УДК 662.61

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕЙ МЕТОДОМ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ОДИНОЧНЫХ ЧАСТИЦ

Квицинский В.А., Крывошеев С.И., Макарчук В.Н., Хилько И.Н.

Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев, Украина

АННОТАЦИЯ

Цель работы состояла в разработке простых методов определения энергии активации и температуры воспламенения углей для реализации экспресс анализа в условиях лабораторий. Описана методика определения энергии активации углей методом воспламенения одиночных частиц, а также предложен быстрый способ измерения температуры воспламенения угольных частиц на накаленной проволоке. Приведены результаты применения разработанных методов для определения кинетических характеристик реальных угольных смесей.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ УГОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

Энергия активации является важным параметром процессов сжигания и термохимической переработки твердого топлива. Она определяет как порог воспламенения горючих смесей, так и величину тепловыделения в ходе химической реакции. Неудивительно, что определению энергии активации углей и их смесей посвящено много экспериментальных и работ и публикаций по теоретическому описанию процессов горения (см. например, [1,2]).

Согласно стационарной теории воспламенения [1] теплота, выделяющаяся при химическом реагировании материала частицы с кислородом в газовой смеси, расходуется на нагрев частицы и тепловые потери, связанные с отводом тепла в окружающую среду. Температура, при которой тепловыделение превышает потери тепла, является температурой воспламенения частицы. Т.е. считается, что при превышении температуры частицы Т над температурой воспламенения частица обязательно воспламенится.

Тепловыделение в единице объема описывается законом Аррениуса [1]:

$$Q_p = k_0 \exp(-E/RT) C^n Q \qquad (1)$$

где $k_0 \cdot \exp(-E/RT)$ – константа скорости реакции; E – энергия активации; C -концентрация газовой смеси; n - порядок реакции; Q – теплота сгорания.

Теплоотдача, отнесенная к единице объема, является линейной функцией температуры [1]:

$$Q_T = \alpha \cdot \frac{F}{V} \cdot (T - T_0) \qquad (2)$$

где: α - коэффициент теплоотдачи; F, V – поверхность и объем области реагирования; T_0 – температура окружающей среды.

Наименьшая температура воспламенения, которая соответствует случаю, когда $Q_p(T)$ и $Q_T(T)$ имеют только одну точку пересечения, называется критической температурой $T_к$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Установка представляет собой трехсекционный термостат. Верхняя и средняя секции предназначены для формирования поля предварительного нагрева пылеугольной смеси. Нижняя (длиной 50 мм) – для поджига частиц. Типичное поле температур по высоте термостата приведено на рис.2.

Устройство работает следующим образом. Угольные частицы (фракция 50-63 мкм) с помощью вибрационного пылепитателя подаются в активную зону термостата.

Под собственным весом частицы дрейфуют до сетки 5, где смешиваются с воздухом, предварительно нагретым шихтой в секции 1. Далее происходит дополнительный нагрев воздушно угольной смеси во второй секции.

Нагретая смесь поступает в секцию поджига, где частицы могут воспламеняться. Таким образом, конструкция термостата позволяет изменять температуру предварительного нагрева и температуру воспламенения частиц. Расход частиц подбирается

© Квицинский В.А., Крывошеев С.И., Макарчук В.Н., Хилько И.Н.

так, чтобы в секции поджига реализовывался режим пролета одиночных частиц.

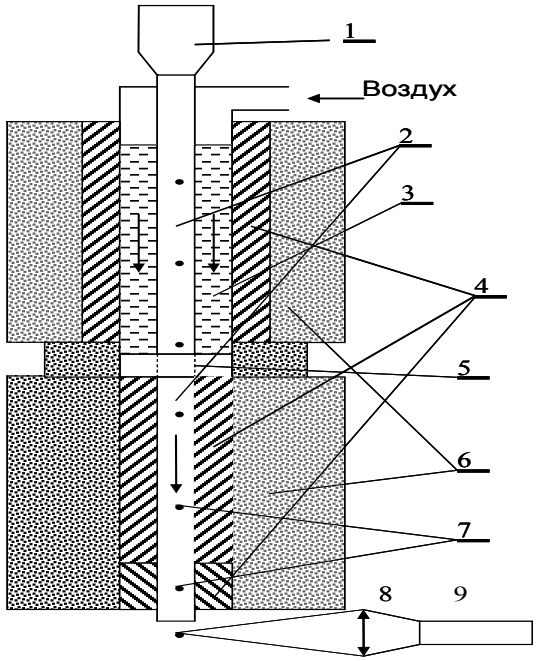

Рис.1 1-бункер с углем и вибрационным питателем; 2-керамические трубки (Ø10мм, общей высотой 40 см); 3-шихта; 4-электрические нагреватели; 5-сетка; 6-теплоизоляция; 7-частички угля; 8-линза; 9-фотоприемник; общая высота установки - 60 см; расход угля – 15 мг/мин; расход воздуха – 3 л/мин.

В этом режиме реализуется ситуация, когда среднее расстояние между частицами намного больше их диаметра. Оценки показывают, что при заданных параметрах расхода, среднее расстояние между частицами составляет ~ 3мм, что намного больше диаметра частиц.

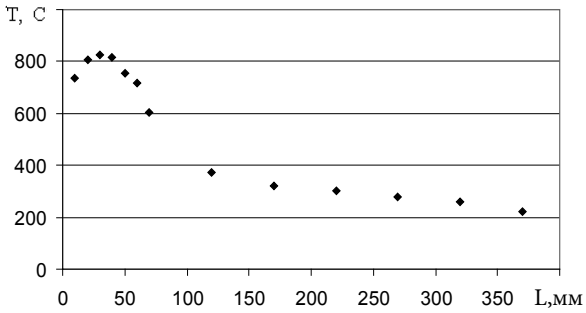

Рис.2 Поле распределения температуры по высоте термостата. Отсчет ведется от нижнего среза активной зоны.

Воспламененные частицы регистрируются фотоприемником на срезе зоны поджига. На этом срезе также регистрируются невоспламенившиеся частицы, которые подсвечиваются лазерным источником и фиксируются вторым фотоприемником (на схеме не показан) по рассеянному излучению. Полученная информация оцифровывается двухканальным АЦП и поступает в компьютер, где по полученным реализациям, производится подсчет количества воспламенившихся частиц N* и общего числа частиц N. Эксперимент проводится при условии N*<< N.

МЕХАНИЗМ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

В стационарных условиях в эксперименте устанавливается неоднородное поле температуры газа по радиусу цилиндров активной зоны. Пример распределения температуры по радиусу зоны воспламенения приведен на рис.3. Здесь показаны результаты расчета поля температур газа. Для расчета температуры газа была решена стационарная двумерная неизотермическая осесимметричная задача (компьютерная программа расчета предоставлена Б.Б.Рохманом).

На рис.4 приведено распределение температуры газа в пристеночной области цилиндра.

Из рисунка видно, что вблизи стенки изменение температуры газа с хорошей точность можно описать линейной зависимостью с примерно одинаковым углом наклона.

Воспламенение происходит в пристеночном слое, где выполняется условие $T>T_k$. При этом предполагается, что частицы в секции воспламенения приобретают температуру равную температуре стенки, усредненной по высоте секции (первые 50 мм на рис.2).

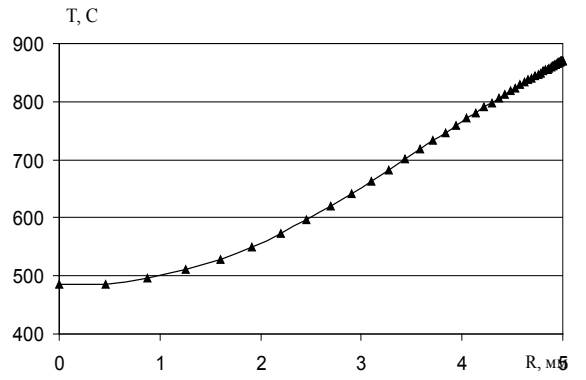

Рис.3 Распределение температуры газа по радиусу трубки. Отсчет ведется от оси цилиндра.

Основываясь на зависимостях рис.4, ширину слоя w можно выразить через температуру:

$$w = \frac{dr}{dT}(T - T_k) \quad (3)$$

где r – радиус.

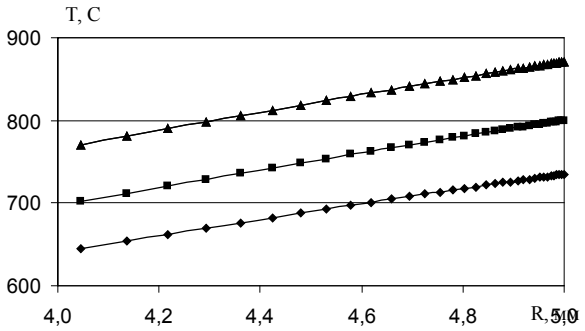

Рис.4 Зависимость температуры газа от расстояния до стенки в пристеночной области цилиндра зоны воспламенения при различных температурах стенки.

В предположении тонкого слоя w<<r выражение для площади слоя S будет иметь вид:

$$S = 2\pi r w = 2\pi r \frac{dr}{dT}(T - T_k) \quad (4)$$

Приравняв Qp и QT, получим:

$$T - T_k = A\exp(-\frac{E}{RT}) \quad (5)$$

где: A – константа, не зависящая от температуры. Подставляя (5) в (4) и обозначая b=dr/dT, получаем выражение для площади слоя:

$$S = 2\pi r b A\exp(-\frac{E}{RT}) \quad (6)$$

Число воспламенившихся частиц в единицу времени будет равно:

$$N^* = nS \quad (7)$$

где: n – поток частиц через сечение активной зоны в единицу времени. Общее число частиц, прошедших через термостат, будет равно:

$$N = \pi r^2 n \quad (8)$$

На самом деле фиксировалась небольшая часть общего потока. Это было связано с геометрией фотоприемника.

Возьмем отношение N*/N и прологарифмируем его:

$$\ln(\frac{N^*}{N}) = B - \frac{E}{RT} \quad (9)$$

где: B=ln(2Ab/r).

Из уравнения (9) видно, что, построив зависимость ln(N*/N)=F(1/T), можно по углу наклона определить энергию активации.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве рабочего вещества использовался донецкий газовый полукокс. Эксперимент проводился следующим образом. Устанавливалась температура предварительного нагрева средней секции, что позволяло варьировать температуру на входе секции поджига.

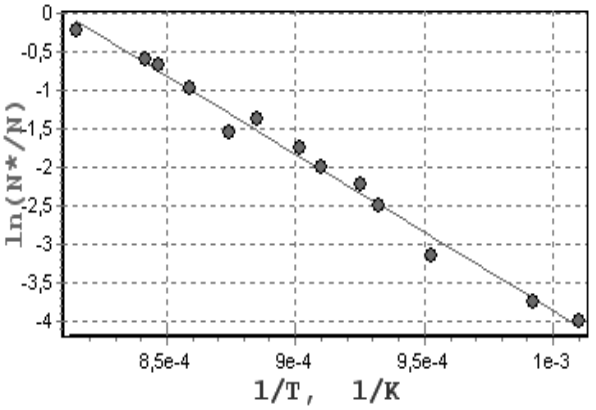

Рис.5 Приведена зависимость (9), в которой сгруппированы экспериментальные точки для различных температур предварительного разогрева смеси.

Температура верхней секции термостата поддерживалась на уровне 390°C. Для каждой температуры предварительного нагрева определялись зависимости (9), из которых определялась энергия активации. Результаты показали, что значения энергии активации, полученные для различных температур предварительного нагрева, в пределах ошибки совпадают. Это означает, что воспламенение частиц не зависит от истории их нагрева.

В таблице 1 приведены результаты регрессионной подгонки прямой к экспериментальным данным.

Таблица 1.

Полученные значения хорошо коррелируют с данными других авторов [2].

Целевая функция :	a + bx
a	16.5285
b	-20405.9
Вариационный коэфф. (%):	7.8
Энергия активации	40500 кал/моль
Энергия активации	170 Мдж/кмоль

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ УГОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

Температура воспламенения - это один из основных параметров, определяющих свойства и качество угля. От нее зависит температура воспламенения пылеугольной смеси в реальных котлоагрегатах. Она также является важным параметром, определяющим свойства смесей в процессах термохимической подготовки топлива [3].

Определить температуру воспламенения частиц можно на установке, описанной в предыдущем разделе. Для этого необходимо увеличивать температуру секции воспламенения до тех пор, пока на нижнем срезе термостата не появятся воспламенившиеся частицы. Однако такой эксперимент требует много времени, из-за инерционности термостата. Ниже предлагается более быстрый способ определения искомой температуры.

Идея метода состоит в следующем. На проволоку направляется разреженный поток угольных частиц. Температура проволоки растет со временем. Она измеряется термопарой, приваренной к ее поверхности. Далее фиксируется температура появления вспыхнувших частиц. Момент вспышки может определяться визуально или с помощью фотоприемника. В наших экспериментах параметры прибора были такими:

– диаметр нихромовой проволоки 2 мм;

– длина нагревателя 20 мм.

– диаметр проволоки термопары, которая приваривалась к центральной зоне нагревателя, 0,2 мм.

Фиксация температуры осуществлялась по первой вспыхнувшей частице.

Результаты измерений для нескольких сортов угля приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Сорт угля (фракция, мкм)	Тв, °С
Днепровский бурый (0–63)	475
Донецкий газовый (50–63) полукокс	650
Донецкий тощий (0–63)	745

Неопределенность измеренной температуры оценивается в ±100.

Следует отметить, что для надежного воспламенения необходимо брать фракции угля малого размера, чтобы за время пребывания частицы на поверхности проволоки частица успевала прогреваться.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хзмалян Д.М. Теория топочных процессов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 234 с.
2. Хзмалян Д.М., Каган А.Я. Теория горения и топочные устройства. – М.: Энергия, 1976. – 487 с.
3. Корчевой Ю.П., Дунаевская Н.И., Вовчук Я.И., Майстренко А.Ю. Изменение характеристик коксозольного остатка антрацита в процессе термохимической подготовки // Промышленная теплотехника. – 1999. – Т.21, №6. – С. 51-56.