial t} = (1 - \eta_2(r, t)) k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_1(r, t)}\right), \quad (3)$$

$$t > 0, \quad r_{vap} < r < r_0, \quad T \geq T_{vap};$$

уравнение фильтрации для водяных паров и газообразных продуктов термического разложения [17]:

$$\frac{m\xi Z}{K_P} \frac{\partial p_{steam}(r, t)}{\partial t} = \left(\frac{\partial p_{steam}^2(r, t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p_{steam}(r, t)}{\partial r} \right), \quad (4)$$

$$t > 0, \quad r_{vap} < r < r_0, \quad T \geq T_{vap}.$$

На границе раздела системы исходное ВУТ — сухой уголь выполняется граничное условие 4-го рода:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_{vap}-0} - \lambda_2(r) \frac{\partial T_2(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_{vap}+0} = Q_{vap} W_{vap}, \quad (5)$$

$$T_1(r_{vap}, t) = T_2(r_{vap}, t) = T_{vap}.$$

Система уравнений (1)–(4) решалась при следующих краевых условиях и замыкающих соотношениях [15–19]:

$$0 < r < r_0, \quad T(r, 0) = T_0, \quad p(r, 0) = p_0,$$

$$\eta(r, 0) = \eta_0;$$

$$-\lambda_2(r_0) \frac{\partial T_2(r_0, t)}{\partial r} = \alpha [T_\infty - T_2(r_0, t)] + \varepsilon \sigma [T_\infty^4 - T_2^4(r_0, t)] + \sum_i Q_i W_i, \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_1(0, t)}{\partial r} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial p(r_{vap}, t)}{\partial r} = \frac{\nu}{K_P} u_{steam}(r_{vap}, t), \quad (8)$$

$$p(r_0, t) = p_0. \quad (9)$$

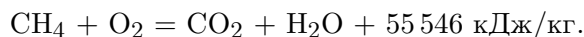
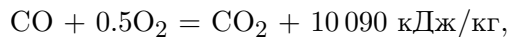
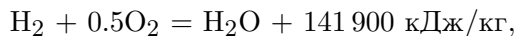
По аналогии с [17] скорость обратимой реакции $C + H_2O = CO + H_2 - 118.485$ МДж вычислялась по выражению

$$W_i = C_i \rho_i k_i \exp\left(-\frac{E}{RT(r, t)}\right). \quad (10)$$

Скорость пиролиза рассчитывалась по соотношению [17]

$$W_{pyr} = (1 - \eta(r, t))\rho_i k_i \exp\left(-\frac{E}{RT(r, t)}\right). \quad (11)$$

Зажигание ВУТ — гетерогенный процесс [15], определяемый кинетикой воспламенения продуктов термического разложения и взаимодействия водяного пара с углеродом. На поверхности частицы протекают следующие реакции:



Для определения скоростей этих реакций использовалась зависимость [19]

$$W_i = k_i C_i \rho_i \exp\left(-\frac{E}{RT(r_0, t)}\right), \quad (12)$$

плотность газообразных компонентов рассчитывалась из уравнения состояния

$$\rho_i = \frac{p(r, t)\mu}{T(r_0, t)R}. \quad (13)$$

Скорость фильтрации пара сквозь пористую структуру определялась по закону Дарси

$$u_{steam} = -\frac{K_P}{\nu} \frac{\partial p_{steam}}{\partial r}. \quad (14)$$

В (1)–(14) используются следующие обозначения: T_0 — начальная температура частицы; T_∞ — температура окружающей среды; r_{vap} — радиус фронта испарения; r_0 — внешний радиус частицы; σ — константа излучения абсолютно черного тела; α — коэффициент конвективной теплоотдачи; c_1 — коэффициент теплоемкости исходной части ВУТ; c_2 — коэффициент теплоемкости сухой части ВУТ; λ_1 — коэффициент теплопроводности исходной части ВУТ; λ_2 — коэффициент теплопроводности сухой части ВУТ; W_{vap} — массовая скорость испарения воды; Q_{vap} — тепловой эффект испарения воды; Q_i — тепловой эффект химической реакции; k_i — предэкспонент химической реакции ($k_{\text{H}_2\text{O}+\text{C}} = 5.6 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ [19], $k_{\text{уголь} \rightarrow \text{CH}_4} = 212 \text{ с}^{-1}$, $k_{\text{CO}+0.5\text{O}_2} = 1.4 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$, $k_{\text{H}_2+0.5\text{O}_2} = 2.137 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$, $k_{\text{CH}_4+\text{O}_2} = 5.6 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ [20]); E — энергия активации химической реакции ($E_{\text{H}_2\text{O}+\text{C}} = 36.207 \cdot 10^3 \text{ Дж/моль}$ [19], $E_{\text{уголь} \rightarrow \text{CH}_4} = 60.6 \cdot 10^3 \text{ Дж/моль}$, $E_{\text{CO}+0.5\text{O}_2} = 96.8 \cdot 10^3 \text{ Дж/моль}$, $E_{\text{H}_2+0.5\text{O}_2} = 129.8 \times 10^3 \text{ Дж/моль}$, $E_{\text{CH}_4+\text{O}_2} = 103.8 \cdot 10^3 \text{ Дж/моль}$ [20]); u_{steam} — скорость фильтрации водяного

пара; $c_{p,steam}$ — изобарная теплоемкость водяного пара; ρ_{steam} — плотность пара; p_{steam} — давление паровой фазы внутри частицы; m — пористость частицы; Z — степень сжимаемости водяного пара; K_P — степень проницаемости пористой структуры; μ — молярная масса воды; ν — динамическая вязкость водяных паров; C_i — концентрация соответствующего компонента химической реакции; i — порядковый номер компонента химической реакции; R — универсальная газовая постоянная.

Координата границы испарения находилась из выражения

$$r_{vap} = r_0 - \int u_l d\tau,$$

где $u_l = W_{vap}/\rho_l$ — линейная скорость продвижения фронта испарения. Массовая скорость испарения вычислялась по формуле [21]

$$W_{vap} = W_0 \exp\left(\frac{Q_{vap}\mu_{steam}(T' - T_{l0})}{RT_{l0}T'}\right), \quad (15)$$

где T — температура на границе испарения, T_{l0} — температура жидкости, соответствующая точке замерзания, W_0 — скорость испарения при температуре T_{l0} , μ_{steam} — молярная масса водяного пара.

МЕТОД РЕШЕНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Система дифференциальных уравнений (1)–(10) решена методом конечных разностей с применением четырехточечной неявной разностной схемы [22, 23]. Решение уравнения химической кинетики (3) проводилось методом последовательных приближений. Нелинейные разностные уравнения решены методом итераций с применением алгоритма, разработанного для задач зажигания твердых топлив при локальном нагреве [24, 25]. Верификация результатов численного моделирования заключалась в проверке консервативности разностной схемы по методике, использованной при анализе достоверности результатов решения задачи зажигания жидких топлив при локальном нагреве [25].

Исходные данные для расчета следующие: $T_0 = 293 \text{ К}$, $T_\infty = 1400 \text{ К}$, $p_0 = p_{atm} = 101\,325 \text{ Па}$, $\eta_0 = 0$.

В качестве базового материала для водородного топлива выбран уголь Кузнецкого бассейна марки «Д» [26].

Теплофизические свойства влажной и «обезвоженной» частей топлива рассчитывались с учетом объемных долей φ компонентов топлива:

$$\lambda_1 = \varphi_3 \lambda_3 + \varphi_4 \lambda_4,$$

$$\lambda_2 = \varphi_4 \lambda_4 + \varphi_5 \lambda_5 + \varphi_6 \lambda_6,$$

где индексом 3 обозначена вода, 4 — уголь, температура которого меньше T^* , 5 — термически разлагающийся уголь при температуре, выше или равной T^* , 6 — воздух.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведен анализ характерных времен основных стадий многостадийного процесса воспламенения частицы ВУТ диаметром $\delta = 400 \div 900$ мкм.

На рис. 2 приведены характерные времена испарения $t_{var} = \varphi(T_\infty, \delta)$, найденные из численного решения системы уравнений (1)–(11), а также экспериментальные данные [27]. Анализ результатов численного моделирования показал, что при размере частиц $600 \div 900$ мкм с достаточно высокой степенью достоверности может быть рассчитана скорость удаления влаги из частицы ВУТ.

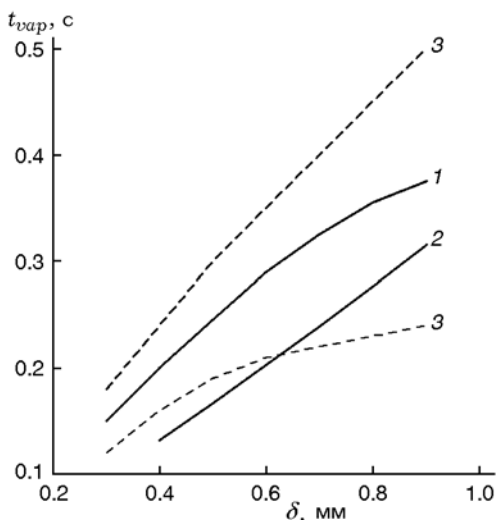


Рис. 2. Зависимость времени «обезвоживания» от характерного размера частиц при температуре внешней среды $T_\infty = 1400$ К:

1 — эксперимент [27], 2 — данные численного расчета системы (1)–(11), 3 — границы области «рассеяния» экспериментальных данных [27]

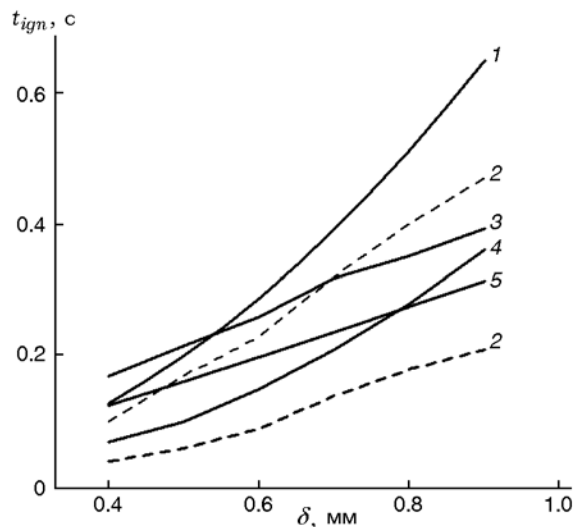


Рис. 3. Зависимость времени задержки зажигания от характерного размера частиц ВУТ при температуре внешней среды $T_\infty = 1400$ К: 1 — эмпирические формулы [27], 2 — границы интервала рассеяния экспериментальных данных [27], 3 — численное решение системы (1)–(11), 4 — эксперимент [27], 5 — численное решение (1)–(11) без учета эффектов испарения влаги и пиролиза сухой части топлива

На рис. 3 приведены результаты сопоставления времен задержки зажигания в системе частица ВУТ — высокотемпературная среда, полученные при решении уравнений (1)–(11) и в экспериментах [27]. Отклонение теоретических значений от экспериментальных при варьировании диаметра частиц ВУТ в диапазоне $\delta = 700 \div 900$ мкм находится в пределах погрешности эксперимента [27]. Но для частиц диаметром $\delta < 700$ мкм отклонение результатов численного моделирования выходит за эти границы.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что математическая модель (1)–(11) с приемлемой достоверностью описывает характеристики зажигания крупных частиц ВУТ (с характерным размером более 700 мкм).

Результаты теоретических исследований, представленные на рис. 3, свидетельствуют о том, что применение упрощенных моделей испарения воды [11] для описания процессов тепло- и массопереноса в водоугольной частице в типичных условиях топочного пространства может привести к достаточно большим отклонениям в определении характеристик зажигания. Образовавшийся в результате испарения

пористый угольный каркас замедляет процесс теплопередачи, уменьшая тем самым интенсивность испарения и термического разложения. Другими словами, существенно увеличиваются характерные времена пиролиза угля и достижения высокой температуры поверхности частицы. Зависимости времени задержки воспламенения от температуры внешней среды при различных диаметрах «распыла» [15] частиц ВУТ, построенные при численном решении системы (1)–(11), представлены на рис. 4.

Анализ полученных результатов (см. рис. 4) показывает, что зависимости $t_{ign} = \varphi(T_{\infty}, \delta)$ существенно отличаются от аналогичных зависимостей для обычных твердых конденсированных веществ [19], которые отражают экспоненциальный характер связи скорости химической реакции воспламенения и температуры. Скорее всего, это обусловлено влиянием процессов испарения влаги, фильтрации водяных паров к поверхности нагрева и их вдува в «пристенную» область частицы. Все эти физические процессы препятствуют росту температуры в зоне воспламенения ВУТ и снижают концентрацию газообразных продуктов пиролиза угля (основного горючего). То есть режим воспламенения частицы ВУТ не является «кинетическим» (по определению [19]). Также его нельзя классифицировать и как диффузионный [19]. Вероятнее всего, кривые $t_{ign} = \varphi(T_{\infty}, \delta)$ иллюстрируют режим воспламенения частицы водоугольного топлива в результате совместного протекания

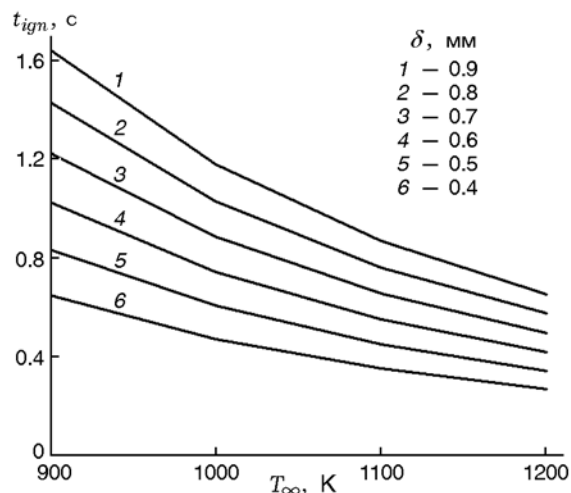


Рис. 4. Время задержки зажигания частиц различного диаметра в различных условиях теплообмена

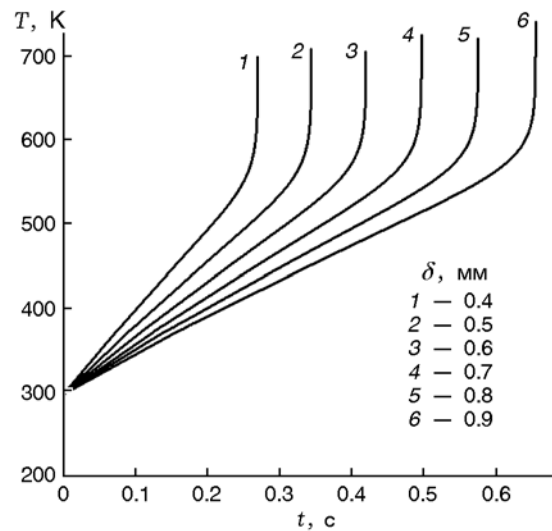


Рис. 5. Зависимость температуры поверхности частиц различного диаметра от времени ($T_{\infty} = 1200$ К)

комплекса взаимосвязанных физических (теплопроводность, испарение воды, фильтрация паров, вдув паров в пристенную область) и химических (термическое разложение угля, взаимодействие паров воды с углеродом кокса, образующегося при пиролизе, взаимодействие газообразных продуктов термического разложения угля с окислителем внешней среды) процессов.

На рис. 5 приведены зависимости температуры поверхности частицы ВУТ от времени при различных диаметрах последних в момент воспламенения. Хорошо видно, что в диапазоне $\delta = 0.4 \div 0.9$ мм максимальные значения T_{ign} при зажигании не превышают 620 К.

Увеличение времени задержки зажигания с ростом диаметра частиц обусловлено, скорее всего, необходимостью полного испарения воды. Сравнение рис. 2–4 дает основание для вывода о том, что зажигание происходит только при полном удалении всей влаги из пористой структуры водоугольного топлива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель процесса зажигания частицы водоугольного топлива, отличающаяся от известных [1–12] описанием комплекса физико-химических процессов, предшествующих непосредственному воспламенению.

Предложен новый подход к моделированию процессов влагопереноса в пористой структуре высокотемпературной среды, отличающийся физической интерпретацией испарения влаги (непосредственным выделением фронта парообразования) от наиболее широко применяемого подхода в теории высокотемпературных физико-химических превращений (модели влаготенциала [28]).

Соответствие результатов численного моделирования (зависимостей времени задержки зажигания от температуры окружающей среды и размеров частиц ВУТ) и экспериментальных данных [27] свидетельствует о возможности использования для описания рассматриваемого процесса основных физических положений, выработанных при создании общей теории зажигания конденсированных веществ [14].

ЛИТЕРАТУРА

1. Делягин Г. Н. Вопросы теории горения водоугольной суспензии в потоке воздуха // Вопросы теории горения высокообводненного топлива. — М.: Наука, 1967. — С. 45–55.
2. Третьяков В. М. Исследования воспламенения аэрозвеси ископаемых углей // Изв. ВТИ. — 1951. — Вып. 8. — С. 11–17.
3. Делягин Г. Н. Вопросы теории воспламенения и горения распыленной водоугольной суспензии // Кинетика и аэродинамика процессов горения топлива. — М.: Наука, 1969. — С. 111–127.
4. Саломатов В. В., Кравченко И. В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива Ч. I // Горение и плазмохимия. — 2007. — Вып. 3. — С. 178–188.
5. Саломатов В. В., Кравченко И. В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Ч. II: Стадия испарения // Горение и плазмохимия. — 2007. — Т. 5, вып. 3. — С. 189–197.
6. Саломатов В. В., Кравченко И. В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Ч. III // Горение и плазмохимия. — 2008. — Т. 6, вып. 1. — С. 56–59.
7. Саломатов В. В., Кравченко И. В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива Ч. IV // Горение и плазмохимия. — 2008. — Т. 6, вып. 4. — С. 178–187.
8. Huang Z. et al. Theoretical analysis on CWM drop combustion history // Proc. 8th Intern. Symp. Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization. — USA, Orlando. — 1986. — Pt 1. — P. 343–358.
9. Matthews K. J., Jones A. R. The effect of coal composition on coal-water slurry combustion and ash deposition characteristics // Ibid. — P. 388–407.
10. Делягин Г. Н., Кирсанов В. И., Онищенко А. Г. Особенности сжигания антрацитового штыба в виде водоугольных суспензий в топке парового котла // Горение дисперсных топливных систем. — М.: Наука, 1969. — С. 33–39.
11. Делягин Г. Н. Об условиях совместного протекания процессов испарения воды и выгорания капли водоугольной суспензии // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. — М.: Наука, 1967. — С. 55–67.
12. Хитрин Л. Н. Физика горения и взрыва. — М.: Изд-во МГУ, 1957.
13. Решетников И. С., Антонов А. В., Халтуринский Н. А. Математическое описание горения вспучивающихся полимерных систем (обзор) // Физика горения и взрыва. — 1997. — Т. 33, № 6. — С. 48–67.
14. Страхов В. Л., Гаращенко А. Н., Кузнецов Г. В., Рудзинский В. П. Математическое моделирование теплофизических и термохимических процессов при горении вспучивающихся огнезащитных покрытий // Физика горения и взрыва. — 2001. — Т. 37, № 2. — С. 63–73.
15. Виленский Т. В. Расчет горения водоугольных смесей // Энергетика. — 1988. — № 7. — С. 90–93.
16. Виллюнов В. Н. Теория зажигания конденсированных веществ. — Новосибирск: Наука, 1984.
17. Басниев К. С., Кочина И. Н. Подземная гидродинамика. — М.: Недра, 2009.
18. Гремячкин В. М. О взаимодействии пористой частицы углерода с водяным паром // Хим. физика. — 2007. — Т. 26, № 5. — С. 26–33.
19. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — 3-е изд. — М.: Наука, 1987.
20. Померанцев В. В. Основы практической теории горения: учебное пособие для вузов. — Л.: Энергоатомиздат, 1986.
21. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкости. — Л., 1975.
22. Бахвалов Н. С. Численные методы. — М.: Наука, 1975.
23. Самарский А. А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1983.
24. Кузнецов Г. В., Мамонтов Г. Я., Таратушкина Г. В. Численное моделирование зажигания конденсированного вещества нагретой до высоких температур частицей // Хим. физика. — 2004. — Т. 23, № 3. — С. 67–73.
25. Кузнецов Г. В., Мамонтов Г. Я., Таратушкина Г. В. Численное моделирование зажигания конденсированного вещества нагретой до высоких температур частицей // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40, № 1. — С. 78–85.
26. Агроскин А. А., Глейбман В. Б. Теплофизика твердого топлива. — М.: Недра, 1980.

27. **Бабий В. И., Барабаш В. М., Хидиятов А. М., Степашина В. А.** Воспламенение и горение капель водоугольной суспензии // Материалы 9 Всерос. симпоз. по горению и взрыву. — Черноголовка, 1989. — С. 56–59.
28. **Лыков А. В.** Теория сушки. — М.: Энергия, 1968.

Поступила в редакцию 7/III 2014 г.
