

УДК 536.468

Тепломассоперенос в частице водоугольного топлива на стадии «термической» подготовки*

В.В. Саломатов¹, С.В. Сыродой², Г.В. Кузнецов²

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Томский политехнический университет

E-mail: ssyrodoy@yandex.ru

Численно решена задача тепломассопереноса в условиях зажигания частицы водоугольного топлива. Учитывалось совместное протекание процессов испарения влаги, фильтрации водяных паров, термического разложения органической части угля, термохимического взаимодействия паров воды и углерода кокса, окисления продуктов взаимодействия последних, а также летучих внешним окислителем. Установлены масштабы влияния индивидуальных теплофизических и термохимических свойств углей на характеристики и условия воспламенения водоугольной суспензии.

Ключевые слова: конвективно-лучистый теплообмен, испарение, фильтрация, пиролиз, зажигание, водоугольное топливо.

Введение

Возможность использования водоугольных топлив (ВУТ) как основных в топках котельных агрегатов самого различного назначения обоснована достаточно давно [1–3]. Разработаны технологии подготовки [4], транспортировки [5] и сжигания [6] таких топлив; предложены конструкторские решения по способам и техническим устройствам для различных стадий технологического цикла от измельчения исходного натурального топлива до сжигания [7–10]. Однако до настоящего времени нет примеров устойчивого применения этих технологий на территории России. Скорее всего, последнее связано не только с непроработанностью технических или технологических аспектов использования ВУТ, но также и с тем, что не изучен ряд научно-технических проблем, таких как измельчение угля до ультрадисперсного состояния, термическая подготовка, зажигание и горение частиц топлива.

Одной из наиболее сложных является проблема определения условий и характеристик воспламенения частиц водоугольных топлив в диапазоне изменения параметров, соответствующих топочному пространству типичных котельных агрегатов. Современная теория зажигания твердых топлив (в том числе и углей) [11–13] не может быть формально применена для описания процессов теплопереноса в частице ВУТ в связи с большой,

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

как показывают результаты [14–16], ролью локальных фазовых превращений (испарение воды в рассматриваемом случае) при формировании температурного поля прогретого слоя конденсированного вещества в период, предшествующий непосредственному воспламенению. При этом определенное, и во многих случаях достаточно значимое, влияние на условия и характеристики воспламенения могут оказывать индивидуальные свойства ВУТ: теплофизические характеристики, зольность, доля летучих компонентов, кинетика процессов термического разложения органической части топлива и др.

Разработана математическая модель, описывающая основные физико-химические процессы и тепломассоперенос в частице ВУТ в период «термической подготовки» [17, 18]. Модель [17, 18] отличается от известных [19–20] более детальным анализом процессов тепломассопереноса. Вместе с тем, результаты теоретических исследований [17, 18] недостаточны для выводов о вариативности использованной модели тепломассопереноса в ВУТ в условиях интенсивного нагрева для описания условий зажигания частиц водоугольной суспензии на различной топливной основе.

Цель работы — анализ условий и характеристик зажигания частиц группы водоугольных топлив с использованием модели, учитывающей основные процессы тепломассопереноса, протекающие в частице ВУТ при интенсивном нагреве.

Постановка задачи

Основное внимание при постановке задачи тепломассопереноса в сферической частице водоугольного топлива было уделено описанию комплекса взаимосвязанных процессов физико-химических превращений. Наиболее значимыми для формирования температурного поля и, соответственно, определения интенсивности газификации органической части угля являются процессы испарения воды, термического разложения угля и термохимического взаимодействия газообразных и твердых продуктов пиролиза с водяными парами, а также с окислителем внешней среды. Следует отметить, что наиболее значимый по вкладу в тепловой баланс частицы ВУТ фазовый переход на границе «вода–пар» является наиболее сложным в математическом описании. Решение задачи типа Стефана (аналогично [19]) предполагает знание температуры границы раздела фаз, например, плавления или кристаллизации. Однако движение фронта испарения в частице ВУТ возможно не только при температуре кипения, но при разных температурах поверхности фазового перехода в зависимости от интенсивности нагрева топлива. Поэтому при постановке задачи использовалась модель испарения, хорошо апробированная при решении задач зажигания жидких топлив в условиях интенсивного испарения последних [14–16]. Кроме вышеперечисленных физических и химических процессов учитывался теплоперенос за счет теплопроводности, фильтрации водяных паров и продуктов газификации органической части топлива. Также рассматривались конвективный и радиационный теплообмен частицы ВУТ с внешней средой.

По аналогии с постановкой задачи [17] система уравнений, описывающая теплоперенос и физико-химические высокотемпературные превращения на поверхности в частице водоугольного топлива, может быть сформулирована в виде:

— уравнение энергии для исходной части топлива:

$$C_1 \rho_1 \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \cdot \lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial r} \right], \quad (1)$$

$$t > 0, \quad 0 < r < r_v, \quad T \leq T_v;$$

— уравнение энергии для «сухой» части ВУТ:

$$C_2 \rho_2 \frac{\partial T_2(r, t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \cdot \lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2(r, t)}{\partial r} \right] - \sum Q_i \cdot W_i - u C_p \cdot \rho \frac{\partial T_2(r, T)}{\partial r}, \quad (2)$$

$$t > 0, \quad r_v < r < r_0, \quad T \geq T_v,$$

где T_v — температура на границе испарения, К; Q_i — тепловой эффект химической реакции, Дж/кг; W_i — скорость химической реакции кг/(м²·с); u — скорость фильтрации водяного пара, м/с; λ_1 — коэффициент теплопроводности исходной части ВУТ, Вт/(м·К); λ_2 — коэффициент теплопроводности сухой части ВУТ, Вт/(м·К); C_1 — теплоемкость исходной части ВУТ, Дж/(кг·К); C_2 — теплоемкость сухой части ВУТ, Дж/(кг·К); ρ_1 — плотность исходной части ВУТ, кг/м³; ρ_2 — плотность сухой части ВУТ, кг/м³; C_p — изобарная теплоемкость водяного пара, Дж/кг·К; ρ — плотность пара, кг/м³; r_v — радиус фронта испарения, м; r_0 — внешний радиус частицы, м.

При постановке задачи принималось, что испарение воды происходит на границе раздела системы «исходное ВУТ – сухой уголь». Соответственно при $r = r_v$ выполняется граничное условие 4-го рода с учетом теплового эффекта фазового перехода:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_v-0} - \lambda_2 \frac{\partial T_2(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_v+0} = Q_v \cdot W_v, \quad (3)$$

$$T_1(r_v, t) = T_2(r_v, t) = T_v.$$

Массовая скорость испарения воды (W_v , кг/(м²·с)) вычислялась из выражения [16]:

$$W_v = W_0 \cdot \exp\left(\frac{Q_v \cdot \mu \cdot (T_v - T_3)}{R \cdot T_0 \cdot T_v}\right), \quad (4)$$

где T_3 — температура воды, соответствующая точке замерзания, К; μ — молярная масса водяного пара, кг/моль; R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); W_0 — массовая скорость испарения воды при температуре T_3 , кг/(м²·с); Q_v — тепловой эффект испарения воды, Дж/кг.

Координата границы испарения находилась из выражения:

$$r_f = r_0 - \int_0^\tau u_f d\tau, \quad (5)$$

где $u_f = W_v / \rho_w$ — линейная скорость продвижения фронта испарения, м/с.

Учитывался процесс фильтрации испарившейся влаги через пористый углеродистый каркас и соответствующее охлаждение последнего. Распределение давления по радиусу частицы рассчитывалось с использованием уравнения фильтрации [17]:

$$\frac{m \cdot \nu \cdot Z}{K_p} \cdot \frac{\partial p_s(r, t)}{\partial t} = \left(\frac{\partial p_s^2(r, t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial p_s(r, t)}{\partial r} \right), \quad (6)$$

$$t > 0, \quad r_v < r < r_0.$$

Скорость фильтрации пара вычислялась с использованием математического выражения закона Дарси:

$$u = -\frac{K_p}{\nu} \cdot \frac{\partial p_s}{\partial r}, \quad (7)$$

где p_s — давление паровой фазы, Па; m — пористость; Z — степень сжимаемости водяного пара, 1/Па; K_p — степень проницаемости пористой структуры, м²; ν — динамическая вязкость водяных паров, Па·с.

При постановке задачи принималось, что водяной пар вступает в эндотермическое химическое взаимодействие с углем, остающимся после завершения процесса удаления

влаги. Скорость реакции $C + H_2O = CO + H_2 - 118,485$ МДж вычислялась из выражения [18]:

$$W_i = k_i \cdot c_i \cdot \rho_s \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T(r,t)}\right). \quad (8)$$

где k_i — предэкспонент соответствующей реакции, $1/c$; c_i — концентрация соответствующего компонента химической реакции; E — энергия активации, Дж/(моль·К); i — порядковый номер химической реакции.

Разложение органической части топлива с выделением летучих в частице рассматривалось при достижении на поверхности последней условия $T_{\text{п}} \geq T_{\text{нр}}$, где $T_{\text{п}}$ — температура поверхности, $T_{\text{нр}}$ — температура начала термического разложения. Процесс описывался уравнением химической кинетики:

$$\frac{\partial \eta_2(r,t)}{\partial t} = (1 - \eta_2(r,t)) \cdot k_i \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T_2(r,t)}\right), \quad (9)$$

$$t > 0, r_{\text{н}} < r < r_0, T \geq T_{\text{н}},$$

где $r_{\text{н}}$ — радиус фронта испарения, $T_{\text{н}}$ — температура на границе раздела системы «исходное топливо – сухой уголь».

Скорость пиролиза рассчитывалась с использованием следующего выражения [19]:

$$W_i = (1 - \eta(r,t)) \cdot k_i \cdot \rho_2 \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T(r,t)}\right), \quad (10)$$

где $\eta(r, t)$ — параметр выгорания.

При решении задачи учитывалось, что продукты термической деструкции, а также химического взаимодействия углеродистого твердого остатка и водяных паров вдуваются в «пристенную» область. При этом формируется газовая смесь, воспламеняющаяся при достижении критических значений температуры и концентрации. Период времени от начала теплового воздействия на частицу до начала интенсивного, с появлением пламени, химического взаимодействия парогазовой смеси с окислителем, считался временем задержки воспламенения. Вблизи поверхности частицы учитывались следующие реакции:

1. $H_2 + 0,5 \cdot O_2 = H_2O + 141900$ кДж/кг;
2. $CO + 0,5 \cdot O_2 = CO_2 + 10090$ кДж/кг;
3. $CH_4 + O_2 = CO_2 + H_2O + 55546$ кДж/кг.

Скорость этих реакций вычислялась из математического выражения закона Аррениуса [19]:

$$W_i = k_i \cdot c_i \cdot \rho_i \cdot \exp\left(-E/(R \cdot T(r,t))\right). \quad (11)$$

Система уравнений (1)–(11) решалась при следующих краевых условиях и замыкающих соотношениях:

$$0 < r < r_0, T(r,0) = T_0, p(r,0) = p_0, \eta(r,0) = \eta_0,$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2(r_0,t)}{\partial r} = \alpha \cdot [T_c - T_2(r_0,t)] + \varepsilon \cdot \sigma \cdot [T_c^4 - T_2^4(r_0,t)] + \sum_i Q_i \cdot W_i, \quad (12)$$

$$\partial T_1(0,t)/\partial r = 0, \quad (13)$$

$$\partial p_s(r_{\text{н}},t)/\partial r = -(v/K_p) u_s(r_{\text{н}},t), \quad (14)$$

$$p(r_0,t) = p_0, \quad (15)$$

здесь: T_0 — начальная температура частицы, К; T_c — температура окружающей среды, К; σ — константа излучения абсолютно черного тела, Вт/(м²·К⁴); α — коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·К); p_0 — начальное давление, Па; η_0 — начальное значение параметра выгорания; комплекс $(\sum Q_i \cdot W_i)$ — тепловой эффект реакций, протекающих вблизи поверхности частицы, Вт/м².

Краевая задача (1)–(15) решалась в период времени до достижения на поверхности частицы условий зажигания ВУТ, адекватных условиям зажигания твердых топлив при локальном нагреве [21] и жидких горючих конденсированных веществ [14, 15].

Сформулированная задача математической физики решена методом конечных разностей. В связи с нелинейными зависимостями скоростей фазовых превращений и термохимического взаимодействия компонент использовался итерационный алгоритм, разработанный для решения задач зажигания в условиях интенсивных физико-химических и фазовых превращений [22], а также при высокотемпературном локальном тепловом воздействии на конденсированное вещество [23, 24]. Задача испарения решалась методом последовательного накопления шага по времени [25]. Обоснование достоверности результатов моделирования выполнено проверкой баланса энергии в системе аналогично [26]. Исследования проводились при следующих исходных данных: $T_0(r, t) = 293$ К, $\rho_0 = 101325$ Па, $\eta_0 = 0$. Теплофизические характеристики углей [27, 28] приведены в таблице.

Теплопроводность, теплоемкость и плотность влажной и «обезвоженной» частей топлива рассчитывались с учетом объемных долей компонент:

$$\lambda_1 = \varphi_3 \lambda_3 + \varphi_4 \lambda_4, \quad \lambda_2 = \varphi_4 \lambda_4 + \varphi_5 \lambda_5,$$

$$C_1 = \varphi_3 \lambda_3 + \varphi_4 \lambda_4, \quad C_2 = \varphi_4 + \varphi_5 \lambda_5,$$

$$\rho_1 = \varphi_3 \rho_3 + \varphi_4 \lambda_4, \quad \rho_2 = \varphi_4 + \varphi_5 \lambda_5,$$

где: φ — объемная доля соответствующего компонента топлива: 3 — вода, 4 — уголь, 5 — водяные пары.

При подготовке водоугольного топлива возможно использование суспензий с различной концентрацией угля. Последняя может меняться в довольно широком диапазоне (от 50 до 80 %), массовая доля воды при этом составляет соответственно от 50 до 20 %. Как правило, содержание присадок и пластификаторов не превышает 1 % по массе [1–4]. Соответственно их влияние на характеристики и условия воспламенения незначительно.

Задачи численного анализа исследуемого процесса в рамках разработанной модели тепломассопереноса и химического реагирования состояли в определении влияния свойств угля (в зависимости от его марки и месторождения) на характеристики и условия зажигания частиц водоугольного топлива.

Результаты

В качестве базовой составляющей для ВУТ были выбраны угли трех месторождений: антрацит (А) Донецкого угольного бассейна [27, 28], уголь марки «Д» Кузнецкого угольного бассейна, бурый уголь марки «Б-2» Березовского месторождения [27, 28]. В результате численного моделирования установлены зависимости времен задержки зажигания (рис. 1) частиц ВУТ типичных размеров, выполненных из углей трех

Таблица

Теплофизические характеристики исследованных углей [27, 28]

Марка угля	Теплопроводность λ_4 , Вт/(м·К)	Теплоемкость C_4 , кДж/(кг·К)
Донецкий антрацит (А)	0,149	0,98
Кузнецкий уголь марки «Д»	0,134	1,38
Березовский бурый уголь «Б»	0,113	1,15

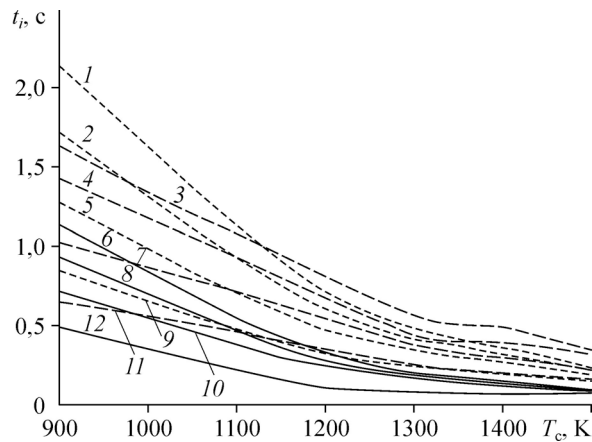


Рис. 1. Зависимость времени задержки зажигания от температуры внешней среды водоугольных частиц разных диаметров, полученных из углей различных марок.

Диаметры частиц: $1 \cdot 10^{-3}$ (1, 3, 6), $0,8 \cdot 10^{-3}$ (2, 4, 8), $0,6 \cdot 10^{-3}$ (5, 7, 10), $0,4 \cdot 10^{-3}$ (9, 11, 12) м;
 марки угля: 1, 2, 5, 9 — А Донецкого угольного бассейна, 3, 4, 7, 11 — «Д» Кузнецкого бассейна,
 6, 8, 10, 12 — бурый уголь Березовского месторождения, «Б-2».

перечисленных часто встречающихся на практике марок. Можно отметить наименьшие значения t_i частиц ВУТ на основе бурого угля во всем диапазоне изменения температуры внешней среды. Эта закономерность объясняется повышенной реакционной способностью углей марки «Б-2» из-за высокого содержания летучих и низкой теплопроводностью по сравнению с антрацитом [28].

Сравнение зависимостей $t_i(T_c)$ углей А и «Д» показывает, что в диапазоне умеренных температур ($T = 900\text{--}1150$ К) период индукции антрацитовых водоугольных частиц существенно выше, чем у таких же частиц из углей марки «Д» Кузнецкого угольного бассейна. Однако в диапазоне высоких температур ($T = 1150\text{--}1500$ К) соотношение t_i становится другим. На основании полученных результатов можно условно выделить два режима воспламенения: высокотемпературный и низкотемпературный. Возможно, это связано с тем, что в диапазоне температур внешней среды $T_c = 900\text{--}1150$ К основную роль в зажигании играет доля летучих, которых в угле марки «Д» больше, чем в угле А. При высоких температурах ($T_c = 1150\text{--}1500$ К) большое значение имеют эффективная теплопроводность и теплоемкость ВУТ. Последняя, например, у антрацита ниже (в 1,3 раза), чем у угля марки «Д» [27, 28].

Полученные в результате проведенного численного анализа данные в виде зависимостей времени задержки зажигания от температуры внешней среды соответствуют условиям топок типичных котельных агрегатов — высокой температуре окружающей частицу среды. По этой причине проведение экспериментов для получения возможности анализа закономерностей рассматриваемых процессов объективно затруднено. В литературе представлены результаты экспериментальных исследований по изучению зажигания частиц ВУТ только в условиях лазерного нагрева [29, 30]. Для косвенного обоснования достоверности полученных теоретических выводов проведено сопоставление с экспериментальными данными [29, 30] результатов решения задач (1)–(15), в постановке, в которой для соответствия условиям экспериментов [29, 30] было внесено изменение в граничное условие (12). Конвективное и лучистое слагаемое в правой части были заменены на плотность потока лазерного излучения q . Условие (12) приобрело вид:

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2(r_0, t)}{\partial r} = q.$$

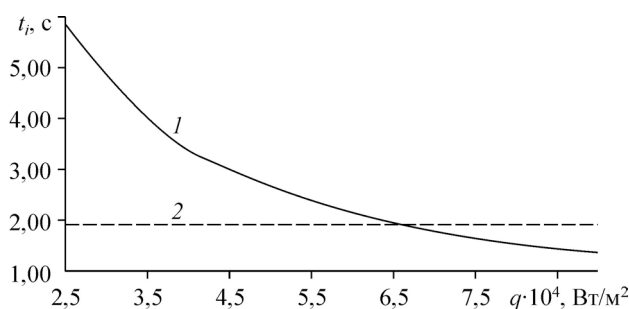


Рис. 2. Сравнение времен задержки зажигания частиц водоугольного топлива («Д» Кузнецкого бассейна), полученных при численном и экспериментальном [29, 30] исследованиях.

1 — численное решение, 2 — прямая $t_i(q)$, проходящая через точку, соответствующую экспериментальному значению t_i [29, 30].

В связи с отсутствием в работах [29, 30] полного описания всех необходимых для математического моделирования исходных данных проведен параметрический анализ, результаты которого приведены на рис. 2. В качестве варьируемого параметра выбрана величина q , которая зависит от мощности лазера, площади поперечного сечения лазерного луча и расстояния до частицы. На рис. 2 приведены результаты численного моделирования и прямая, проходящая через точку, соответствующую экспериментальному значению t_i [29, 30]. Представленные на рис. 2 зависимости дают основания для вывода о том, что если в экспериментах [29, 30] значение q соответствовало диапазону $5,5 \cdot 10^4 < q < 7,5 \cdot 10^4$ Вт/м², то расхождение экспериментальных и теоретических значений t_i не выходит за рамки доверительных интервалов экспериментов по зажиганию конденсированных веществ. Для сравнения можно провести установленные в работе [31] случайные ошибки измерения времен задержки зажигания группы высокоэнергетических конденсированных веществ при локальном нагреве одиночной нагретой до высоких температур частицей. Относительные среднеквадратические отклонения для t_i в [31] составляют $\pm 20 \div 25$ %. Можно достаточно обосновано предположить, что в рассматриваемых условиях лазерного нагрева частицы ВУТ погрешности определения t_i должны укладываться в близкий к установленному в работе [31] диапазон.

На рис. 3 приведены зависимости температуры поверхности частиц водоугольного топлива диаметром $d = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м трех исследовавшихся марок углей от времени. На каждой кривой можно выделить три характерных временных интервала. Первый (до t_v)

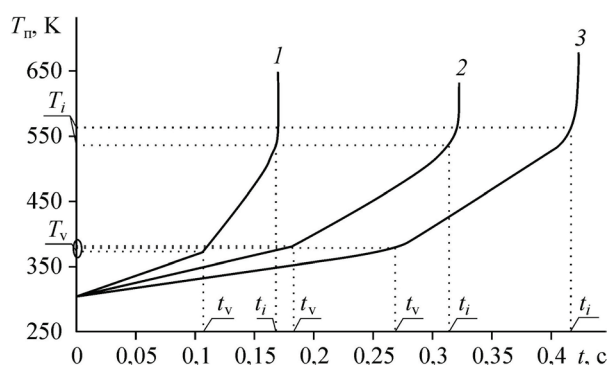


Рис. 3. Зависимость температуры поверхности (T_n) частицы ВУТ диаметром $d = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м от времени t , при температуре внешней среды $T_c = 1200$ К.

1 — бурый уголь Березовского месторождения марки Б-2, 2 — уголь А Донецкого угольного бассейна, 3 — уголь марки «Д» Кузнецкого бассейна.

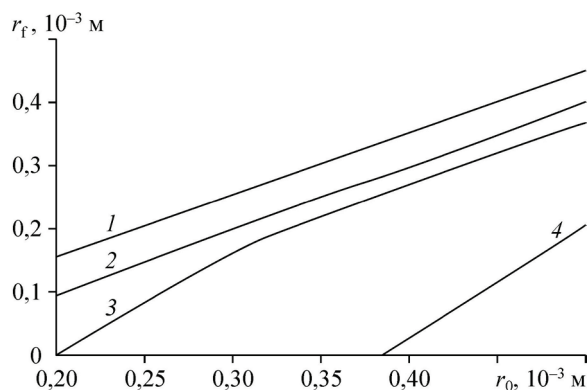


Рис. 4. Положение фронта испарения в момент воспламенения водоугольной частицы (бурый уголь Березовского месторождения марки Б-2) в зависимости от ее размеров при разных значениях температуры внешней среды.
 $T_c = 1500$ (1), 1200 (2), 1100 (3), 900 (4) К.

соответствует процессу влагоудаления из частицы. Стоит отметить характерное изменение наклона кривой $T_n(t)$ в точке (t_v, T_v) . Последняя соответствует моменту времени полного удаления влаги из топлива. Изменение наклона зависимостей $T_n(t)$ определяется в основном теплопроводностью влагонасыщенной части ВУТ. Второй интервал (до t_i) соответствует прогреву и термическому разложению сухого угля. В этом состоянии теплопроводность последнего существенно меньше (по сравнению с первым участком) и, соответственно, температура поверхности растет быстрее. При $t = t_i$ выполняется условие воспламенения ВУТ, температура поверхности соответствует значению T_i (температура зажигания частицы). В дальнейшем T_n растет до значений, соответствующих горению водоугольного топлива. Третий интервал ($t > t_i$) соответствует процессу устойчивого горения водоугольных частиц.

Положение фронта испарения в момент воспламенения приведено на рис. 4. Можно отметить, что возможно воспламенение водоугольных частиц на основе бурых углей до их полного «высыхания». Скорее всего, это связано с низкой теплопроводностью такого угля в сочетании с высоким содержанием летучих.

На рис. 5 приведены распределения температуры по радиусу частицы ВУТ в момент воспламенения, характеризующие состояние топлива. Можно отметить, что в условиях «низкотемпературного» режима ($T_c \leq 1100$ К) воспламенение происходит только после

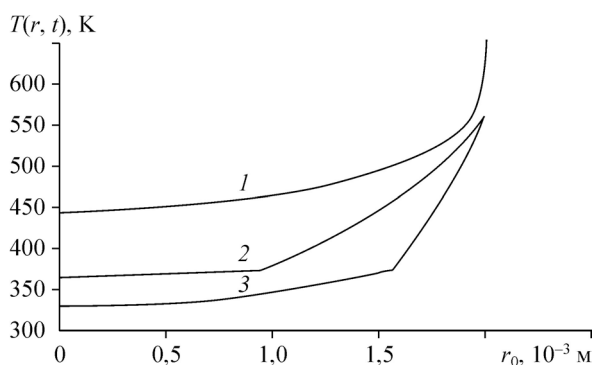


Рис. 5. Распределение температуры по радиусу частицы ВУТ (бурый уголь Березовского месторождения, марки Б-2) в момент воспламенения.
 $T_c = 900$ (1), 1200 (2), 1500 (3) К.

полного влагоудаления. При более высоких температурах внешней среды ($T_c > 1100$ К) ВУТ воспламеняется в условиях продолжающегося испарения. В зоне высоких температурных градиентов при этом возможно формирование слоя с большими термическими напряжениями и последующее механическое разрушение частицы аналогично механизму разрушения теплоогнезащитных материалов [32].

На рис. 5 можно отметить характерный излом на кривых 2 и 3, который соответствует границе фронта испарения. Вследствие резкого изменения теплофизических характеристик и поглощения теплоты в результате фазового перехода наклон кривых меняется. Температура при этом растет значительно быстрее.

Заключение

Численное моделирование совместного протекания основных теплофизических (испарение воды, теплопроводность, фильтрация) и термохимических (пиролиз органической части топлива, химическое взаимодействие углерода кокса и водяных паров, окисления продуктов реакций последних и термического разложения кислородом) реакций показало существенное влияние теплофизических и термохимических характеристик углей, являющихся базовым топливом ВУТ.

Установлено, что водоугольные частицы, выполненные из углей марки «Б» Березовского месторождения, воспламеняются с меньшими временами задержки зажигания, чем частицы ВУТ из антрацита. Скорее всего, это связано с высоким (по сравнению с антрацитом) содержанием летучих в бурых углях. Также важную роль играет более высокое термическое сопротивление последних.

Численный анализ показал, что возможны режимы воспламенения частиц водоугольного топлива, выполненного из Березовских бурых углей, в условиях их неполного «обезвоживания». Процесс горения таких частиц (в условиях продолжающегося испарения) будет существенно отличаться от горения сухого угля.

Список литературы

1. Делягин Г.Н., Ерохин С.Ф., Петраков А.П. ЭКОВУТ — новое экологически чистое топливо XXI века // Химия угля на рубеже тысячелетий: сб. тр. междунар. науч. конф. и шк.-семинара ЮНЕСКО, Клязьма, 13–15 марта 2000. В 2 ч. Ч. 1. М.: МГУ, 2000. С. 101–105.
2. Карпов Е.Г., Каменев И.П. Вариант использования водоугольного топлива на действующих ТЭС // Горение твердого топлива: тез. докл. VIII Всерос. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 13–16 нояб. 2012. Новосибирск: ИТ СО РАН, 2012. С. 64–65.
3. Делягин Г.Н., Климов С.Л., Горлов Е.Г. и др. Водоугольное топливо и перспективы его использования в энерго- и теплоэнергетике России. М.: ФГУП ЦНИИУголь, 2001. 103 с.
4. Баранова М.П., Кулагин В.А. Физико-химические основы получения топливных водоугольных суспензий: монография. Красноярск: СФУ, 2011. 159 с.
5. Гарковенко Е.Е., Семенов Е.В. Перспективы использования трубопроводного гидротранспорта при модернизации технологий углеобогащения // Уголь. 2007. № 12. С. 62–64.
6. Алексеенко С.В., Мальцев Л.И., Саломатов В.В. Топочное устройство для сжигания водоугольного топлива // Горение твердого топлива: сб. докл. VII всерос. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 10–13 нояб. 2009. В 3 ч. Ч. 2. Новосибирск: ИТ СО РАН, 2009. С. 4–7.
7. Патент 2389948 РФ МПК⁵¹ F 23 K 1/02. Устройство для сжигания водоугольного топлива / Алексеенко С.В., Кравченко И.В., Кравченко А.И., Мальцев Л.И., Самборский В.Е., Саломатов В.В.; заявитель и патентообладатель ООО «Теплопром». № 2009113840/06; заявлено 13.04.2009; опубликовано 20.05.2010.
8. Пат. 2518754 РФ МПК⁵¹ F 23 C 3/00, F 23 U 1/02. Устройство для сжигания водоугольного топлива (варианты) / Алексеенко С.В., Мальцев Л.И., Кравченко И.В., Кравченко А.И., Карташова Л.В.; заявитель и патентообладатель ООО «Протэн-К». № 2012137001/06; заявлено 29.08.2012; опубликовано 10.06.2014.
9. Патент 2389945 РФ МПК⁵¹ F 23 C 3/00. Топочное устройство для сжигания жидкого топлива / Мальцев Л.И., Алексеенко С.В., Кравченко И.В., Саломатов В.В., Кравченко А.И., Самборский В.Е.; заявитель и патентообладатель ООО «Завод стеновых блоков». № 2008131455/06; заявлено 31.07.2008; опубликовано 20.05.2010.
10. Алексеенко С.В., Кравченко И.В., Мальцев Л.И. Технология сжигания угля в виде водоугольной суспензии // Сб. тр. XIV междунар. науч.-практ. конф. / под ред. В.И. Клишина, З.Р. Исмагилова, В.Ю. Блюменштейна, С.И. Протасова, Г.П. Дубинина. Кемерово: Институт угля СО РАН, 2012.

11. Виллюнов В.Н. Теория зажигания конденсированных веществ. Новосибирск: Наука. 1984. 190 с.
12. Зельдович Я.Б., Лейпунский О.И., Либрович В.Б. Теория нестационарного горения пороха. М.: Наука, 1975. 132 с.
13. Сполдинг Д.Б. Основы теории горения. М., 1959. 320 с.
14. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. The influence of heat transfer conditions at the hot particle-liquid fuel interface on the ignition characteristics // J. of Engng Thermophys. 2009. Т. 18, № 2. Р. 162–167.
15. Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Моделирование зажигания жидкого топлива окальным источником нагрева в условиях выгорания жидкости // Химическая физика. 2011. Т. 30, № 8. С. 62–67.
16. Марков И.И., Хашенко А.А., Вечер О.В. О скорости испарения жидкости с ее свободной поверхности и с поверхности нагрева // Сб. научн. тр. МО РФ, СКГТУ, Северо-кавказское отделение технологических наук РФ. Ставрополь, 2002. Вып. 6. С. 48–55.
17. Salomatov V.V., Syrodoy S.V., Gutareva N.Y. Concentration organic components in the hydrocarbon fuel particles conditions and characteristic of ignition // EPJ Web of Conf. 2014. Vol. 76. P. 01018 (6 p.).
18. Сыродой С.В., Саломатов В.В., Кузнецов Г.В. Численное моделирование зажигания водоугольной частицы с учетом испарения влаги и эндотермического разложения твердой горючей компоненты // Ползуновский вестник. 2013. Т. 4, № 3. С. 28–32.
19. Саломатов В.В., Кравченко И.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Часть I. Стадия прогрева. Часть II. Стадия испарения. Часть III. Стадия воспламенения. Часть IV. Стадия выгорания // Горение и плазмохимия. 2007. Т. 5, № 3. С. 178–188. 2007. Т. 5, № 3. С. 189–197. 2008. Т. 6, № 1. С. 56–59. 2008. Т. 6, № 3. С. 171–178.
20. Huang Z. et all. Theoretical analysis on CWM drop combustion history // Proc. 8-th Intern. Symp. Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization. USA, Orlando, 1986. Part 1. P. 343–358.
21. Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численное моделирование твердофазного зажигания металлизированного конденсированного вещества нагретой до высоких температур частицей // Химическая физика. 2011. Т. 30, № 12. С. 35–41.
22. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. О возможности использования одномерной модели при численном анализе процесса зажигания жидкого конденсированного вещества одиночной нагретой частицей // Физика горения и взрыва. 2010. Т. 46, вып.6. С. 78–85.
23. Кузнецов Г.В., Мамонтов Г.В., Таратушкин Г.В. Численное моделирование зажигания конденсированного вещества нагретой до высокой температуры частицей // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 1. С. 78–85.
24. Кузнецов Г.В., Мамонтов Г.В., Таратушкин Г.В. Зажигание конденсированного вещества «горячей» частицей // Химическая физика. 2004. Т. 23, № 3. С. 67–72.
25. Salomatov V.V., Syrodoy S.V., Gutareva N.Y. Effect of structural heterogeneity water-coal fuel conditions and characteristics of ignition // EPJ Web of Conferences. 2015. Vol. 82. P. 01037 (5 p.).
26. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численное решение задачи воспламенения пожароопасного вещества одиночной «горячей» частицей // Физика горения и взрыва. 2009. Т. 45, вып. 5. С. 42–50.
27. Агроскин А.А., Глейбман В.Б. Теплофизика твердого топлива. М.: Недра, 1980. 256 с.
28. Бабий В.И., Куваев Б.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. М.: Энергоатомиздат, 1986. 208 с.
29. Burdukov A.P., Popov V.I., Fedoseenko V.D. The rheodynamics and combustion of coal-water mixtures // Fuel. 2002. Vol. 81. P. 927–933.
30. Бурдуков А.П., Карпенко Е.И., Попов В.И., Развальяев В.Н., Федосенко В.Д. Экспериментальное исследование динамики горения водоугольной суспензии // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 4. С. 62–66.
31. Захаревич А.В., Кузнецов В.Т., Кузнецов Г.В., Максимов В.И. Зажигание модельных смесевых топливных композиций одиночной, нагретой до высоких температур частицей // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44, вып. 5. С. 54–57.
32. Страхов В.Л., Гаращенко А.Н., Кузнецов Г.В., Рудзинский В.П. Математическое моделирование теплофизических свойств и термохимических процессов при горении вспучивающихся огнезащитных материалов // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37, № 2. С. 63–73.

*Статья поступила в редакцию 25 марта 2015 г.,
после переработки — 26 мая 2015 г.*