

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ
ЧАСТИЦЫ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА**

С.В. Сыродой

Научный руководитель: профессор, д.ф-м.н. Г.В. Кузнецов
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050
E-mail: ssyrodoy@yandex.ru

MATHEMATICAL SIMULATION OF IGNITION PARTICLE OF COAL-WATER FUEL

S.V. Syrodoy

Supervisor: professor, doctor of sciences. G.V. Kuznetsov
National Research Tomsk Polytechnic University,
Russia, Tomsk, Lenin Avenue 30, 634050
E-mail: ssyrodoy@yandex.ru

The problem of particle ignition coal-water fuel (CWF) is solved. The equation of heat and mass transfer are considered both inside and outside the particle. The model takes into account the heterogeneous reaction inside the porous and homogeneous reaction outside the particle. According to the results of numerical simulation of the conditions for the ignition characteristics and particle CWF sufficiently typical combustion condition. The obtained values of the ignition delay time are in good agreement with published experimental data

Зажигание частиц водоугольного топлива представляет собой комплекс совместнопротекающих физико-химических процессов (испарение влаги, сложный тепломассоперенос, термическое разложение твердого топлива, химическое взаимодействие углеродистых продуктов пиролиза с водяным паром, окисление газообразных горючих компонентов на поверхности частицы и др.) [1-5].

В данной работе решалась задача воспламенения частицы ВУТ с учётом совместного протекания основных стадий термической подготовки (прогрев, влагоудаление, термическое разложение, зажигание), и наличием таких эндотермических эффектов, как фильтрация пара сквозь пористую структуру и его химического взаимодействия с углеродом кокса.

Рассматривалась система «частица топлива – высокотемпературная среда (продукты сгорания)». Тепло подводится к телу частицы совместно конвекцией и излучением. Система нестационарных дифференциальных уравнений, описывающая процесс зажигания:

$$\begin{aligned}\frac{\partial T_2(r,t)}{\partial t} &= a_2 \left[\frac{\partial^2 T_2(r,t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial T_2(r,t)}{\partial r} \right] \quad t > 0, \quad 0 < r < r_H, \quad T \leq T_H; \\ \frac{\partial T_1(r,t)}{\partial t} &= a_1 \cdot \left[\frac{\partial^2 T_1(r,t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial T_1(r,t)}{\partial r} \right] + \sum Q_i \cdot W_i - u_s C p_s \cdot \rho_s \cdot \frac{\partial T_1(r,T)}{\partial r}; \quad t > 0, \quad r_E < r < r_0, \quad T \geq T_E \\ \frac{\partial \eta_1(r,t)}{\partial t} &= (1 - \eta(r,t)) \cdot k_0 \cdot \rho \cdot \exp \left(- \frac{E}{R \cdot T_1(r,t)} \right); \\ \frac{\partial p_s(r,t)}{\partial t} &= \frac{m \cdot \xi \cdot Z}{K_p} \left(\frac{\partial p_s^2(r,t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p_s(r,t)}{\partial r} \right)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_1 \frac{\partial T_1(r,t)}{\partial r} - \lambda_2 \frac{\partial T_2(r,t)}{\partial r} &= Q_{\text{ЭНТ}} \cdot W_{\text{ЭНТ}}; \quad T_1(r_{\text{Э}}, t) = T_2(r_{\text{Э}}, t) = T_{\text{Э}} \\ 0 < r < r_0; \quad T(r, 0) &= T_0; \quad P(r, 0) = P_0; \quad \eta(r, 0) = \eta_0; \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1(r_0, t)}{\partial r} &= \alpha \cdot [T_c - T_1(r_0, t)] + \varepsilon \cdot \sigma \cdot [T_c^4 - T_1^4(r_0, t)] + \sum_i Q_i \cdot W_i \\ \frac{\partial T_2(0, t)}{\partial r} &= 0 \quad \frac{\partial P(r_{\text{И}}, t)}{\partial r} = \frac{K_p}{\nu} V_p(r_{\text{И}}; t) \quad p(r_0; t) = p_0 \end{aligned}$$

где: $\sum Q_i \cdot W_i$ – сумма эндотермических и экзотермических эффектов химических реакций, проходящих как внутри частицы при её пиролизе и химическом взаимодействии углерода с водяным паром, так и на её поверхности при воспламенении. Для определения скоростей таких химических реакций использовалась Аррениусовская зависимость:

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

Скорость пиролиза угольной компоненты частицы определялась из следующего выражения:

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

Скорость фильтрации пара сквозь пористую структуру определялась по закону Дарси:

$$u = -\frac{K_p}{\nu} \frac{\partial P}{\partial r}$$

Координата границы испарения находилась из выражения:

$$r_{\text{Э}} = r_0 - \int u_{\text{Э}} \cdot d\tau; \quad \text{где } u_{\text{Ж}} = \frac{W_{\text{ИСП}}}{\rho_{\text{Ж}}} \quad \text{– линейная скорость продвижения фронта испарения, } \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Массовая скорость испарения вычислялась из выражения [4]:

$$W_{\text{ИСП}} = V_0 \cdot \exp\left(\frac{Q_{\text{ИСП}} \cdot \mu \cdot (T_1 - T_0)}{R \cdot T_0 \cdot T_1}\right)$$

где T_1 – температура на границе испарения; T_0 – температура жидкости, соответствующая точке замерзания; W_0 – скорость испарения при температуре T_0 ; μ – молярная масса водяного пара; R – универсальная газовая постоянная.

Результаты и их обсуждение По представленной выше математической модели численными методами были получены характерные времена воспламенения частиц ВУТ размерами от 400 до 900 мкм, выполненных из антрацита Листвянского месторождения Новосибирской области [5].

Анализ результатов, представленных на рис.1,

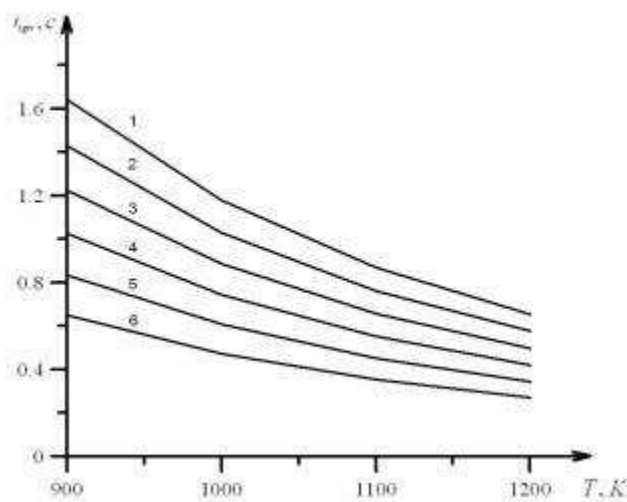


Рис.1. Зависимость времени задержки зажигания в различных условиях теплообмена для частиц различного диаметра кривые соответствуют следующим диаметрам частиц:

1 – $0,9 \cdot 10^{-3}$ м, 2 – $0,8 \cdot 10^{-3}$ м, 3 – $0,7 \cdot 10^{-3}$ м, 4 – $0,6 \cdot 10^{-3}$ м, 5 – $0,5 \cdot 10^{-3}$ м, 6 – $0,4 \cdot 10^{-3}$ м,

показывает, что зависимости $t_{\text{ign}} = \varphi(T_c, \delta)$ существенно отличаются от аналогичных зависимостей для обычных твердых конденсированных веществ [17], которые отражают экспоненциальный характер связи

скорости химической реакции воспламенения и температуры. Полученные результаты (рис.1) обусловлены, скорее всего, 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. То есть, режим процесса воспламенения частицы ВУТ не являются «кинетическим» (по определению [6]).

Также его нельзя классифицировать и как диффузионный [6]. Анализ связей $t_{ign} = f(TC; \delta)$ представленных на рис.1. показывает, что воспламенение частицы ВУТ является следствием комплекса взаимосвязанных процессов термической подготовки (влагоудаление, фильтрация паров сквозь пористый каркас) и химических реакций (термическое разложение угля; взаимодействие паров воды с углеродом кокса, образующегося при пиролизе, взаимодействие газообразных продуктов термического разложения угля с окислителем внешней среды).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Саломатов В.В., Кравченко И.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Ч.2. Стадия испарения // Горение и плазмохимия. – 2007. – Т. 5. – вып. 3. – С. 189–197.
3. 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.
4. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкости, Л., 1975.
5. Антрациты Листвянского месторождения – коллект. монография / под ред. Юдницкого Г.Е. – М.: Недра, 1999. – 207 с.
6. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике (3-е издание). – М.: Наука, 1987.