

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ К СЖИГАНИЮ В ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ С ПЛАЗМЕННЫМ ИСТОЧНИКОМ

Карпенко Ю.Е., Мессерле А.В.

*Отраслевой центр плазменно-энергетических технологий*

*РАО «ЕЭС России» при ОАО «Гусиноозерская ГРЭС»*

*671160 Гусиноозерск Россия, ул. Пушкина, 33.messlerle@mtu-net.ru*

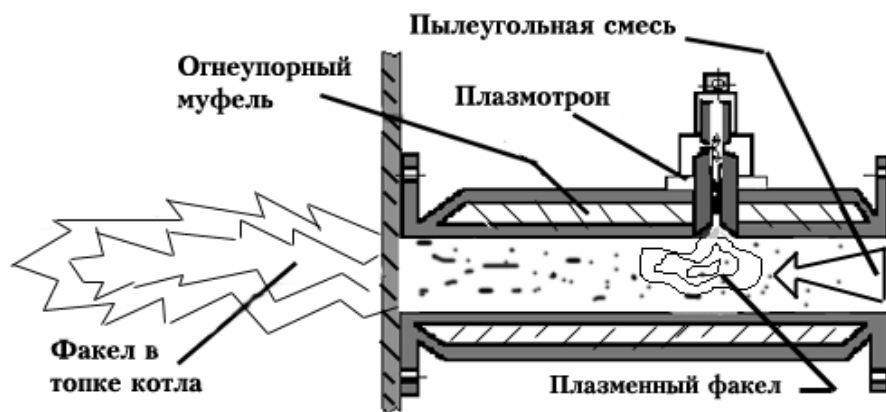
Подавляющее число долгосрочных прогнозов мирового топливного баланса подтверждают, что уголь останется наиболее значительным из доступных невозобновляемых источников энергии до 2050 года.

Однако существующие технологии использования твердых топлив не в полной мере удовлетворяют современным требованиям к повышению эффективности топливоиспользования и обеспечению эколого-экономических показателей энергетических объектов. Сжигание низкосортных углей в пылеугольных котлах для производства электроэнергии традиционно представляет трудности и, кроме того, использование низкосортных углей существенно снижает эколого-экономические показатели ТЭС, вследствие выброса вредных газов ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{CO}$ ) и летучей золы.

Использование плазменной технологии безмазутной растопки котлоагрегатов и подсветки факела позволяет повысить реакционную способность низкосортных углей, а также увеличить эколого-экономические показатели пылеугольных электростанций. Однако проведение физического моделирования реальных топочных процессов, либо натуральных испытаний пылеугольных горелок характеризуется чрезвычайно высокой стоимостью, несмотря на внешнюю простоту горелочного устройства.

Самая простая схема оснащения прямоточной горелки плазмотроном приведена на рисунке.

**Рис.1** Оснащение прямоточной горелки плазмотроном.



## 1. Известные математические модели расчета процессов горения твердого топлива.

Создан ряд математических моделей, которые наряду с экспериментом могут быть использованы для получения характеристик процессов воспламенения топлива и его горения.

Все известные расчетные методы включают в себя:

- решение уравнений тепло - и массообмена между газовой фазой и угольными частицами.

- - решение уравнений Аррениуса для расчета выхода летучих соединений ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_6\text{H}_6$ ,  $\text{CH}_4$ ) из угольных частиц.
- термодинамический анализ взаимодействия выделившихся летучих с газовой фазой.

Все известные модели являются одномерными, хотя в реальности процессы взаимодействия плазмы с потоком аэрозольной смеси являются турбулентными (нужна трехмерная модель), а дальнейшее распространение реагирующей смеси вдоль оси канала реактора или горелочного устройства – из соображений симметрии (при цилиндрической форме реактора)-двумерное.

В разработанной модели для расчета энергетических эффектов использован принцип максимума энтропии. Считается, что на каждом шаге в реагирующей газовой смеси устанавливается состояние термодинамического равновесия. Этот подход справедлив, т.к. реакции выделения летучих угля протекают на порядки медленнее, чем реакции в газовой фазе между продуктами деструкции угля. Это позволило отказаться от рассмотрения одновременно протекающих сотен химических реакций, и резко сократить время вычислений, что в свою очередь дало возможность проведения параметрических расчетов, необходимых для проектирования конкретных устройств.

## **2. Исходные данные, используемые в математической модели и принятые допущения.**

Модель описывает двухфазный (угольные частицы + воздух) химически реагирующий поток, распространяющийся в канале с внутренним источником тепла (электрическая дуга, факел плазмотрона или протекающие экзотермические химические реакции) или без него. Частицы и газ, равномерно перемешанные, поступают в камеру переработки топлива, представляющую собой цилиндрический канал. Газ нагревается от источника тепла и нагревает частицы, по мере достижения которыми температуры выделения летучих начинается выход последних в газовую фазу в соответствии с кинетическим механизмом этого процесса. В основу модели положены предположения о квазистационарности и одномерности процесса, частицы угля считаются изотермичными, а зола – инертным компонентом. Взаимодействие пылеугольной смеси с плазмой аппроксимируется как взаимодействие пылеугольного потока со струей горячего воздуха (при этом может учитываться диссоциация молекул воздуха на ионы). Состав углей представляется в модели их органической и минеральной частью. При этом органическая масса угля задается набором функциональных групп ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_6\text{H}_6$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ) и углеродом, а минеральная часть – в виде золы с соответствующими теплофизическими свойствами.

Для математического описания процессов термообработки пылеугольных топлив сделан ряд следующих основных предположений:

- Предположение об одномерности и стационарности процесса.**
- Предположение о безградиентном нагреве угольных частиц.**
- Предположение об отсутствии взаимодействия частиц между собой.**
- Описание процесса горения углерода и выделения летучих из частиц угля.**

Полагается, что скорость горения угольных частиц лимитируется кинетикой выделения летучих при их нагреве. Это происходит из-за того, что скорость газофазных реакций на порядки превосходит (при характерных температурах в зоне реакций) скорость гетерогенных реакций (реакции выделения летучих из частиц и горения углерода на поверхности).

**Новым в предлагаемой модели** является аппроксимация явлений перемешивания потока аэрозольной смеси и плазменной струи. Для этого введено понятие подмешивания, которое представляет собой некий пространственный закон в соответствии с которым происходит распространение начальной зоны возбуждения в пространстве муфеля.

Произведенные на практике визуальные оценки геометрических параметров факела для плазмотрона ("ЭДП-212" – производитель – Отраслевой Центр плазменно-энергетических технологий "РАО ЕЭС России" ) мощностью 100 кВт дали следующие значения: диаметр - 5 см, длина - 15 см. Подмешивание оставшейся части аэросмеси происходит по заданному пространственному закону по мере распространения потока вдоль оси горелки.

#### **Учет разделения угольных частиц на температурные и размерные фракции.**

В модели учитывается полифракционность угольных частиц. Учитывается их разделение как по размерным фракциям, так и по температурным. Рассматривается 5 размерных фракций и неограниченное количество температурных (температура частиц по срезу муфеля различна-грубо говоря в центральных областях они будут горячее , чем на периферии).

Частицы, попавшие в начальную зону взаимодействия со струей плазмы начнут нагреваться раньше и интенсивнее, чем частицы, попадающие в расширяющуюся зону реакций по мере развития процесса. Кроме того, температура газа не совпадает в общем случае с температурой одной из фракций пыли.

Рассматривается пять размерных фракций угольной пыли. Считается , что это число с достаточной для расчетов точностью аппроксимирует распределение пыли по фракциям. Кроме того, для такого выбора фракций существуют данные гранулометрического распределения . Экспериментально распределение пыли по размерным фракциям оценивают путем ее просеивания через стандартный набор сита с различными размерами ячеек (43, 67, 90, 200, 1000 мкм).

Сделанные предположения позволили ограничиться обыкновенными дифференциальными уравнениями (ОДУ), что существенно упрощает расчет гидродинамики процесса при наличии термохимических превращений угля и окислителя, инициируемых плазмой.

### **3. Результаты расчетов по уравнениям математической модели.**

Для апробации полученной модели был проведен ряд численных исследований горения различных углей в прямоточном муфеле и проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

В качестве примера приводится расчет по созданной модели температуры и состава продуктов термохимической подготовки топлива в прямоточном муфеле. Характеристики угля (Антрацит): -зольность–20%; -выход летучих–8%; влажность–5%.

-состав летучих в органической массе (масс. %) - H<sub>2</sub>-18, H<sub>2</sub>O-11, CO-25, CO<sub>2</sub>-14, CH<sub>4</sub>-6, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>-26; Мощность плазмотрона составляет 300 кВт.

Сравние результатов стендовых исследований и опытно-промышленных испытаний процессов плазменного воспламенения антрацита и АШ на ТЭС "Вояны" (Словакия) и Шаогуанской ТЭС (Китай) с результатами расчета показало , что расхождение расчетных и опытных данных по температурам не превышает 15%, а по составу газовой фазы-10%

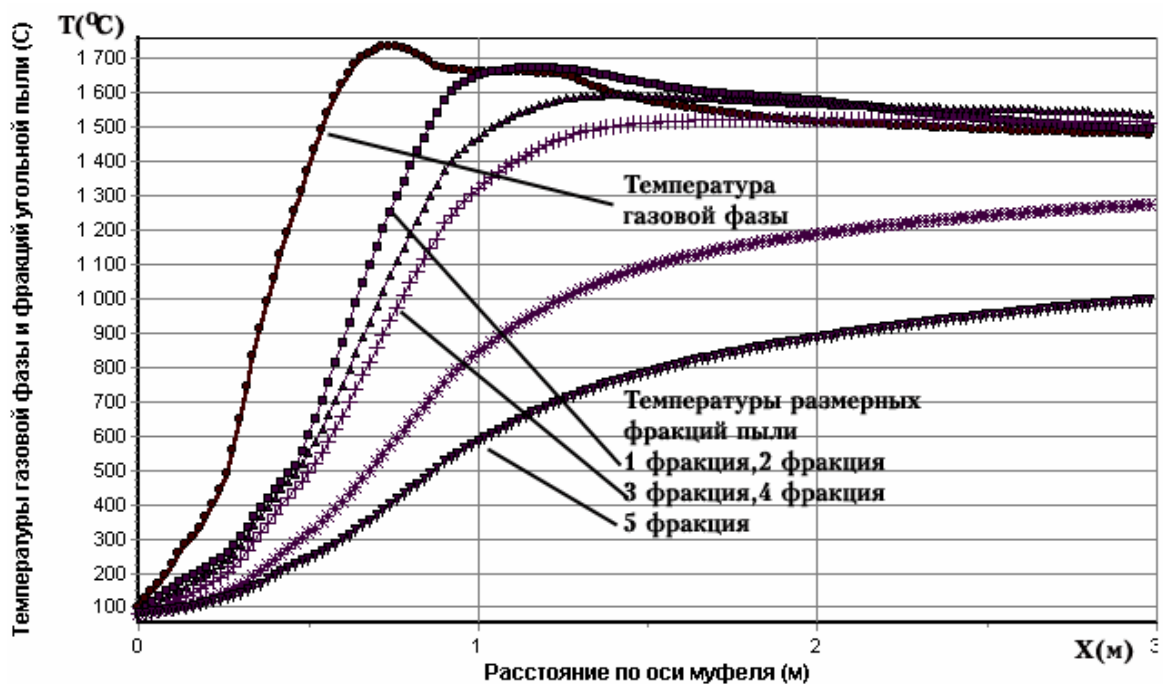


Рис.3.1 Изменение температуры газовой фазы и фракций пыли по длине муфеля

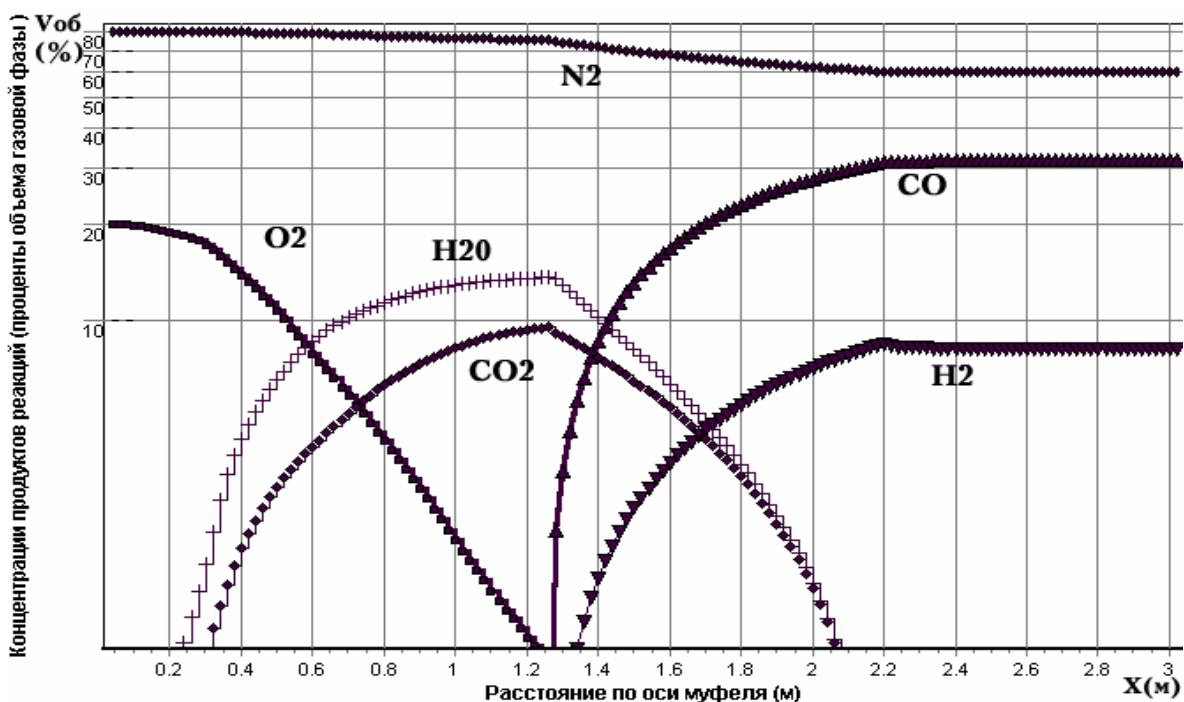


Рис.3.2 Изменение состава газовой фазы

**Заключение:** Из проведенных численных исследований и сравнения их с экспериментальными данными следует вывод о том, что используемая модель дает достоверные результаты (погрешность определения состава газовой фазы и ее температуры не превышает 10%), кроме того наблюдается ряд закономерностей, известных из практики, что позволяет использовать ее для проектирования конкретных горелочных устройств.