

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ С УЧЕТОМ ИСПАРЕНИЯ ВЛАГИ И ЭНДОТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ТВЕРДОЙ ГОРЮЧЕЙ КОМПОНЕНТЫ

С.В. Сыродой¹, В.В. Саломатов², Г.В. Кузнецов¹

Определены расчетом по разработанной математической модели параметры зажигания водоугольной частицы при подводе тепла совместно теплоизлучением и конвекцией, и отводе за счет испарения влаги на границе фронта фазового перехода и эндотермической реакции разложения твердого горючего. Полученные численные результаты коррелируют с данными экспериментальных исследований.

Ключевые слова: водоугольное топливо, воспламенение, зажигание и горение частиц.

Введение

В связи с Энергетической стратегией развития энергетики России до 2030 года планируется возврат к широкомасштабному использованию низкокачественных углей для тепло- и электрогенерации [1]. В результате возникают проблемы разработки новых инновационных технологий угольной энергетики. Одной из них является технология водоугольного топлива (ВУТ). Однако данная технология имеет ряд нерешенных вопросов, связанных с изучением процессов, сопровождающих воспламенение и горение частиц ВУТ.

Несмотря на, проведенные теоретические и экспериментальные исследования по зажиганию частицы ВУТ, на сегодняшний день воспламенение остается малоразработанной проблемой, связанной с построением более строгой математической модели. Сложности описания зажигания частицы ВУТ, заключаются в наличии большого количества влаги.

Данная особенность определяет некоторые специфические закономерности воспламенения ВУТ. Так, частица ВУТ характеризуется существенно меньшей температурой зажигания. Например, частица ВУТ, приготовленная из антрацита зажигается при температуре 425–440 °С, в то время как сухая частица угля той же марки воспламеняется при температуре 800–1000 °С [2–3].

Существующие модели зажигания частицы ВУТ, содержат в своей основе ряд существенных допущений, связанных с разделением процесса на отдельные стадии [4–6, 13]. Дальнейший поиск более точных параметров зажигания частицы ВУТ нами осуществлен с учетом испарения влаги и эндотер-

мического разложения горючей части угольного топлива.

Математическая модель зажигания частицы водоугольного топлива

Математическая модель зажигания частицы строится по следующей схеме: частица топлива, попадая в поток высокотемпературной среды, подсыхает у поверхности и подвергается термическому разложению, сопровождаемого выходом летучих, реакцией взаимодействия водяного пара с углеродом и окислением горючих компонентов на поверхности частицы (Рисунок 1).

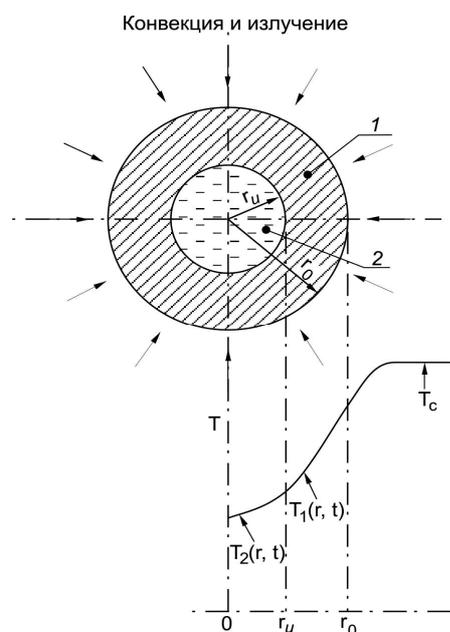
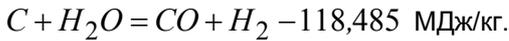


Рисунок 1 – Частица топлива в потоке высокотемпературной среды:
1– зона сухого углеродистого остатка;
2- зона исходного влажного топлива

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ
С УЧЕТОМ ИСПАРЕНИЯ ВЛАГИ И ЭНДОТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ
ТВЕРДОЙ ГОРЮЧЕЙ КОМПОНЕНТЫ**

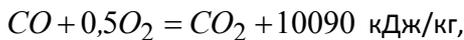
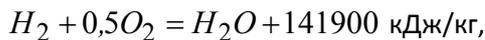
Скорость испарения нелинейно зависит от температуры на границе системы вода-пар. При испарении влаги в частице образуется твердый пористый угольный каркас, который пронизывается водяным паром, в результате между водяным паром и угольным каркасом осуществляется следующее химическое взаимодействие



Таким образом, в частице образуется две зоны (Рисунок 1) - зона сухого углеродистого остатка, пронизываемого водяными парами (цифра 1) и зона исходного влажного топлива (цифра 2).

После того как частица прогреется до температуры $\sim 170^\circ\text{C}$, начинается процесс термического разложения топлива, сопровождаемый выходом продуктов термической деструкции угля.

Горючие продукты газификации совместно с продуктами термического разложения диффундируют через поверхность частицы и вступают в реакцию воспламенения с внешним окислителем:



В нашей математической модели приняты следующие допущения:

1. Теплофизические свойства топлива постоянны.
2. Перенос тепла внутри капли одномерен.
3. Тепло к частице подводится совместно конвекцией и излучением.
4. Тело частицы сферической формы.

Система нестационарных дифференциальных уравнений данной модели при $0 < t < t_3$ включает уравнения:

- энергии подсушенной части с внутренним тепловыделением в приближении Буссинеска

$$\frac{\partial T_1(r,t)}{\partial t} = \kappa_1 \cdot \left[\frac{\partial^2 T_1(r,t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial T_1(r,t)}{\partial r} \right] + \sum Q_{хим} \cdot W - \nu_P C_{PP} \cdot \rho_P \frac{\partial T_1(r,t)}{\partial r},$$

$$t > 0, \quad r_0 < r < r_u, \quad T \geq T_u, \quad (1)$$

- энергии для влажной части топлива

$$\frac{\partial T_2(r,t)}{\partial t} = \kappa_2 \left[\frac{\partial^2 T_2(r,t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial T_2(r,t)}{\partial r} \right],$$

$$t > 0, \quad 0 < r < r_u, \quad T \leq T_u, \quad (2)$$

- химической кинетики для угольной компоненты топлива

$$\frac{\partial \eta_1(r,t)}{\partial t} = (1 - \eta(r,t)) \frac{Q_{хим} \cdot k_0}{C_{p1}} \times \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T_1(r,t)}\right), \quad (3)$$

- фильтрации для угольной компоненты

$$\frac{\partial p_P(r,t)}{\partial t} = \frac{m \xi Z}{K_P} \left(\frac{\partial p_P^2(r,t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p_P(r,t)}{\partial r} \right).$$

При постановке задачи рассматривалось граничное условие четвертого рода на фронте испарения:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_u+0} - \lambda_2 \frac{\partial T_2(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_u-0} =$$

$$= Q_{исп} W_{исп},$$

$$T_1(r_u, t) = T_2(r_u, t) = T_u. \quad (6)$$

Система уравнений (1-4) решалась при следующих начальных условиях

$$0 < r < r_0, \quad T(r,0) = \theta_0,$$

$$p(r,0) = p_0, \quad \eta(r,0) = \eta_0$$

и при следующих граничных условиях:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(r_0, t)}{\partial r} = \alpha [T_c - T_1(r_0, t)] +$$

$$+ \varepsilon \sigma [T_c^4 - T_1^4(r_0, t)] + \sum Q_i \cdot W_i,$$

$$\frac{\partial T_2(0, t)}{\partial r} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial p(r_u, t)}{\partial r} = \frac{K_P}{\mu} \nu_P(r_u, t), \quad (9)$$

$$p(r_0, t) = p_{атм}. \quad (10)$$

Скорость химической реакции W [кг/м²с] для различных взаимодействий находилась следующим образом:

- для реакции газификации ($C + H_2O$) по формуле [7]

$$W = 3,79 \cdot 10^4 c_i \rho_P \exp\left(-\frac{36207}{T_1(r,t)}\right); \quad (11)$$

- для реакции термического разложения

$$W = (1 - \eta(r,t)) k_0 \rho_2 \exp\left(-\frac{E}{R T_1(r,t)}\right); \quad (12)$$

- для реакций окисления горючих компонентов ($CO + O_2$; $CH_4 + O_2$; $H_2 + O_2$)

$$W = k_0 c_i \rho_3 \exp\left(-\frac{E}{RT_1(r,t)}\right). \quad (13)$$

Здесь ρ_3 – плотность горючих компонентов, определяемая уравнением состояния

$$\rho_3 = \frac{\mu_3 p_3}{RT(r_0; t)}; \quad (14)$$

ρ_p – плотность пара, которая находится аналогично

$$\rho_p = \frac{\mu_{PPP}(r,t)}{RT(r,t)}. \quad (15)$$

Скорость паровой фазы в пористой структуре находилась согласно закону Дарси

$$v_p = -\frac{K_p}{\xi} \frac{\partial p_p}{\partial r}. \quad (16)$$

Здесь θ_0, T_c – начальная температура частицы и температура окружающей среды, К; r_u, r_0 – радиус фронта испарения и радиус частицы; σ – константа излучения абсолютно черного тела; α – коэффициент конвективной теплоотдачи; κ_1, λ_1 – коэффициенты температуропроводности и теплопроводности исходной (влажной) части ВУТ; κ_2, λ_2 – коэффициенты температуропроводности сухой части; $W_{исп}$ – массовая скорость испарения, кг/м²с; $Q_{исп}$ – тепловой эффект испарения, Вт/кг; k_0 – предэкспонент скорости химической реакции, 1/с; v_p – скорость водяного пара; C_{pP} – изобарная теплоемкость водяного пара, Дж/кгК; ρ_p – плотность пара; p_p – давление паровой фазы внутри частицы; m – пористость частицы; Z – степень сжимаемости водяного пара, K_p – степень проницаемости пористой структуры, м²; μ – молярная масса; ξ – кинематическая вязкость водяных паров; c_i – концентрация i -го компонента.

Тепло подводимое к частице поглощается за счет фазового перехода на границе фронта испарения влаги, и эндотермической реакции термического разложения.

Координата границы испарения находилась из решения системы уравнений (1)-(10) по формуле:

$$r_{II} = r_0 - \int v_{ж} \cdot d\tau$$

где $v_{ж} = W_{исп}/\rho_{ж}$ – линейная скорость продвижения фронта испарения.

Массовая скорость испарения находилась из выражения [8]

$$W_{исп} = V_0 \cdot \exp\left(\frac{Q_{исп}(T_1 - T_0)}{RT_0 T_1}\right),$$

Здесь θ_0, V_0 – температура жидкости, соответствующая точке замерзания и скорость испарения при этой температуре, кг/м²с.

Метод решения и исходные данные

Система дифференцированных уравнений (1–10) аппроксимировалась методом конечных разностей с применением четырехточечной неявной схемы. К уравнению химической кинетики (3) применялся метод последовательных приближений [9]. Нелинейные разностные уравнения интегрировались методом итераций [10]. Начальные условия частицы ВУТ были следующими: $\theta_0 = 293$ К; $T_c = 1400$ К; $p_0 = p_{атм} = 101325$ Па; $\eta_0 = 0$.

В качестве базового материала для производства ВУТ был выбран антрацит Листвянского месторождения Новосибирской области [11].

Теплофизические свойства влажной и обезвоженной части топлива находились исходя из соотношения объемных долей составных частей каждой области:

$$\lambda_1 = \varphi_{воз} \lambda_{воз} + \varphi_{уг} \lambda_{уг}$$

$$\lambda_2 = \varphi_{вод} \lambda_{вод} + \varphi_{уг} \lambda_{уг}$$

где $\varphi_{уг}$ – объемная доля угля в частице, $\varphi_{воз}$ – объемная доля воздуха в частице, $\varphi_{вод}$ – объемная доля воды в частице.

Полученные результаты и их обсуждение

С целью оценки точности полученных решений по данной математической модели поставленной нелинейной задачи зажигания ВУТ при радиационно-конвективном подводе тепла, сопоставим полученные временные характеристики основных стадий термоподготовки с опубликованными экспериментальными данными по сжиганию водоугольного топлива [12].

На рисунке 2 приведено сравнение времени длительности стадии испарения влаги полученное путем численного решения системы уравнений (1-11) и известных экспериментальных результатов.

На рисунке 3 приведен сравнительный анализ влияния размера распыленных частиц ВУТ на время задержки зажигания частицы ВУТ.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ
С УЧЕТОМ ИСПАРЕНИЯ ВЛАГИ И ЭНДОТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ
ТВЕРДОЙ ГОРЮЧЕЙ КОМПОНЕНТЫ

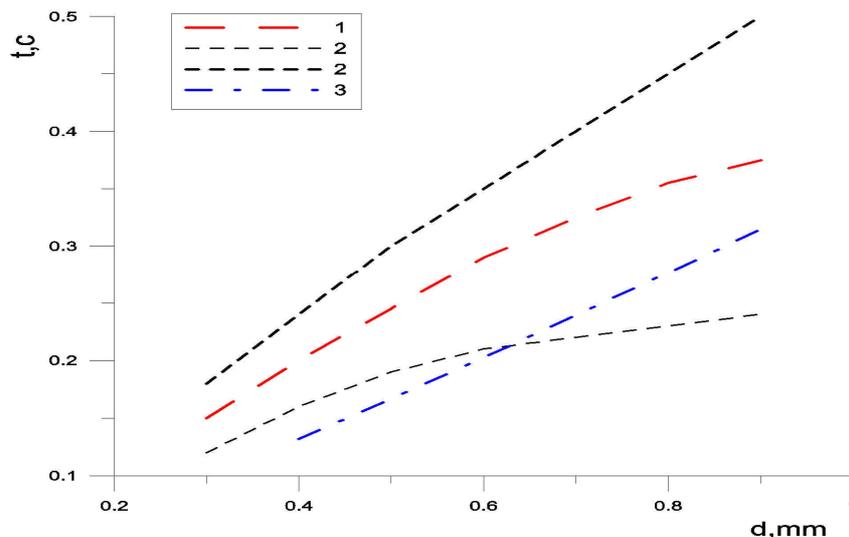


Рисунок 2 - Зависимость времени обезвоживания частиц от характерного размера распыленных частиц:
1 – время стадии испарения полученное экспериментально [12];
2 – кривые, определяющие максимальное отклонение экспериментальных данных [12];
3 – линия времени обезвоживания частицы ВУТ, полученного путём расчета системы(1-11).

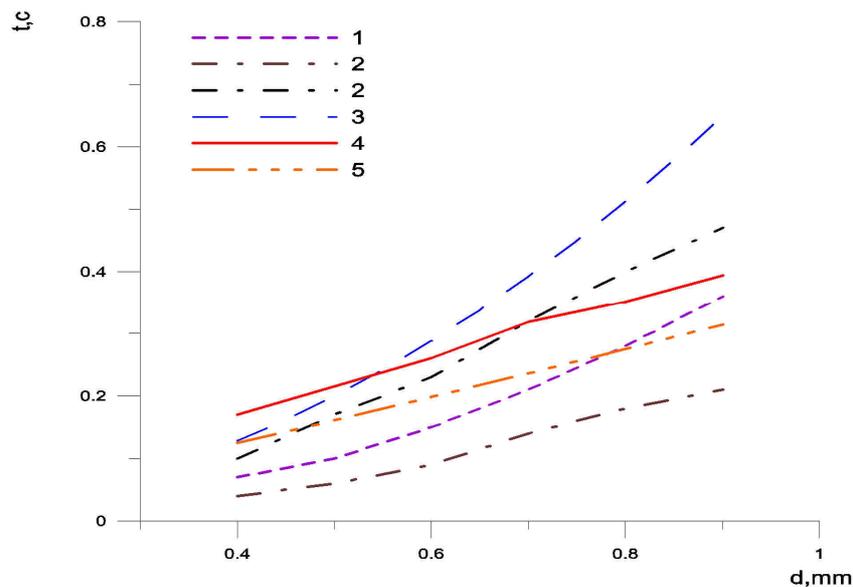


Рисунок 3 - Зависимость времени обезвоживания частиц от характерного размера распыленных частиц:
1 – время задержки зажигания частиц ВУТ, полученное экспериментально в [12];
2 – кривые, характеризующие предел разброс экспериментальных данных [12].
3 – время задержки зажигания, полученное из вышеописанной модели;
4 – время задержки зажигания, найденное из численного расчета системы (1-11);
5 – время задержки зажигания частицы ВУТ, без учета экзотермических эффектов испарения влаги и пиролиза сухой части топлива.

Анализ зависимостей на рисунке 2 показывает качественную согласованность численно полученных данных с данными полученными экспериментально [12]. Для частиц размеры, которых составляют $d=0.4\div 0.6$ мм рассогласование значений довольно велико, однако при увеличении размера частиц такое

разногласие сокращается. Так для частиц, диаметр распыла которых $d=0.6\div 0.7$, найденные значения по выше представленной математической модели и значения, представленные в известной литературе [12] согласуются в рамках технической погрешности.

Анализ связей представленных на ри-

сунке 3. показывает аналогичную ситуацию, что и на рис.2. Для частиц диаметр распыла, которых составляет $d=0,4-0,7$ мм, значения времен полученных путем численного расчет системы (1-11) и значений полученных экспериментально показывают качественную согласованность. При дальнейшем увеличении размера частицы такое рассогласование сокращается, для частиц с диаметром $d=0,7-0,9$ мм согласованность результатов не превышает технической погрешности. Такая же ситуация наблюдается и при сравнении результатов полученных численно и данных найденных с использованием эмпирических формул приведенных в [12-14].

Результаты решения системы уравнений (1-11), приведенные на рисунке 3 показывают качественную согласованность с результатами эксперимента.

Так же на рисунке 3 приведены результаты расчета времени зажигания частицы ВУТ, без учета тепловых эффектов идущих на испарения влаги и пиролиза сухой угольной компоненты. Как видим данные эффекты, ускоряют процесс зажигания частицы, тем самым оказывают существенное влияние практически на все стадии термopодготовки частицы ВУТ.

Выводы

В заключение хочется отметить, что воспламенение частицы водоугольного топлива остается все еще малоизученной задачей. В работе впервые представлена более детальная математическая модель, учитывающая фронтальную природу испарения влаги, внутренний тепломассоперенос, химическое взаимодействие водяных паров с пористым угольным каркасом и так же термическую деструкцию угля.

Полученные численные данные применимы для оценки параметров зажигания водоугольной частицы в условиях учета таких факторов как радиационно-конвективный теплообмен, испарение внутренней влаги топлива, эндотермических реакция пиролиза и газификации водяными парами угольной компоненты, что делает расчет более информативным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саломатов В.В. Состояние и перспективы угольной и ядерной энергетик России // Теплофизика и аэромеханика.– 2009.– Т.16, №4.– С. 531-544.

2. Третьяков В.М. Исследования воспламенения взрывзвеси 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 // Горение и плазмохимия: – ч. 1, 2007, вып. 3, с. 178-188; – ч. II, 2007, вып. 3, С. 187-197; – ч. III, 2008, вып. 1, С. 56-59; – ч. IV, 2008, вып. 4, с. 178-187.

5. Huang Z. et all. Theoretical analysis on CWM drop combustion history // Proc. 8-th Intern. Symp. Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization. USA, Orlando. Part 1. – 1986. – p. 343-358.

6. Matthews K.J., Jones A.R. The effect of coal composition on coal-water slurry combustion and ash deposition characteristics // Proc. 8-th Intern. Symp. Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization. USA, Orlando. Part 1. 1986. – p. 388-407.

7. Гремячкин В.М. О взаимодействии пористой частицы углерода с водяным паром// Химическая физика.- 2007.- Т.26, № 5.- С. 26-33.

8. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкости, Л., 1975.

9. Бахвалов Н.С. Численные методы. М.: Наука, 1975.

10. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983. – 616 с.

11. Антрациты Листвянского месторождения – коллект. Монография / под ред. Юдницкого Г.Е. – М.: Недра, 1999. – 207 с.

12. Бабий, В.И. Воспламенение и горение капель водоугольной суспензии / В.И. Бабий, В.М. Барабаш, А.М. Хидиятов, В.А. Степашина // Мат. 9 Всерос. симп. по горению и взрыву. – Черногловка. – 1989. – С. 56–59.

13. Саломатов В.В., Рычков А.Д., Саломатов В.В. Экспериментальное исследование и математическое моделирование аэродинамики, тепло-массообмена, излучения и горения дробленого топлива и циркулирующем кипящем слое // Ползуновский вестник.- 2010.- № 1.- С. 60-71.

14. Красинский Д.В., Саломатов В.В., Энжаргал Х. Предпроектное обоснование параметров КЭС мощностью 4800 МВт на угле ШивЭ-Овооского месторождения Монголии // Ползуновский вестник.- 2012.- № 3/1.- С. 22-30.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 110800364.

Сыродой С.В.¹, аспирант,
Кузнецов Г.В.¹, д.ф.-м.н., проф.,
e-mail: elf@tpu.ru

Саломатов В.В.², д.т.н., проф.,
главный научный сотрудник,
e-mail: vs@itp.nscf.ru

¹Томский национальный исследовательский политехнический университет, г. Томск

²Институт теплофизики им. С.С.Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск