

Экспериментальное исследование кинетики горения одиночных частиц пылеугольного топлива

Предложено количественное определение относительной реакционной способности углей. Разработан экспериментальный метод исследования горения одиночных угольных частиц, позволяющий определять относительную реакционную способность углей разных типов. Также показано, как с помощью данного метода можно определить время сгорания частиц угля в различных высокотемпературных топочных устройствах. Проведены экспериментальные исследования на электродном графите и углях марок антрацит и СС, используемых для вдувания в доменные печи на ММК им. Ильича. Показано, что относительная реакционная способность угля марки СС на 53 % выше, чем антрацита, а для антрацита и электродного графита она почти одинакова. На основании полученных экспериментальных данных произведены расчеты времени сгорания частиц углей исследуемых марок в диапазоне фракций 40-100 мкм.

Ключевые слова: пылеугольное топливо, реакционная способность, время сгорания, одиночная частица

При разработке и проектировании систем сжигания пылеугольного топлива (ПУТ) одним из наиболее важных является определение времени (или скорости) сгорания угольных частиц в реакционной зоне. Время сгорания зависит, в первую очередь, от размера частиц, технологических параметров реактора (температура, давление) и особенностей используемого угля, которые определяются химическим составом угля, его морфологией и т. д. Все эти особенности конкретного типа угля объединяются параметром, называемым реакционной способностью угля. В технике нет общепринятого количественного определения реакционной способности твердого топлива, поэтому сейчас она носит в основном лишь качественный характер.

Анализ большого объема экспериментальных данных по исследованию горения угля и других видов натурального топлива дает возможность сделать следующие заключения:

1. Все высокотемпературные процессы сжигания угольных частиц в потоке протекают в диффузионном либо близком к нему режиме горения. Роль внутреннего реагирования кислорода с углеродом при таком режиме крайне мала [1].

2. Выгорание частиц угля конкретных марок зависит от состава, внутреннего строения и других особенностей данных углей. Все эти особенности не могут быть учтены теоретически, их необходимо определять экспериментально, отдельно для каждого типа угля.

3. Экспериментальные данные по исследованию горения одиночных частиц можно перенести на реальные факельные процессы [2].

Экспериментальным исследованием кинетики сгорания углей занимались многие исследователи, начиная еще с 50-х годов 20 столетия и по сегодняшний день, однако используемые ими методики довольно сложны в техническом плане и требуют существенных финансовых затрат на создание

лабораторных установок. Вопросами экспериментального исследования сгорания одиночных угольных частиц занимались такие ученые, как: В. И. Бабий, Я. Левендис, С. В. Бухман, Р. Х. Эссенхай, Д. Карабогдан, М. Шибатока, Л. И. Хитрин, Е. С. Головина и др. Все экспериментальные исследования в данной области в последнее время посвящены изучению сгорания частиц угольной пыли, то есть частиц размером менее 100 мкм. Ниже приведен краткий обзор основных экспериментальных исследований процесса горения угольных частиц мелких фракций.

Группой ученых ВТИ им. Дзержинского под руководством В. И. Бабя проводены масштабные экспериментальные исследования горения угольных частиц во фракционном диапазоне 10-1000 мкм [2]. Время сгорания угольных частиц определяли методом микрокиносъемки (оптический метод) либо по осциллограммам пирометра (пирометрический метод). Угольные частицы вносили в реакционное пространство печи и обдували газом с заданной скоростью потока. При этом крупные частицы (100-1000 мкм) наклеивали на кварцевую иглу, мелкие (10-100 мкм) – на кварцевые нити, диаметр которых составлял 10-20 мкм. Очевидно, что приклеивание частицы вносило определенные возмущения на процесс горения. Также стоит отметить высокую техническую сложность проведения экспериментов.

Аналогичные исследования проводил Р. Х. Эссенхай в диапазоне частиц 300-2000 мкм [3]. Отличие состоит в том, что частицы приклеивали на плоскую подложку. Оба автора отмечают, что процесс горения при условиях экспериментов протекает в диффузионном режиме.

Я. Левендис исследовал сгорание мелких угольных частиц (30-150 мкм) в свободном падении. Время горения частицы определяли одновременно с помощью высокочастотной киносъемки и температурных кривых, снятых специально разработанным трехлучевым пирометром. К недостаткам данного метода

следует отнести высокую нестабильность трехлучевых пирометров, а также сложность экспериментальной установки. Подробно описание установки и проведение экспериментов описано в [4, 5].

В. И. Бабий и его группа при обработке экспериментальных данных предложили эмпирическое уравнение, позволяющее рассчитывать время выгорания коксового остатка частиц угольной пыли различных марок:

$$\tau = k \cdot 2,21 \cdot 10^8 \cdot \frac{100 - A}{100} \frac{\rho d^2}{T_r^{0,9} O_2}, \quad (1)$$

где τ – время горения коксового остатка, с; k – опытный коэффициент, характеризующий специфику выгорания частиц угля данной марки; A – внутренняя зольность коксового остатка, %; O_2 – объемная концентрация кислорода, %; T_r – температура газовой фазы, К; ρ – плотность коксового остатка, кг/м³; d – начальный диаметр частицы, мм.

Приведенное уравнение справедливо только при условии горения частиц в диффузионном режиме при малых скоростях обдувания потоком газа ($Re < 1$), то есть для молекулярной диффузии.

Согласно утверждению авторов, зависимость (1) хорошо согласуется с экспериментальными данными различных авторов в интервале концентраций кислорода от 21 до 98 % и размеров частиц от 0,1 до 10,0 мм. Это свидетельствует о возможности использования уравнения (1) с целью расчета времени выгорания частиц угольной пыли для камер сгорания, работающих как на воздухе, так и на обогащенном дутье.

Цель работы – разработка относительно простого метода определения реакционной способности углей и времени сгорания отдельных частиц угольной пыли.

Описание экспериментальной установки и методики проведения исследований. Для решения поставленной задачи разработали принципиально новую установку, позволяющую измерять время сгорания и температуру частицы топлива, лежащей на дне реактора и обдуваемой потоком газа. В экспериментах температуру реактора и газа поддерживали постоянной, ее задавали в диапазоне от 1073 до 1523 К. Для контроля времени сгорания использовали оптический метод исследования, заключающийся в скоростной фотосъемке частицы топлива в процессе горения. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Реактор в виде пробирки из химически и термически стойкого материала (до 2300 К) поместили вертикально в рабочую камеру лабораторной трубчатой печи. Регулирование температуры в печи осуществляли плавным регулированием напряжения электрическо-

го источника питания. Это давало возможность поддерживать температуру в реакторе с погрешностью не более 5 °С. Измерение температуры выполняли с помощью калиброванной платино-платинородиевой термопары, введенной в трубчатую печь максимально близко к зоне протекания реакции (рис. 1). Свободные концы термопары подключили к автоматическому потенциометру, позволяющему непрерывно контролировать температуру в ходе эксперимента. В рабочей камере печи поддерживали определенную окислительную атмосферу, что достигалось за счет ее хорошей герметизации. Подвод окислительной смеси в рабочее пространство печи осуществляли снизу через трубку из кварцевого стекла.

Одиночная частица вбрасывалась в реактор через отверстие в верхней части. Подачу окислительной смеси в реактор выполняли через специально прорезанное боковое отверстие в нижней части реактора размером 2×5 мм. Наблюдение за горячей частицей и фотосъемку вели сверху. Фотокамеру и пирометр закрепляли над печью на координатнике, позволяющем регулировать расстояние от объектива до объекта.

Видеосъемку процесса горения с помощью камеры с макро-объективом производили с частотой 50 кадров/с. Полученные видеофайлы разбивали на кадры и обрабатывали на компьютере. За начало процесса горения принимали момент, когда частица начинала светиться на фоне доньшка реактора, что означало развитие автотермического разогрева частицы. При сжигании углей в процессе разогрева частицы при температуре 500-750 °С наблюдалось горение летучих компонентов и только затем происходило воспламенение коксового остатка. Окончанием процесса горения считался момент полного сгорания частицы.

Опыты проводили на фракциях: 1,6-2,0; 1,0-1,6; 0,8-1,0; 0,50-0,63; 0,315-0,400; 0,20-0,25 и 0,16-0,20 мм. Для устранения влияния разброса размеров частицы

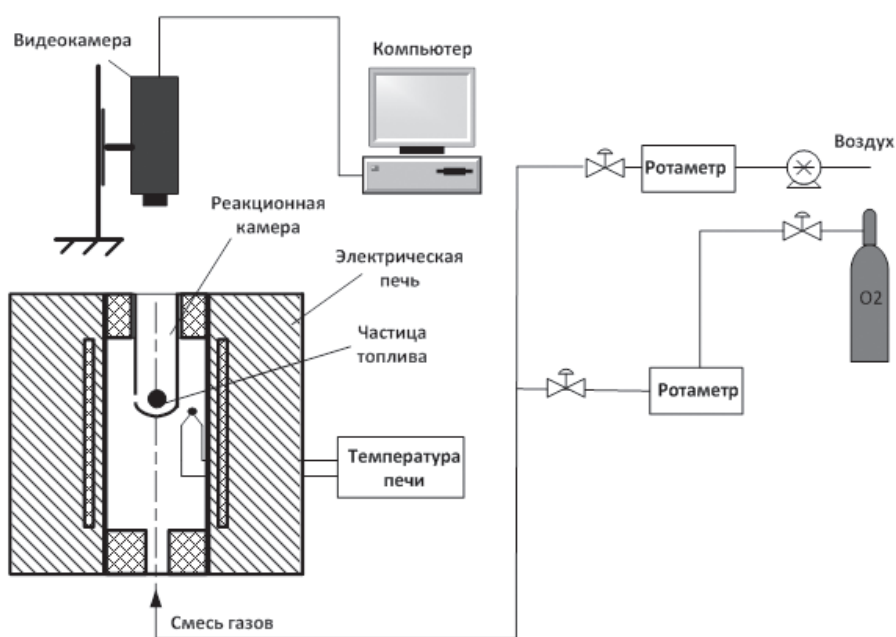


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования кинетики сгорания одиночных частиц твердого топлива

для каждой фракции проводили по 30 опытов, после чего результаты подвергали статистической обработке. При этом относительное среднеквадратическое отклонение результата измерения времени горения частицы не превышало 3 %.

Измерения проведены на газовой смеси O_2/N_2 с объемной долей кислорода 21 % (воздух) и чистом кислороде. Расход кислорода и воздуха измеряли с помощью ротаметра. Нагретый до заданной температуры печи газ через отверстие в реакторе направляли на частицу топлива.

Исследования выполняли при скоростях газового потока, не влияющих на скорость горения частицы, но вполне достаточных по балансу для полного сгорания. На основании результатов экспериментальных исследований как авторов данной работы, так и результатов других исследователей [2] установлено, что при числах Рейнольдса меньше 1 коэффициент Нуссельта, характеризующий массообменные процессы, не зависит от скорости газового потока и равен 2. При $1 < Re < 10$ зависимость Nu от Re носит слабовыраженный характер. В данных экспериментах расход окислителя в рабочую камеру печи подбирали таким образом, чтобы расчетное число Re было < 5 . В то же время расход окислителя должен быть достаточно большим для обеспечения полного сгорания топлива с избытком. Отсутствие влияния расхода окислителя на скорость выгорания частиц графита в рабочем диапазоне расходов подтвердили экспериментально для частиц размером от 0,16 до 2,00 мм. С ростом $Re > 10$ время сгорания частиц уменьшалось.

Характеристики топлива. Эксперименты проводили на чистом электродном графите и на пробах углей марок антрацит и СС, предоставленных ММК им. Ильича. Все пробы измельчили и рассеяли по фракциям в диапазоне 0,16-2,00 мм. Химический состав топлива представлен в табл. 1.

Результаты экспериментальных исследований. Данные по времени сгорания одиночных частиц обрабатывали при помощи уравнения (1). Полученные зависимости времени горения одиночных частиц от свойств газовой фазы и размера частицы представлены на рис. 2, на котором видно, что полученные точки хорошо аппроксимируются линейной функцией. Это свидетельствует о том, что процесс горения в условиях эксперимента протекал в диффузионном либо близком к нему режиме. По углу наклона аппроксимирующей прямой для каждого вида топлива определили коэффициент k , зная

Таблица 1
Химический состав углей, используемых в экспериментах

	Антрацит	СС
Влага, %	3,2	3,9
Летучие*, %	4,2	20,9
Углерод*, %	85,8	71,8
Зола*, %	9,2	7,0
Низшая теплота сгорания, ккал/кг	7222	7650

* % от сухой массы топлива

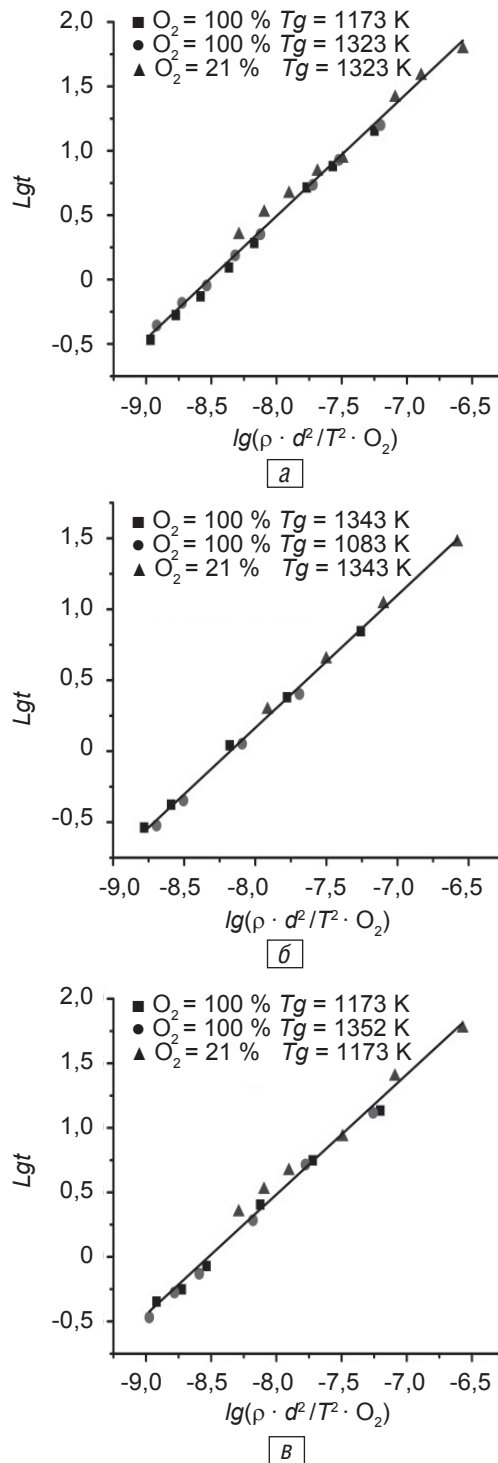


Рис. 2. Изменение длительности горения одиночных частиц графита (а), антрацита (б), СС (в) от размера частицы и параметров газовой фазы

который можно по уравнению (1) рассчитать время горения частиц конкретного топлива для различных фракций и параметров газовой фазы. Результаты таких расчетов для углей марок антрацит и СС приведены в табл. 2. По аналогии можно рассчитывать время горения частиц различных фракций при условии диффузионного режима горения.

Автором статьи предложено использовать коэффициент k в уравнении (1), а точнее обратную ему величину $R = 1/k$, в качестве основной характеристики углей различных типов и марок и назвать ее относительной реакционной способностью угля. Как видно по данным табл. 2, относительная реакционная

Таблиця 2

Расчетное время горения частиц угольной пыли

Марка угля	Коэффициент k	Размер частиц, мкм	Температура среды, К	Время горения, с
Антрацит	1,440	100	1700	0,251
			2100	0,207
		70	1700	0,123
			2100	0,102
		40	1700	0,039
			2100	0,033
СС	0,845	100	1700	0,146
			2100	0,121
		70	1700	0,072
			2100	0,059
		40	1700	0,023
			2100	0,019

способность угля марки СС на 53 % выше, чем антрацита. Также стоит отметить, что коэффициент k для электродного графита слабо отличается от антрацита и составил 1,88.

Предложенный в данной статье метод дает возможность экспериментально определять относительную реакционную способность углей любых марок. Полученные экспериментальные данные в даль-

нейшем можно использовать для расчета времени сгорания частиц пылеугольного топлива различных фракций и условий в реакционной зоне.

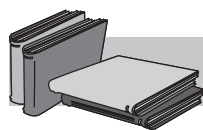
Таким образом, данный метод позволяет относительно просто, проведя несложные эксперименты, определять время горения пылеугольных частиц как в фурменной зоне доменных печей, так и в других высокотемпературных топочных устройствах.

Выводы

Разработана новая методика экспериментального определения относительной реакционной способности углей. Данный метод дает возможность рассчитывать время горения частиц пылеугольного топлива, вдуваемого в доменную печь, после проведения несложных экспериментов на угле конкретной марки.

Проведены экспериментальные исследования на углях марок антрацит и СС, используемых в качестве ПУТ на ММК им. Ильича. Показано, что относительная реакционная способность угля марки СС на 53 % выше, чем антрацита.

На основании полученных экспериментальных данных по относительной реакционной способности для рассматриваемых углей рассчитано время горения угольной пыли для углей марок антрацит и СС в зависимости от размера частичек и температуры в реакционной зоне.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Горение натурального твердого топлива / А. Б. Резняков, И. П. Басина, С. В. Бухман, М. И. Вдовенко и др. – Алма-Ата: Наука, 1968. – 410 с.
2. Бабий В. И., Кузавев Ю. Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.
3. Essenhigh R. H., Beeston G. Kinetics of coal combustion: The influence of oxygen concentration on the burning-out time of single particles // J. Phys. Chem. – 1963. – Vol. 67. – P. 1349.
4. Bejarano P. A., Levendis Y. A. Single coal particle combustion in O_2/N_2 and O_2/CO_2 environments // Comb. and Flame. – 2008. – Vol. 156. – P. 270-287.
5. Combustion behavior of singles particles from three different coal ranks and sugar cane bagasse in O_2/N_2 and O_2/CO_2 atmospheres / R. Khtami, C. Stivers, K. Joshi et al. // Comb. and Flame. – 2012. – Vol. 159. – P. 1253-1271.

Анотація

Хаджинов Є. О.

Експериментальне дослідження кінетики горіння одиночних частинок пиловугільного палива

Запропоновано кількісне визначення відносної реакційної здатності вугілля. Розроблено експериментальний метод дослідження горіння одиночних вугільних частинок, що дозволяє визначати відносну реакційну здатність вугілля різних типів. Також показано, як за допомогою даного методу визначати час згорання частинок вугілля в різних високотемпературних топкових пристроях. Проведено експериментальні дослідження на електродному графіті та вугіллі марок антрацит і СС, які використовують для вдування в доменні печі на ММК ім. Ілліча. Встановлено, що відносна реакційна здатність вугілля марки СС на 53 % вище, ніж антрациту, а для антрациту і електродного графіту вона майже однакова. На підставі отриманих даних проведено розрахунки часу згорання частинок вугілля експериментальних марок в діапазоні фракцій 40-100 мкм.

Ключові слова

пиловугільне паливо, реакційна здатність, час згорання, одиночна частка

Summary

Khadzhynov Ye. A.

Experimental study of single particle kinetics of combustion of pulverized coal

The quantitative determination of the relative reactivity of the coal have been made. An experimental method for studying the combustion of single coal particles was developed, which allows to determine the relative reactivity of different coal types. Also shown the possibility, with this method, to determine the combustion of coal particles in a variety of high-temperature furnace devices. Experimental studies on the electrode graphite, anthracite coals brands and SS used for injection into blast furnaces to Mariupol, Ilyich have been provided. It is shown that the relative reactivity of SS grade coal is 53 % higher than anthracite, anthracite and for a graphite electrode is almost the same. Based on the experimental data the calculations of time the combustion of coal particles in the range of brands studied fractions of 40-100 microns.

Keywords

pulverized coal, reactivity, combustion time, a single particle

ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!

В редакцию журнала **«Металл и литье Украины»** принимаются рукописи на *русском* языке и при наличии номера УДК.

Статьи обязательно должны содержать на **3-х языках** (*русском, украинском и английском*) фамилии, имена, отчества авторов, название статьи, аннотации, ключевые слова.

Статьи должны поступать в редакцию на бумажном (*по почте, с подписями всех соавторов*) и в электронном виде.

Объем статьи – не более 10 стр., рисунков – не более 5.

На **рисунках** слова, обозначения и *цифры (курсив)*, должны быть набраны одним шрифтом (**Arial, 9**).

Формулы (*кроме их пояснений в тексте*) набирать в **Math Type (Arial, 11)**:
русские – прямым,
английские буквы – курсивом,
греческие – **Symbol, 12**, прямыми;
обозначения формульных пояснений в тексте – **Word, Arial, 10**.

Для текстовых материалов использовать формат **doc**, графических – **jpeg, tiff**.

Графики и чертежи должны быть **черно-белыми, четкими и контрастными**.
Фотографии и рисунки с разрешением, как минимум, **300 dpi**.
Необходимо также прилагать контактную информацию (**e-mail, телефон**) и сведения об авторах (ФИО, ученая степень, должность, организация и ее адрес).