

УДК 536.46

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ СУШКЕ И ТЕРМИЧЕСКОМ РАЗЛОЖЕНИИ ЧАСТИЦЫ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

¹Саломатов В.В., ²Кузнецов Г.В., ²Сыродой С.В.

¹Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Выполнено численное моделирование комплекса процессов теплопереноса с фазовым переходом и химической реакцией термического разложения при радиационно-конвективном нагреве частицы водоугольного топлива (ВУТ). Установлены масштабы влияния условий теплообмена на характеристики испарения.

Введение

В последнее время в топливном балансе современной энергетики все большую роль для теплоэлектрогенерации начинает занимать низкокачественный уголь [1]. Такой уголь, как правило, характеризуется высоким содержанием золы и влажности. Соответственно, возникают проблемы, обусловленные подготовкой данного топлива к сжиганию, а также вопросы, связанные с его воспламенением и поддержанием устойчивого горения, а также с экологией. Одним из путей преодоления обозначенных трудностей является сжигание данного угля в виде водоугольного топлива. Водоугольное топливо (ВУТ) представляет собой гетерогенную структуру, состоящую из равномерно распределенного и мелко измельченного угля и воды [2].

Несмотря на то, что водоугольное топливо насчитывает свою историю с 60-ых годов XX столетия [3], на сегодняшний день многие исследовательские задачи, связанные, в первую очередь, с нахождением физических и режимных характеристик сжигания ВУТ как многостадийного процесса, остаются не решенными. Одной из малоизученных стадий является стадия сушки. Теоретические модели, разработанные для описания процесса сушки, содержат ряд существенных упрощений. В частности, принимаются равновесные параметры двухфазной системы «жидкость-пар», температура фазового перехода на границе фронта испарения считается «замороженной» и др.

В [4] дано теоретическое описание сжигания частицы ВУТ, в котором выделено 4 основные стадии:

1. Прогрев;
2. Испарение влаги;
3. Выход и сгорание летучих веществ;
4. Выгорание углерода.

Показано, что стадия прогрева заканчивается при температуре поверхности частицы $\sim 110^\circ\text{C}$. За тем наступает второй этап, на котором происходит испарение с поверхности частицы, распространяющееся вглубь частицы. Результатом данной работы стала возможность оценки временных параметров, характе-

ризирующих все четыре стадии. Для частицы ВУТ диаметром 1500 мкм, находящейся в топочной среде с температурой 900 °С, были рассчитаны следующие параметры: стадия прогрева заканчивается через 1 с, стадия испарения продолжается около 3,5 с, третья стадия длится примерно 8 с, стадия выгорания завершается примерно через 30 с.

Обширный объем теоретических и экспериментальных исследований выполнили К.Дж. Мэтьюс и А.Р. Джонс [5]. На опытной установке исследовались процессы газификации и горения частиц ВУТ, которые подвешивались в воздушной среде и нагревались излучением. Частицы ВУТ с размерами 200÷700 мкм были выполнены из различных сортов углей. В результате исследований были выделены следующие стадии сжигания:

1. выход летучих веществ;
2. начало распухания частицы топлива;
3. конец распухания частицы топлива;
4. конец процесса выхода летучих веществ;
5. начало процесса выгорания;
6. конец процесса выгорания.

Основываясь на экспериментальных результатах в [5] был сделан вывод, что количество летучих веществ не определяют реакционную способность разных ВУТ.

Дальнейшие исследования по сжиганию частиц водоугольного топлива были сделаны Б.В. Канторовичем и Г.Н. Делягиным [6], которыми было доказано, что одной из особенностей сжигания ВУТ является его высокая реакционная способность. Например, частица ВУТ из антрацита воспламеняется при температуре ~490°С, в то время как сухой антрацит загорается при температуре 800-1000°С. Выявленная особенность объясняется тем, что молекулы углерода вступают в устойчивую связь с молекулами воды, в результате данного эффекта образуются комплексы с низкой энергией активации, что резко снижает температуру воспламенения ВУТ по отношению к сухому углю той же марки, из которого изготовлено исследуемое водоугольное топливо.

Вода оказывает существенное влияние на процесс воспламенения и горения частицы ВУТ. Необходимо отметить, что вследствие малой теплопроводности в зоне сухого остатка частицы зона испарения воды находится в непосредственной близости к зоне горения, следовательно, сухая часть топлива постоянно пронизывается струями водяного пара, в результате резкого увеличения объема пара в зоне испарения растет давление, и как следствие, растет температура на поверхности.

Важной особенностью горения частиц водоугольного топлива является то, что при температуре пара свыше 1000°С продукты реакции термического разложения взаимодействуют с водяными парами. Такие реакции имеют меньшую энергию активации. В результате создаются условия для быстрого воспламенения и более полного выгорания частицы водоугольного топлива.

Рассмотренные выше особенности учитываются при моделировании горения частицы водоугольного топлива в работе [4]. Частица ВУТ, попадая в поток газа с высокой температурой, быстро подсыхает у поверхности, и как следствие внутри частицы образуются следующие зоны:

1. прогрева частицы ВУТ до температуры кипения воды на поверхности;
 2. испарения воды, граница которой определяется изотермами начала и конца кипения воды;
 3. термического разложения угля и начала реакции углерода с водяными парами;
 4. горения угля и разложение водяного пара;
 5. сгорания продуктов реакции окисления угля.
- Но предлагаемая математическая [4] модель не была реализована полностью.

Наиболее подробно была изучена частная задача, сводившаяся к рассмотрению двух стадий горения частицы ВУТ:

1. испарение влаги при температуре ниже температуры воспламенения;
2. горение частицы ВУТ при постоянной температуре на поверхности.

Проведенные исследования показали, что процесс горения частицы ВУТ размером 0.2–0.4 мм проходит через обе стадии, но вторая стадия является определяющей по времени всего процесса.

Краткий анализ работ по сжиганию частицы ВУТ свидетельствует о том, что требуется продолжить более детальное рассмотрение в теоретическом плане таких стадий, как сушка и термическое разложение угольной фракции в этом сложном процессе.

Постановка задачи

Рассматривается система «частица ВУТ–высокотемпературный газ». Тепловой поток подводится равномерно к поверхности частицы (рис. 1).

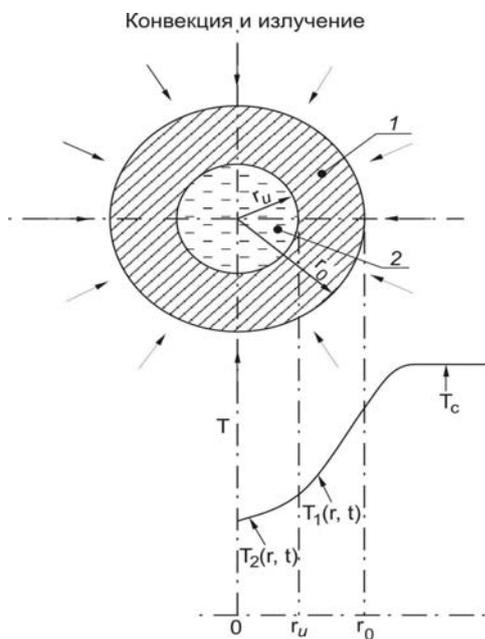


Рис. 1. Схема области решения задачи.
1. Сухой слой. 2. Исходная ВУТ.

Под воздействием высокотемпературного потока, подводимого к поверхности частицы ВУТ, происходит испарение влаги и термическое разложение подсушенной части топлива. В рамках рассматриваемой математической модели были приняты следующие предположения:

- теплофизические свойства топлива постоянны;
- перенос тепла внутри частицы одномерен;
- тепло подводится конвекцией и излучением;
- реакция воды с углеродом не учитывается.

Система нестационарных дифференциальных уравнений при $0 < t < t_c$ включает:

– уравнение энергии для сухой части

$$(1) \frac{\partial T_1(r,t)}{\partial t} = a_1 \left[\frac{\partial^2 T_1(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_1(r,t)}{\partial r} \right] + (1 - \eta(r,t)) \frac{Q_{хим} \cdot k_0}{C_{p1}} \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T_1(r,t)}\right)$$

$t > 0 \quad r_H < r < r_1 \quad T > T_H$;

где r_H – пространственная координата границы испарения, м.

– уравнение химической кинетики для угольной компоненты топлива

$$(2) \frac{\partial \eta(r,t)}{\partial t} = (1 - \eta(r,t)) \frac{Q_{хим} \cdot k_0}{C_{p1}} \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T_1(r,t)}\right)$$

– уравнение энергии для исходной части топлива

$$(3) \frac{\partial T_2(r,t)}{\partial t} = a_2 \left[\frac{\partial^2 T_2(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_2(r,t)}{\partial r} \right]$$

$t > 0 \quad r_0 < r < r_H \quad T > T_H$;

с начальными: $(T(r,0)=T_0)$; и граничными условиями:

$$(4) -\lambda_1 \frac{\partial T_1(r_0,t)}{\partial r} = \alpha \cdot [T_c - T_1(r_0,t)] + \varepsilon \cdot \sigma \cdot [T_c^4 - T_1^4(r_0,t)]$$

– граничные условия четвертого рода на границе испарения:

$$(5) \lambda_1 \frac{\partial T_1(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_u+0} - \lambda_2 \frac{\partial T_2(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_u-0} = Q_{исп} \cdot W_{исп};$$

$$(5') T_1(r_u,t) = T_2(r_u,t) = T_u$$

– условие симметрии

$$(6) \frac{\partial T_1(0,t)}{\partial r} = 0$$

1 – зона сухой части топлива.

2 – зона исходного топлива.

T_0 – начальная температура частицы, К; T_c – температура окружающей среды, К; σ – константа излучения абсолютно черного тела $5,67 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 K^4}$; α –

коэффициент конвективной теплоотдачи $\frac{Вт}{м^2 K}$; a – коэффициент температуропроводности исходной части ВУТ, $\frac{м^2}{с}$;

a – коэффициент температуропроводности сухой части, $\frac{м^2}{с}$; λ_1 – коэффициент теплопроводности исходной части ВУТ $\frac{Вт}{м K}$;

λ_2 – коэффициент теплопроводности сухой части ВУТ, $\frac{Вт}{м K}$; $W_{исп}$ –

массовая скорость испарения $\frac{кг}{м^2 c}$; $Q_{исп}$ – тепловой эффект испарения Вт/кг, k_0 –

предэкспонент химической реакции термического разложения $\frac{1}{с}$, $Q_{хим}$ – тепловой эффект реакции термического разложения, ε – степень черноты частицы ВУТ.

Поглощение, подводимой к частице, энергии учитывалось за счет введения в граничное условие (4) произведения $Q_{исп} \cdot W_{исп}$ и за счет эндотермической реакции разложения сухой части топлива. Координата границы испарения находилась из решения системы уравнений (1)-(6) по формуле:

$$\xi = L - \int v_{ж} \cdot d\tau$$

Где: $v_{ж} = \frac{W_{исп}}{\rho_{ж}}$;

Скорость испарения находилась по формуле [5]:

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

Где:

T_1 – Температура на границе испарения;

T_0 – Температура замерзания;

V_0 – Скорость испарения при температуре замерзания;

μ – Молярная масса водяного пара;

R – Универсальная газовая постоянная.

С целью обобщенного исследования приведем систему (1–6) к безразмерному виду, для чего выберем для переменных параметров задачи масштабы, фигурирующие в условиях однозначности.

В результате такого преобразования уравнения примут вид:

$$(1') \frac{1}{Fo_1} \frac{\partial \Theta_1(R, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_1(R, \tau)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_1(R, \tau)}{\partial R} + (1 - \eta(R, \tau)) \cdot Pom(\tau)$$

$$R_u(Fo) < R < 1, \quad \Theta > 1, \quad Fo > 0;$$

$$(2') \frac{1}{Fo_2} \frac{\partial \Theta_2(R, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_2(R, \tau)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_2(R, \tau)}{\partial R}$$

$$0 < R < R_u(Fo), \quad \Theta < 1, \quad Fo > 0;$$

$$(3') \frac{\partial \Theta_2(0, Fo)}{\partial R} = 0;$$

$$(4') \frac{\partial \Theta_1(1, Fo)}{\partial R} = Bi_1 \cdot [\Theta_c - \Theta_1(1, Fo)] + Sk \cdot [\Theta_c^4 - \Theta_1^4(1, Fo)]$$

$$(5') \frac{\partial \Theta_1(R_u, Fo)}{\partial R} - K_\lambda \frac{\partial \Theta_2(R_u, Fo)}{\partial R} = Ki(\tau)$$

$$(5'') \Theta_1(R_u, Fo) = \Theta_2(R_u, Fo)$$

Где: $K_\lambda = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$; $Fo = \frac{at}{L^2}$; $\Theta = \frac{T}{T_c}$; $Ki(\tau) = \frac{Q_{исп} \cdot W_{исп}(\tau) \cdot L}{\lambda_1 \cdot T_c}$; $Sk = \frac{\sigma_{пп} \cdot T_c^3 \cdot L}{\lambda_1}$; $R = \frac{R}{L}$; $L = R_1 - R_2$

$$Pom(\tau) = \frac{Q_{хим} \cdot k_0}{C_p}$$

K_λ – безразмерный комплекс, характеризующий изменение переход через границу испарения; Fo – критерий Фурье; Θ – безразмерная температура; $Ki(\tau)$ – критерий Кирпечева; Sk – критерий Старка; Bi – критерий Био; $Pom(\tau)$ – критерий Померанцева; R – безразмерный радиус частицы; L – характерный размер. Для определения критерия Фурье в качестве масштаба времени бралось предполагаемое время полной сушки частица водоугольного топлива.

Результаты и обсуждение

Численное моделирование процесса сушки проводилось для частицы ВУТ радиусом $r = 10^{-3} \text{ м}$. Начальная температура частицы $T_0 = 300 \text{ К}$. Теплофизические свойства материала соответствовали Донецкому углю марки «Д»[6]:

$$\lambda = 2.750 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; C_p = 662,5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \rho = 2260 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

Тепловой эффект химической реакции $Q_{\text{хим}} = 5 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$; предэкспонент $k_0 = 212 \text{ 1/с}$. энергия активации термического разложения $E = 60,6 \cdot 10^3 \text{ Дж/моль}$.

Теплофизические свойства исходной части ВУТ определялись как среднеарифметическое значение между теплофизическими свойствами угля и воды с учетом соотношения массовых долей веществ, составляющих частицу ВУТ:

$$\lambda_1 = 1655 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; C_{p1} = 2426 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \rho_1 = 1630 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Теплофизические свойства сухой части ВУТ определялись как среднеарифметическое значение между теплофизическими свойствами угля и воздуха с учетом соотношения массовых долей веществ, составляющих частицу ВУТ:

$$\lambda_2 = 1.3907 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; C_{p2} = 662,5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \rho_2 = 1130,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

При численном моделировании процесса сушки исследовалось влияние внешних факторов, таких как температура окружающей среды и интенсивность теплообмена на скорость сушки частицы водоугольного топлива. Температура окружающей среды варьировалась в достаточно широком диапазоне ($T_c = 900 \div 1500 \text{ К}$)

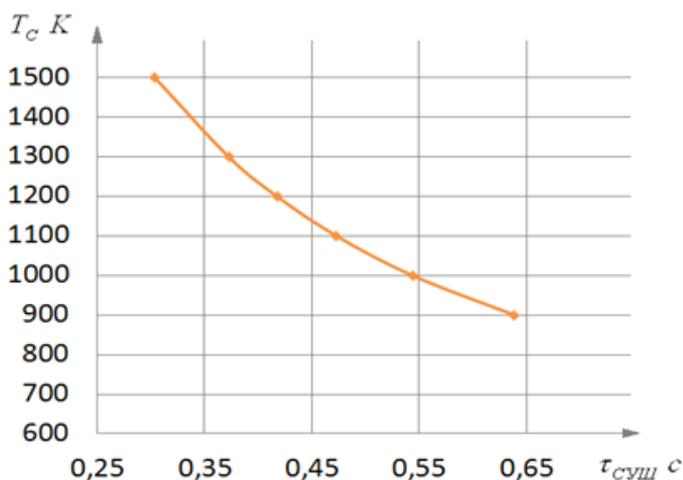


Рис. 2. Зависимость времени полной сушки от температуры окружающей среды

На (рис. 2) приведены результаты численного моделирования процесса сушки с учетом термического разложения частицы ВУТ. Увеличение температуры окружающей среды приводит к уменьшению времени полного высыхания частицы ВУТ. Итак, существует следующая особенность: каждое последующее приращение температуры приводит к меньшему эффекту прироста скорости сушки. Например, увеличение температуры окружающей среды T_c с 900°C до 1000°C дает прирост скорости сушки на 15%, а при дальнейшем увеличении температуры окружающей среды прирост скорости сушки уменьшается. Так при изменении температуры с 1100°C до 1200°C скорость сушки увеличивается только на 13%.

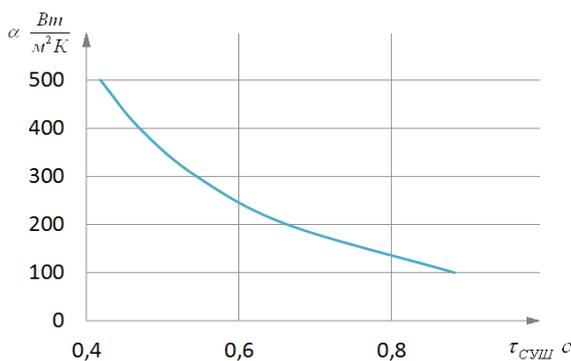


Рис. 3. Зависимость времени сушки от интенсивности теплообмена

На (рис. 3) приведены результаты численного моделирования, показывающие зависимость времени сушки частицы ВУТ от интенсивности теплообмена на границе. Моделирование процесса проводилось в широком диапазоне значения коэффициента теплоотдачи α ($100 \div 500$) $Вт/м^2К$ при температуре окружающей среды $T_c = 1200К$.

Увеличение интенсивности теплообмена сокращает время сушки.

Также как и в случае с ростом температуры окружающей среды, каждое последующее увеличение коэффициента теплоотдачи дает меньший эффект прироста в скорости сушки частицы водоугольного топлива. Например, увеличение коэффициента теплоотдачи α с 100 до 200 $Вт/м^2К$ дает прирост в скорости сушки на 25%, а увеличение α с 200 до 300 $Вт/м^2К$ дает прирост скорости сушки частицы ВУТ всего на 18%.

Основные выводы

В результате моделирования сушки и термического разложения частицы водоугольного топлива были выделены характерные особенности по времени сушки в зависимости от внешней температуры и интенсивности теплообмена частицы ВУТ. Установлен нелинейный характер таких связей. Впервые используется комплексная модель испарения и термического разложения угольной компоненты в условиях радиационно-конвективного теплообмена. Полученные результаты могут быть использованы при обосновании конструктивных и режимных параметров топочных устройств котлов, работающих на водоугольном топливе.

Литература

1. Саломатов В.В. Состояние и перспективы угольной и ядерной энергетик России // Теплофизика и аэромеханика. – 2009. – Т.16, №4. – С. 531-544.
2. А.Г. Морозов. Н.В. Коренюгина–Гидроударные технологии для получения водоугольного топлива//Новости теплоснабжения.-2010.-№7-С.18-21.
3. Иванов В.М. Канторович Б.В. Топливные эмульсии и суспензии // Металлургия, Москва, 1963.
4. 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.
5. 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.
6. Делягин Г.А. Вопросы теории горения водоугольной суспензии в потоке воздуха // Сб. Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. – М.: изд-во АН СССР, 1967. С. 45-55.
7. Френкель Я.И Кинетическая теория жидкости, Л., 1975.
8. Ильченко К.Д. Ревенко М.Б. Теплофизические свойства углей Украины,- Харьков. 2009.