

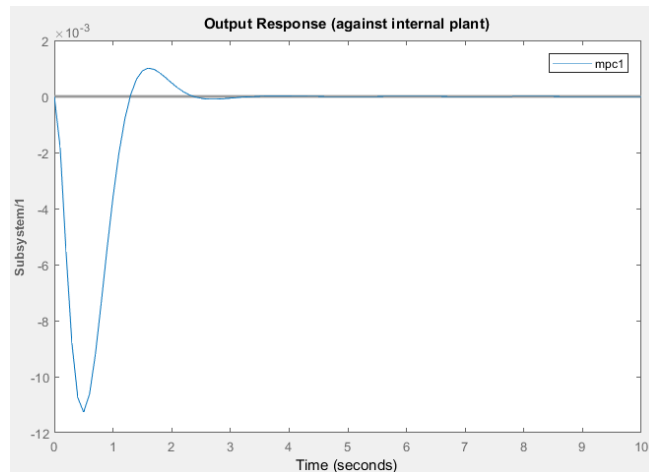


Рис. 2. Відпрацювання збурення моделюючою системою

ЛІТЕРАТУРА

1. Dovhopolyi Ya., Manko G., Trishkin V., Shvachka A. Development of the program for self-tuning a proportional-integral-differential controller with an additional controlling action.. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. 6/2 (90). P. 61–66.
2. Подгородецкий А. В., Швачка А. И. Настройка ПИД-регулятора инерционных объектов горно-металлургического комплекса. *Гірнича електромеханіка та автоматика*. 2017. Вип. 99. С. 65–70.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ЗАЖИГАНИИ ЧАСТИЦЫ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Глинин Н. К., Коломиец Е. В., Булычов В. В.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ ПРИ ЗАПАЛЮВАННІ ЧАСТИНКИ ВОДОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА ЗА ДОПОМОГОЮ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Глінін М. К., Коломієць О. В., Буличов В. В.

STUDY OF THE PROCESS OF HEAT AND MASS TRANSFER WHEN IGNITING THE PARTICLE OF AQUEOUS FUEL BY MEANS OF MATHEMATICAL MODELING

Glinin N. K., Kolomiyets E. V., Bylutchov V. V.

ГВУЗ « Украинский государственный химико-технологический университет»

г. Днепр, Украина

lenysvk_kol@i.ua

В работе представлено разработанную для условий соответствующих топочному устройству котельных агрегатов физическую и математическую постановку задачи тепломассопереноса при зажигании частиц водоугольного топлива.

Ключевые слова: тепломассоперенос, водоугольное топливо, частичка топлива, математическая модель, физическая модель, начальные условия, граничные условия

У роботі представлено розроблену для умов відповідних топковому пристрою котельних агрегатів фізичну і математичну постановку задачі тепломасопереносу при запалюванні часточок водовугільного палива.

Ключові слова: *тепломасоперенос, водовугільне паливо, частинка палива, математична модель, фізична модель, початкові умови, граничні умови*

The paper presents the physical and mathematical formulation of the heat and mass transfer problem developed for the conditions corresponding to the furnace device of boiler units when igniting particles of coal-water fuel.

Keywords: *heat and mass transfer, water coal fuel, fuel particle, mathematical model, physical model, initial conditions, boundary conditions*

На данный момент водоугольное топливо (ВУТ) является перспективным видом топлива из-за его высоких теплофизических качеств при использовании низкосортных углей, возможности транспортировки на большие расстояния и длительному сроку хранения. Но условия эффективного зажигания данных углей пока в полной мере не изучены. Одной из важнейших проблем технологии использования ВУТ является выбор концентраций основных компонентов (уголь и вода), обеспечивающих технологичность, минимальные затраты на процессы транспорта, хранения, топливоподготовки, полноту сгорания и устойчивое воспламенение.

Цель данной работы – разработать математическую модель для изучения тепломасопереноса при зажигании частички ВУТ условиях соответствующих топковому устройству котельных агрегатов.

Рассмотрим процесс зажигания частички ВУТ. Нагрев поверхности частицы инициирует процесс испарения влаги. По мере прогрева ВУТ фронт испарения продвигается от поверхности вглубь частицы. Температура на границе фронта испарения зависит от интенсивности испарения. В результате формируется слой пористого сухого топлива, температура в каждой точке которого с течением времени повышается. Размер пор определяется соотношением массовых долей системы «вода-пар». Испарившаяся влага фильтруется через пористый углеродистый каркас. Водяной пар вступает в эндотермическое химическое взаимодействие с углем (остающимся после завершения процесса влагоудаления). При достижении на поверхности частицы условия $T_{\text{п}} \geq T_{\text{нр}}$ ($T_{\text{п}}$ – температура поверхности) в частице начинается разложение органической части топлива с выделением летучих. По мере дальнейшего прогрева и роста температуры в каждой точке частицы фронт ($T(r,t) = T_{\text{нр}}$) продвигается вглубь топлива. В итоге формируется структура, которую можно разделить на три характерные зоны (рис. 1): (I) – влагонасыщенное топливо (исходное состояние); (II) – «обезвоженный» уголь, температура которого меньше $T_{\text{нр}}$; (III) – сухой уголь в стадии термического разложения ($T_{\text{м}} \geq T_{\text{нр}}$).

Продукты термической деструкции и химического взаимодействия углеродистого твердого остатка и водяных паров вдуваются в «пристенную» область. 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, является временем задержки воспламенения.

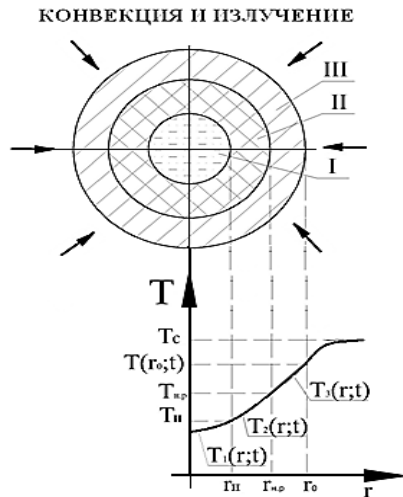


Рис.1 Температурные зоны внутри частички ВУТ [1]

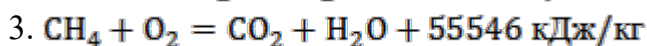
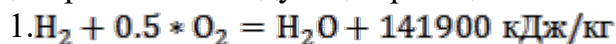
Частица водоугольного топлива, как правило, представляет собой неправильный многогранник, число граней которого изменяется случайным образом в зависимости от многих факторов (марки угля, содержания минеральных составляющих, технологии измельчения исходного твердого топлива, условий хранения и др.). По 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, поэтому ее можно считать достаточно типичной и использовать при постановке задачи.

Принимались следующие условия зажигания:

1. Теплота, выделяемая в результате реакции окисления продуктов термического разложения и газификации, превышает поступающую из внешней среды.

2. На границе системы «частица ВУТ – высокотемпературная среда» выполняется условие $\frac{dT}{dr} = 0$.

Зажигание водоугольного топлива – гетерогенный процесс, скорость которого определяется кинетикой воспламенения смеси продуктов термического разложения и реакции взаимодействия водяного пара с углеродом. Принято, что на поверхности частицы протекают следующие реакции:



Для определения скоростей этих реакций использовалась зависимость:

$$W_i = k_i * c_i * p_i * \exp\left(-\frac{E}{R * T(r_0, t)}\right)$$

Уравнение баланса компонент химических реакций окисления:

$$C_{\text{CO}} + C_{\text{H}_2} + C_{\text{CH}_4} + C_{\text{H}_2\text{O}} + C_0 = 1$$

Плотность газообразных компонентов (p_i) рассчитывалась из уравнения состояния:

$$\rho_i = \frac{p(r, t) * M}{T(r, t) * R};$$

Скорость фильтрации пара через пористую структуру определялась по закону Дарси:

$$u_s = - \frac{K_p}{v} \frac{\partial p}{\partial r}.$$

Система нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных для системы «частица ВУТ - высокотемпературная среда», соответствующая выше сформулированной физической модели, имеет следующий вид:

Уравнение энергии для исходной (влагонасыщенной) части топлива:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial t} = \lambda_1 * \left[\frac{\partial^2 T_1(r, t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} * \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial r} \right] \quad (1)$$

$$t > 0, 0 < r < r_w, T \leq T_u;$$

Уравнение энергии для «обезвоженной» части ВУТ:

$$c_2(r) \rho_1(r) \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial t} = \lambda_1(r) * \left(\frac{\partial^2 T_1(r, t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} * \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial r} \right) \quad (2)$$

$$\pm \sum Q_i * W_i - u_s C_{p_s} * \rho_1 \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial t}; \quad (2.2.2)$$

$$t > 0, 0 < r_u < r, T \geq T_u$$

Уравнение химической кинетики для органической части топлива:

$$\frac{\partial \eta_2(r, t)}{\partial t} = (1 - \eta_2(r, t)) * k_0 * \exp \left(- \frac{E}{R * T_2(r, t)} \right); \quad (3)$$

Уравнение фильтрации для водяных паров и газообразных продуктов термического разложения [2-3]:

$$\frac{mvZ}{K_p} * \frac{\partial p_s(r, t)}{\partial t} = \left(\frac{\partial^2 p_s(r, t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p_s(r, t)}{\partial r} \right) \quad (4)$$

$$t > 0, r_u < r < r_0, T \geq T_u$$

На границе раздела системы «исходный ВУТ - сухой углеродистый агломерат» выполняется граничное условие 4-го рода:

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

$$T_1(r_u, t) = T_2(r_u, t) = T_u$$

Система уравнений (1-5) решалась при следующих краевых условиях и замыкающих соотношениях:

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

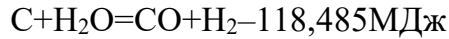
$$-\lambda_2(r_0) \frac{\partial T_2(r_0, t)}{\partial r} = \alpha * [T_c - T_2(r_0, t)] + \varepsilon \sigma [T_c^4 - T_2^4(r_0, t)] + \sum_i Q_i * W_i;$$

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

$$\frac{\partial T_1(r_w, t)}{\partial r} = - \frac{v}{K_p} u_s(r_w, t);$$

$$p(r_0; t) = p_0;$$

По аналогии, С скорость обратимой реакции



вычислялась из следующего выражения:

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

Скорость пиролиза рассчитывалась с использованием соотношения:

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

Задача решалась в сферической системе координат, начало которой совпадает с центром частицы. Диаметр частицы d_0 варьировался в достаточно широком диапазоне $d_0 = 0,4 * 10^{-3} \div 1 * 10^{-3} \text{ м}$.

При проведении исследований в качестве базового топлива частицы ВУТ принимались угли различных марок (АШ, Д, Б).

При численном решении задачи кроме вышеперечисленных принимались следующие упрощающие допущения, не накладывающие существенных ограничений на общность постановки:

1. При термическом разложении угля выделяется одно вещество, кинетические характеристики которого известны.
2. Термохимическое взаимодействие углерода и водяных паров проходит по схеме, характеристики которой известны.
3. Теплофизические характеристики угольной компоненты топлива не зависят от температуры.
4. Частица нагревается за счет конвекции и излучения одновременно.
5. Выделение смол при термической деструкции органической части топлива не учитывается.

Для решения системы дифференциальных уравнений в частных производных советующими начальными и граничными условиями использовался метод конечных разностей. Для решения нелинейных уравнений применялся метод итераций. Система нелинейных одномерных дифференциальных уравнений решена методом прогонки с использованием неявной четырехточечной разностной схемы. С целью повышения точности область решения разбивалась на 1000 узлов разностной сетки по координате. Для решения задачи с подвижной границей применялся метод накопления шага по времени $\tau = \tau + \delta\tau$, где «локальный шаг» по времени $\delta\tau$ имел фиксированное значение $\delta\tau = 10^{-6} \text{ с}$. Вычисления проводились методом прогонки по всей выделенной области.

На рис. 2 представлено распределение температуры в момент зажигания. Заметен резкий рост температуры вблизи поверхности частицы.

Можно сказать, что термическое разложение оказывает несущественное влияние на характеристики зажигания частицы. На рисунках 3-4 приведены результаты решения задачи зажигания частицы ВУТ в достаточно типичных условиях теплового воздействия.

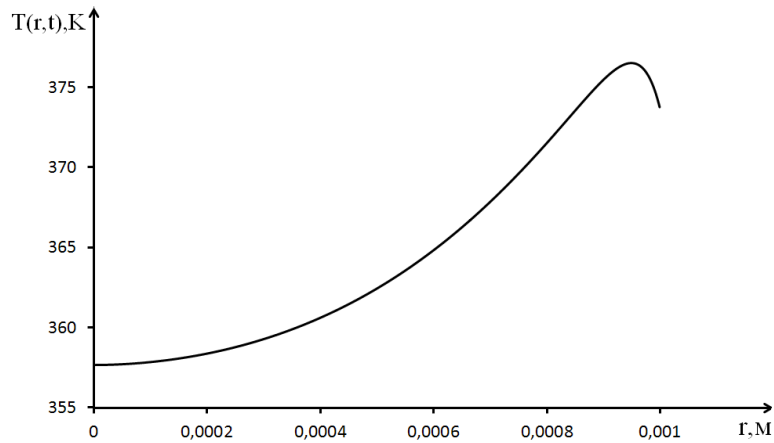


Рис. 2. Распределение температуры по радиусу частицы в момент зажигания ($T_c=550$ К)

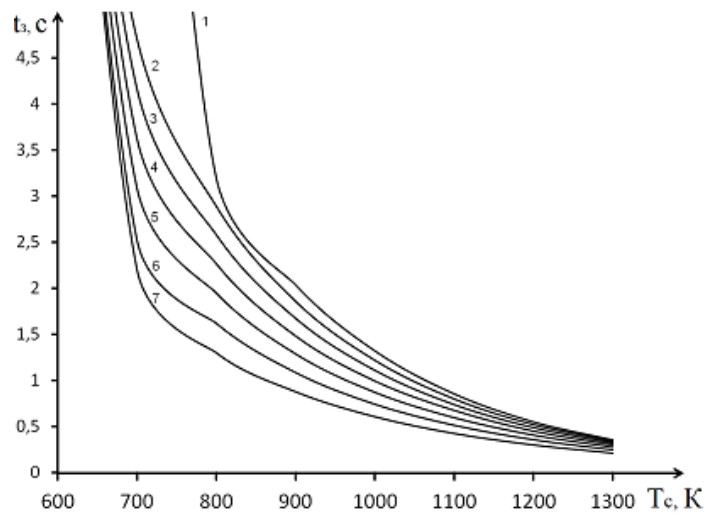


Рис. 3. Времена задержки воспламенения ВУТ в зависимости от температуры внешней среды для частиц радиусом:
 1 – $1 \cdot 10^{-3}$ мм, 2 – $0,9 \cdot 10^{-3}$ мм, 3 – $0,8 \cdot 10^{-3}$ мм, 4 – $0,7 \cdot 10^{-3}$ мм, 5 – $0,6 \cdot 10^{-3}$ мм,
 6 – $0,5 \cdot 10^{-3}$ мм, 7 – $0,4 \cdot 10^{-3}$ мм

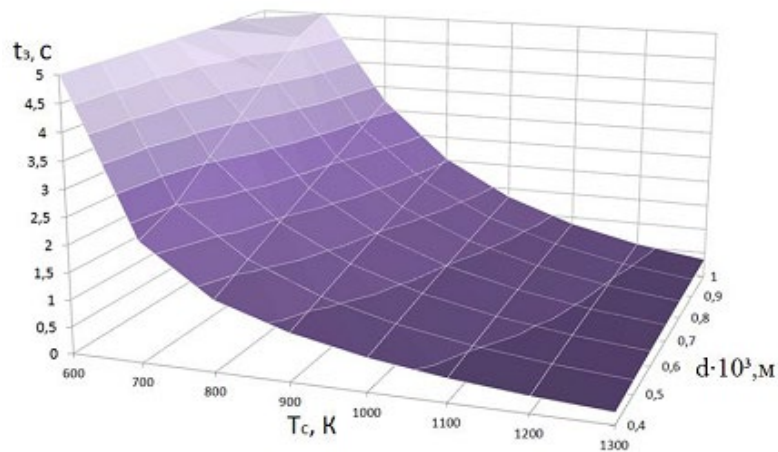


Рис. 4. Зависимость времени задержки зажигания t_3 от температуры окружающей среды T_c и диаметров частиц d

Хорошо видно, что для каждого характерного размера частицы ВУТ есть предельные по температуре внешней среды условия зажигания. С уменьшением T_c различия в значениях времен задержки зажигания растут. При $T_c=1300$ К значения времени задержки зажигания t_z для частиц ВУТ диаметром 1 мм и 0,4 мм практически (в пределах погрешностей задания исходных данных) не отличаются. Также можно отметить достаточно значимые отличия времен t_z частиц ВУТ разного диаметра при идентичных температурах внешней среды.

В результате численных исследований выявлены основные закономерности процессов тепло- и массопереноса при зажигании частиц водоугольного топлива различного диаметра. Проведен анализ влияния на условия и характеристики зажигания:

- температуры внешней среды;
- размеров частицы;
- эндотермических эффектов (фильтрация через пористую структуру, испарение влаги, термическое разложения, химическое взаимодействие паров воды с углеродом угля);
- конфигурации частицы;
- условий теплообмена с внешней средой;
- концентрации угля в частицы ВУТ;
- зависимости теплофизических характеристик от температуры;
- гетерогенности структуры;
- марки и типы углей;

Полученные по результатам проведенных теоретических исследований условия и характеристик зажигания частиц водоугольных топлив являются основанием для выработки ряда рекомендаций по практическому применению полученных теоретических следствий при разработке технологий сжигания ВУТ в топочных устройствах котельных агрегатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трембич А. В., Булычев В. В., Коломиец Е. В. Разработка математической модели для исследования процесса тепломассопереноса при зажигании частицы водоугольного топлива. *Матеріали XXV всеукраїнської практично-пізнавальної конференції "НАУКОВА ДУМКА СУЧАСНОСТІ І МАЙБУТНЬОГО"*. Видавництво НМ. Дніпро, 2018. С.37 – 39.
2. Демягин Г. Н. Вопросы теории воспламенения и горения распыленной водоугольной суспензии. В кн.: Кинетика и аэродинамика процессов горения топлива. М.: Наука, 1969. С. 111 -127.
3. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике (3-е издание). М.: Наука. 1987. 490 с.