

ТЕПЛОТЕХНІКА ТА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

УДК 662.612

© Хаджинов Е.А.¹, Бондаренко Б.И.²

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ СГОРАНИЯ ОДИНОЧНЫХ УГОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

Разработан экспериментальный метод исследования сгорания одиночных угольных частиц, позволяющий определять реакционную способность углей разных типов. Показана возможность, с помощью данного метода, определять время сгорания частиц угля для фракции до 160 мкм экспериментально, и для фракции до 25 мкм расчётом, на основании экспериментальных данных. Показана простота данного метода по сравнению с существующими. Экспериментальные исследования проведены на электродном графите в воздушной и кислородной средах.

Ключевые слова: газификация, угольная частица, экспериментальные исследования, реакционная способность.

Хаджинов Є.О., Бондаренко Б.І. Експериментальне дослідження кінетики згорання одиночних вугільних частинок. Розроблено експериментальний метод дослідження згорання одиночних вугільних частинок, що дозволяє визначати реакційну здатність вугілля різних типів. Показано можливість, за допомогою даного методу, визначати час згорання частинок вугілля для фракції до 160 мкм експериментально, і для фракції до 25 мкм розрахунком, на підставі експериментальних даних. Показана простота даного методу в порівнянні з існуючими. Експериментальні дослідження поведені на електродному графіті в повітряному і кисневій середовищах.

Ключові слова: газифікація, вугільна частинка, експериментальні дослідження, реакційна здатність.

E.O. Khadzhynov, B.I. Bondarenko. Experimental study of the kinetics of single coal particles. An experimental method for investigation of combustion of single coal particles, which allows to determine the reactivity of different coal types was developed. The possibility, with this method, to determine the combustion of coal particles for a fraction of up to 160 microns experimentally, and for a fraction of up to 25 microns calculated on the basis of experimental data. Shown was the simplicity of this method in comparison with the existing ones. Experimental investigations of the behavior on the graphite electrode in air and oxygen environments was carried out.

Keywords: gasification, coal particles, experimental study, coal reactivity.

Постановка проблемы. В настоящее время всё более широкое распространение получают процессы газификации твердого топлива, в первую очередь угля. Наиболее перспективным считается процесс парокислородной газификации в потоке угольной пыли.

При разработке и проектировании таких систем газификации, одним из наиболее важных является вопрос определения времени (или скорости) сгорания угольных частиц в реакторе. Время сгорания зависит, в первую очередь, от размера частиц, технологических параметров реактора (температура, давление) и реакционной способности используемого угля. Реакционная способность характеризует особенности кинетики сгорания частиц конкретной марки угля, и является его основной характеристикой, как для процесса газификации, так и для любых дру-

¹ аспирант, Інститут газу НАН України, г. Київ

² академик НАН України, д-р техн. наук, професор, Інститут газу НАН України, г. Київ

гих процессов сжигания угольной пыли (топки энергетических котлов, вдувание пылеугольного топлива в доменную печь и т. д.). Вследствие очень высокой сложности процессов сгорания и газификации, решение данных вопросов возможно только путём экспериментального исследования конкретных типов углей.

Экспериментальными исследованиями кинетики сгорания углей занимался целый ряд исследователей, начиная ещё 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.

Поэтому, вопрос создания относительно простого и недорого экспериментального метода определения реакционной способности углей, позволяющего оперативно и достоверно оценить качество конкретного вида топлива, по-прежнему остаётся актуальным.

Анализ последних исследований и публикаций. Выводы, сделанные рядом ученых о взаимодействии горящих угольных частиц в факеле, позволяют использовать данные экспериментальных исследований сгорания одиночных частиц для моделирования реальных факельных процессов, что позволяет существенно упростить проведение экспериментов.

Вопросами экспериментального исследования сгорания одиночных угольных частиц занимались следующие ученые: В.И. Бабий, Я. Левендис, С.В. Бухман, Р.Х. Эссенхай, Д. Карабогдан, М. Шибакка, Л.И. Хитрин, Е.С. Головина и др. В последнее время, все экспериментальные исследования в данной области посвящены изучению сгорания частиц угольной пыли, т.е. частиц размером менее 100 мкм.

Все экспериментальные методы исследований сгорания одиночных угольных частиц можно условно разделить на 3 типа: оптический, пирометрический, термогравиметрический.

Суть оптического метода состоит в визуальном наблюдении за горящей частицей с помощью оптики, и фиксации изображения на высокоскоростную киносъемку.

Пирометрический метод заключается в непрерывном измерении температуры горящей частицы с помощью оптического пирометра. Для этих целей используются как двухлучевые, так и специально разработанные для подобных задач трехлучевые пирометры.

Метод термогравиметрического анализа заключается в регистрации изменения массы образца во времени. Данный метод применяется только для относительно крупных частиц или же навески мелких, и для исследования сгорания одиночных мелких частиц практически непригоден.

В работе Бабия и его группы время сгорания угольных частиц определялось методом микрокиносъемки (оптический метод) либо по осциллограммам пирометра (пирометрический метод) [1]. Угольные частицы вносились в реакционное пространство печи и обдувались газом с заданной скоростью потока. При этом, крупные частицы (100 – 1000 мкм) наклеивались на кварцевую иглу, мелкие (10 – 100 мкм) на кварцевые нити, диаметр которых составлял 10-20 мкм. Очевидно, что приклеивание частицы вносило определённые возмущения на процесс горения. Также стоит отметить высокую техническую сложность проведения экспериментов.

Аналогичные исследования проводились Р.Х. Эссенхаем в диапазоне частиц 300 – 2000 мкм [2]. В данном случае частицы приклеивались на плоскую подложку.

Левендис исследовал сгорание мелких угольных частиц (30 – 150 мкм) в свободном падении. Время горения частицы определялось одновременно с помощью высокочастотной киносъемки и с помощью температурных кривых, снятых при помощи, специально разработанного трёхлучевого пирометра. К недостаткам данного метода следует отнести высокую нестабильность трёхлучевых пирометров, а также сложность экспериментальной установки. Подробно описание установки и проведение экспериментов описано в [3].

Цель статьи – разработать относительно простой метод определения реакционной способности углей и проверить его достоверность на графитовых частицах.

Данный метод должен обладать следующими свойствами:

- относительная простота экспериментальной установки;
- возможность исследования кинетики сгорания одиночных угольных частиц в широком размерном диапазоне, в различных окислительных атмосферах;
- возможность определения температуры поверхности горящей частицы.

Изложение основного материала. Для решения поставленной задачи был разработан оптический метод исследования сгорания одиночных угольных частиц. Данный метод заклю-

чається в скоростній фотосьемке угольної частини в процесі її горіння і наступному аналізі отриманих даних.

Схема експериментальної установки представлена на рис. 1.

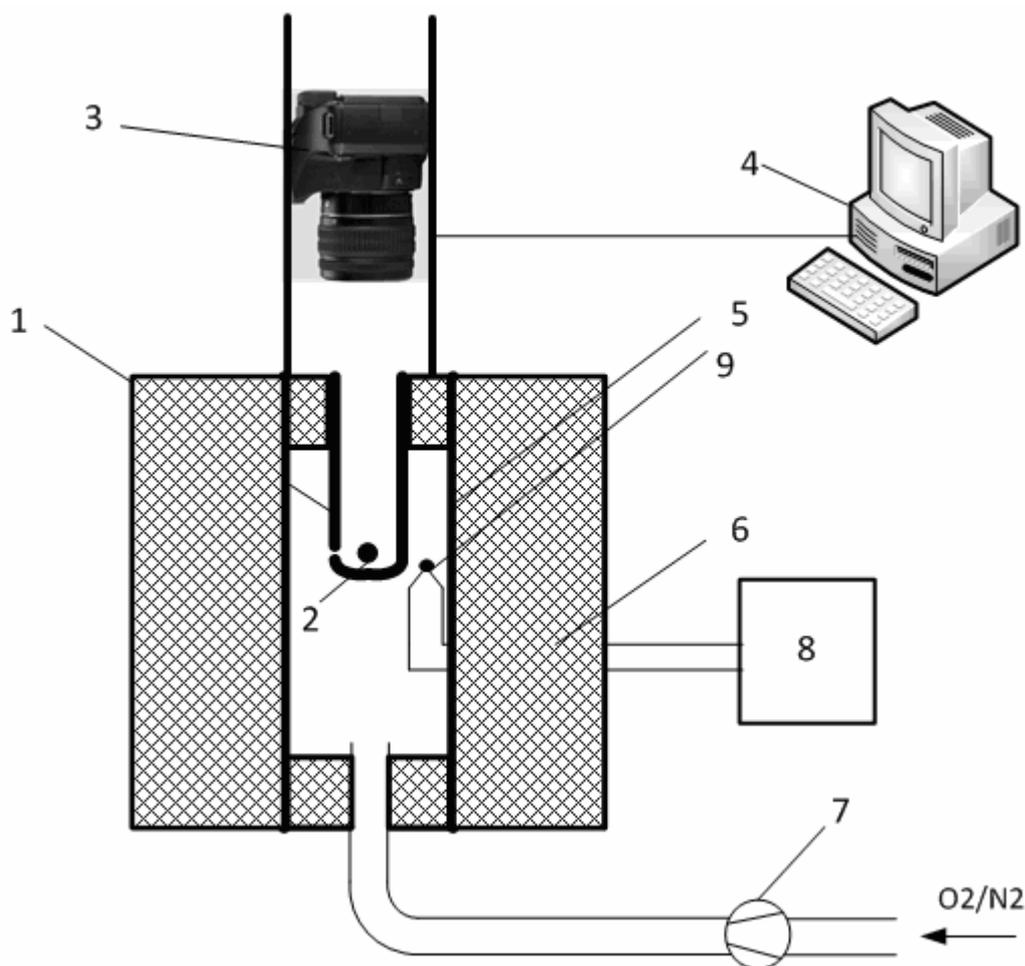


Рис. 1 – Схема експериментальної установки для дослідження кінетики згорання одиночних угольних частинок: 1 – реактор; 2 – гаряча частина; 3 – фотокамера або пирометр; 4 – центр обробки даних; 5 – робоча камера печі; 6 – теплоізоляція; 7 – ротаметр; 8 – регістратор температури; 9 – термопара

Реактор із хімічно і термічно стійкого матеріалу поміщений вертикально в робочу камеру печі, яка представляє собою трубку із кварцевого скла. Печь обігрівається чотирма карбидкремнієвими електронагрівачами. Максимальна робоча температура печі 1250 °С. Питання печі здійснюється через регульований автотрансформатор, що дозволяє здійснювати плавну регулювання і стабільність температури в робочій камері.

Вимірювання температури в зоні реакції здійснюється з допомогою платиноплатинородієвої термопары, введеної в робочу камеру максимально близько до зони протікання реакції, як показано на малюнку. Свободні кінці термопары підключені до автоматичного потенціометра, що дозволяє неперервно контролювати температуру в ході експерименту. В робочій камері печі підтримується визначена окислювальна атмосфера, що досягається за рахунок її хорошої герметизації. Підвод окислювальної суміші в робоче простір печі здійснюється знизу через скляну трубку. Расход суміші контролюється ротаметром.

Одиночна частина вкидається в реактор через отвір в верхній частині. Подача окислювальної суміші в реактор здійснюється через спеціально прорізане отвір розміром 2×5 мм.

Наблюдение за горящей частицей и, соответственно фотосъемка, осуществляются сверху через то же отверстие. Фотокамера закрепляется над печью на специально разработанном для этого координатнике, позволяющем добиться строгой соосности между камерой и реактором, а также регулировать расстояние от объектива до объекта. Для измерения температуры поверхности горящей частицы вместо фотокамеры на координатник крепится оптический пирометр.

Отработка методики осуществлялась на электродном графите с содержанием углерода более 98%. Исследования проводились на воздухе ($O_2 = 21\%$) и чистом кислороде ($O_2=100\%$) при температурах газовой фазы $900\text{ }^\circ\text{C}$ и $1050\text{ }^\circ\text{C}$.

Видеосъемка процесса горения производилась с частотой 50 кадров/с. Полученные видеофайлы разбивались на кадры и обрабатывались на компьютере. На полученных изображениях четко видно момент появления частицы в реакторе и её нагрев до температуры нижней стенки реактора. При равенстве температур частица сливается с фоном и становится незаметной. За начало процесса горения принимался момент, когда частица начинала светиться на фоне доньшка реактора, что говорит о дальнейшем росте температуры поверхности частицы. В связи с отсутствием зольного остатка в графите, окончанием горения считался момент полного выгорания углерода.

Опыты проводились на фракциях в диапазоне $0,16 - 2,0$ мм. Для каждой фракции было проведено 20-30 замеров, после чего данные подвергались статистической обработке.

При обработке данных были сделаны следующие допущения:

- форма всех частиц является сферической;
- частица выгорает, равномерно уменьшаясь в размере.
- подвод кислорода к частице осуществляется равномерно по всей поверхности;
- горение частицы осуществляется до CO_2 при явном избытке окислителя, омывающего частицу.

Все выше приведенные допущения, кроме последнего, сделаны на основании обзора и анализа особенностей горения натурального топлива, приведенного в [4].

Так называемый эффективный диаметр конкретной фракции определялся по средней поверхности сферической частицы от нижнего и верхнего предела фракции.

В связи с тем, что частица в реакторе обдувается потоком газа, а не находится в неподвижной среде, влияние относительной скорости газового потока на скорость горения частицы представляет большой интерес. В [1] была получена эмпирическая зависимость для расчета массообмена между углеродными частицами и газовой средой при горении. На основании результатов целого ряда экспериментальных исследований как авторов данной работы так и результатов других исследователей, было 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.

Для того, чтобы избавиться от влияния скорости газовой фазы, при проведении экспериментов, расход окислителя в рабочую камеру печи подбирался таким образом, чтобы расчётное 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 было экспериментально подтверждено для частиц размером до 2 мм включительно.

Группой ученых ВТИ им. Дзержинского под руководством В.И. Бабия была предложена эмпирическая зависимость времени выгорания коксового остатка сферической частицы от диаметра частицы, температуры газовой фазы и парциального давления кислорода в газовой фазе [1].

$$\tau_{z.k.} = k_{z.k.} \cdot 2,21 \cdot 10^8 \cdot \frac{100 - A_k}{100} \cdot \frac{\rho \cdot d^2}{T_r^{0,9} \cdot O_2}, \quad (1)$$

где $\tau_{z.k.}$ – время горения коксового остатка, с;

$k_{z.k.}$ – опытный коэффициент, характеризующий специфику выгорания частиц угля данной марки;

A_k^c – внутренняя зольность коксового остатка, %;

O_2 – объемная концентрация кислорода, %;

T_r – температура газовой фазы, К;

ρ – плотность косового остатка, $\frac{кг}{м^3}$;

d – начальный диаметр угольной частицы, м.

Данное уравнение было получено при обработке целого ряда результатов экспериментов различных авторов и справедливо для диффузионного режима выгорания угольных частиц углей любых марок при $Re < 1$.

Значение коэффициента $k_{г.к.}$ для углей разных марок меняются от 0,5 до 2,5 и может быть принято постоянным для угля каждой марки при широком диапазоне размеров частиц (20 – 1000 мкм) и параметров газовой среды в интервале $T_r = 1200 - 1800$ К, $O_2 = 5 - 21\%$.

Предложенное выше уравнение позволяет обработать данные по конкретной марки угля (в данном случае электродный графит) для разных параметров газовой фазы и размеров частиц, и определить значение $k_{г.к.}$.

Авторами статьи предлагается ввести коэффициент $R = \frac{1}{k_{г.к.}}$, называемый реакционной способностью угля, так как он характеризует непосредственно свойства конкретной марки угля и не зависит от размера частиц и параметров газовой фазы. Однако следует учитывать, что все исследования, на основании которых было получено уравнение (1), в качестве газовой фазы выступала смесь кислорода с азотом. Поэтому ранее определенные значения коэффициента $k_{г.к.}$ являются характеристикой конкретного вида топлива при его сгорании в кислородоазотной среде. Влияние замены азота на водяной пар (CO_2) на значение коэффициента $k_{г.к.}$ подлежит дальнейшему исследованию.

Значение средней удельной скорости сгорания частицы за период горения, приведенное к единице поверхности, определялось по следующей формуле

$$U = \frac{m}{F \cdot \tau}, \text{ мг/мм}^2 \cdot \text{с}, \quad (2)$$

где $m = \frac{\rho \cdot \pi \cdot d^3}{6}$ – масса частицы для данной фракции, мг;

F – средняя площадь поверхности сферической частицы для данной фракции за период горения, мм^2 ;

τ – среднее время сгорания частицы данной фракции, с.

Среднее значение поверхности сгорающей частицы топлива определялось по выражению

$$F = \frac{F_{нач} + F_{кон}}{2} = \frac{\pi \cdot d^2}{8}, \text{ мм}^2, \quad (3)$$

где $F_{нач} = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ – начальная площадь исходной частицы топлива, мм^2 ;

$F_{кон} = 0$ – конечная площадь сгоревшей частицы.

Измерение температуры поверхности частицы осуществлялось двухлучевым пирометром, установленным на координатник вместо фотокамеры.

Результаты экспериментальных исследований на электродном графите в диапазоне размеров частиц 0,16 – 2,0 мм, при температурах газовой фазы $T_r = 900^\circ\text{C}$ и 1050°C и концентрациях кислорода $O_2 = 21\%$ и 100% , были обработаны по уравнению (1). Как видно на рис. 2, полученные данные хорошо описываются уравнением. На основании аппроксимации полученных данных с помощью уравнения (1) был рассчитан коэффициент $k_{г.к.}$, который для электродного графита оказался равным 1,49.

Очевидно, что проведя аналогичные исследования на других углях, можно получить значения $k_{г.к.}$ для углей различных марок, и, таким образом, определить реакционную способность данных типов углей.

По приведенной методике можно определять время сгорания частиц не только в диапазоне проведенных экспериментальных исследований, но и для частиц размером до 25 мкм. Дан-

ний вывод сделан на основании того, что уравнение (1), по утверждению авторов [1], было проверено на результатах экспериментальных исследований для диапазона частиц 10 – 1000 мкм, в диапазоне концентрации кислорода 5 – 100%. Верхний предел по размеру частиц определяется конструктивными особенностями установки и влиянием массообменных процессов, и приблизительно равен 3 мм.

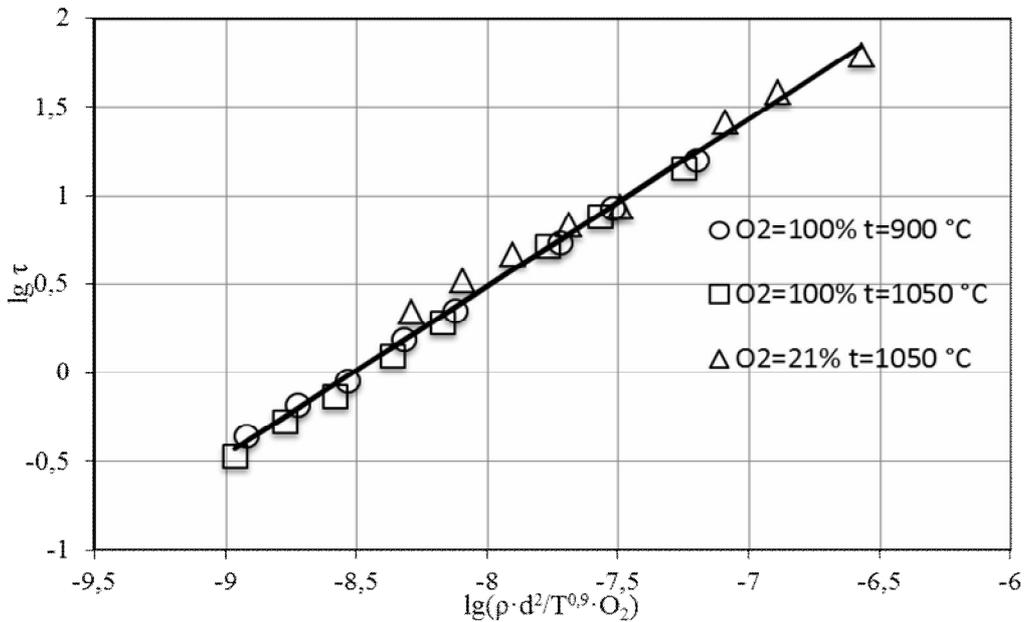


Рис. 2 – Зависимость длительности горения частиц графита от размера частицы и параметров газовой фазы

При обработке данных было проанализировано влияние на удельную скорость сгорания размера частиц и параметров газовой фазы. На рисунке 3 представлена зависимость удельной скорости сгорания частиц графита в чистом кислороде (O₂ = 100%) от размера частиц при температурах газовой фазы 900°C и 1050°C.

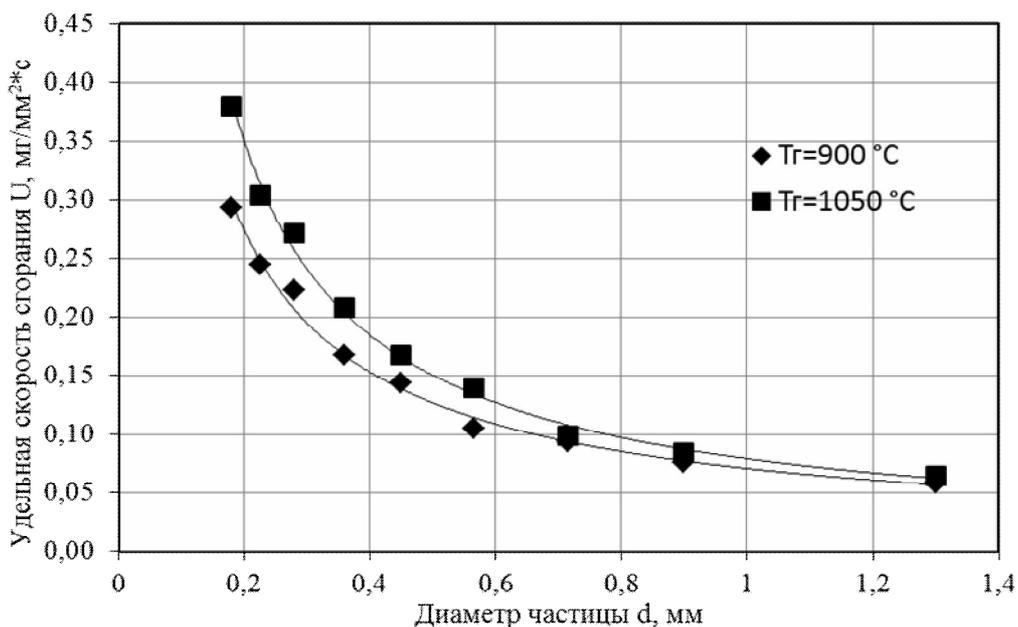


Рис. 3 – Зависимость удельной скорости сгорания частиц графита от размера частиц

Зависимость удельной скорости сгорания частиц графита от их диаметра носит чётко выраженный гиперболический характер, что хорошо объясняется теоретически и согласуется с экспериментальными данными других авторов [4]. Чётко прослеживается влияние на скорость горения температуры газовой фазы. Особенно это влияние заметно на мелких фракциях ($d < 0,4$ мм).

Для фракций в диапазоне 0,4 – 2,0 мм были проведены измерения температуры поверхности горящих частиц при горении в чистом кислороде. Результаты измерений представлены на рисунке 4.

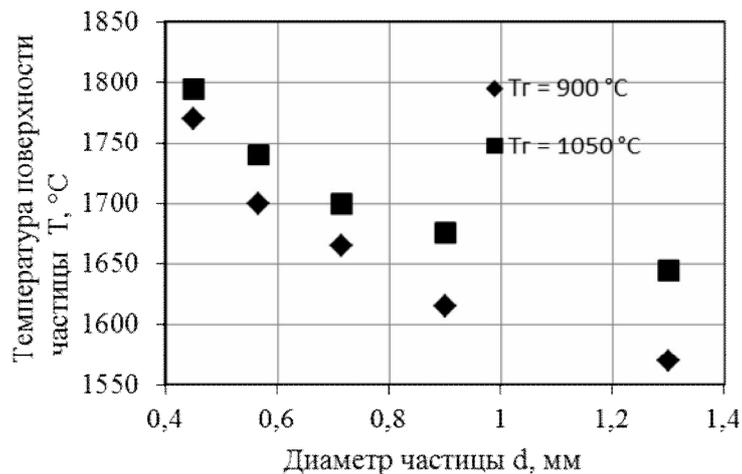


Рис. 4 – Зависимость температуры поверхности частицы от диаметра

Как видно из рисунка, температура газовой фазы оказывает прямое влияние на температуру горячей частицы. Причём разница в температурах заметнее проявляет себя на крупных фракциях (75°C для фракции 1-1,6 мм), а на мелких является незначительной (25°C для фракции 0,4-0,5 мм). Также очевидно, что температура горячей частицы существенно выше, чем температура омывающей её газовой среды.

Характер зависимости температуры частицы от диаметра качественно схож с характером зависимости удельной скорости горения от диаметра. Из этого можно сделать вывод, что при отсутствии или малом влиянии скорости потока газа, омывающего частицу, температура является определяющим параметром для скорости сгорания частицы.

Выводы

1. Предложен экспериментальный метод исследования сгорания одиночной угольной частицы. Данный метод позволяет определять время сгорания угольных частиц в размерном диапазоне 0,025 – 2 мм, и температуру поверхности частиц в диапазоне 0,4 – 2 мм.
2. Разработанная методика была апробирована на электродном графите в воздушной и кислородной атмосферах, и в дальнейшем может применяться для определения реакционной способности углей любых типов.
3. Экспериментально подтверждена вторая степень зависимости времени сгорания сферической углеродной частицы от её размера, и первая степень зависимости времени сгорания от концентрации кислорода в газовой фазе.

Список использованных источников:

1. Бабий В.И. Горение угольной пыли и расчёт пылеугольного факела / В.И. Бабий, Ю.Ф. Куваев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.
2. Essenhigh R.H. Kinetics of coal combustion: The influence of oxygen concentration on the burning-out time of single particles / R.H. Essenhigh, G. Beeston // J. Phys. Chem. – 1963. – Vol.67 – P. 1349.
3. Bejarano P.A. Single coal particle combustion in O₂/N₂ and O₂/CO₂ environments / P.A. Be-

jarano, Y.A. Levendis // Comb. and Flame. – 156. – 2008. – P. 270-287.

4. Резняков А.Б. Горение натурального твердого топлива / А.Б. Резняков [и др.]. – Алма-Ата: Наука, 1968. – 410 с.

Bibliography:

1. V.I. Babij. Combustion of coal dust and calculation of pulverized coal flame / V.I. Babij, U.F. Kyvaev. – M.:Energoatomizdat, 1986. – 208 p. (Rus.)
2. Essenhigh R.H. Kinetics of coal combustion: The influence of oxygen concentration on the burning-out time of single particles / R.H. Essenhigh, G. Beeston // J. Phys. Chem. – 1963. – Vol.67 – P. 1349.
3. Bejarano P.A. Single coal particle combustion in O₂/N₂ and O₂/CO₂ environments / P.A. Bejarano, Y.A. Levendis // Comb. and Flame. – 156. – 2008. – P. 270-287.
4. Reznjakov A.B. Combustion of natural solid fuel / A.B. Reznjakov [and oth.]. – Alma-Ata:Nauka, 1968. – 410 p. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 15.05.2013

УДК 621.6.057.8

© Шаганов А.Ю.*

ОПТИМИЗАЦИЯ МАТЕРИАЛОЗАТРАТ НА ВОЗДУХОВОДЫ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ТАБЛИЦ

Предложено определение диаметров воздуховодов с минимальными материало-затратами на основе решения оптимизационной задачи методом динамического программирования в системе электронных таблиц. Показано, что применяемые методы проектирования вентиляционных систем не обеспечивают минимальных материало-затрат на воздуховоды.

Ключевые слова: аспирационная система, гидравлическая сеть, воздуховоды, оптимизация, динамическое программирование.

Шаганов О.Ю. Оптимізація матеріалозатрат на повітроводи вентиляційних систем методом динамічного програмування в системі електронних таблиць. Запропоновано визначення діаметрів повітроводів з мінімальними матеріалозатратами на основі рішення оптимізаційної задачі методом динамічного програмування в системі електронних таблиць. Показано, методи, що застосовуються для проектування вентиляційних систем, не забезпечують мінімальних матеріалозатрат на повітроводи.

Ключові слова: аспіраційна система, повітроводи, гідравлічна мережа, оптимізація, динамічне програмування.

O.J. Shaganov. Optimization of materials consumption for ventilation systems air ducts outlay with dynamic programming in spreadsheets. Determining the duct diameters of minimum material outlay by solving the optimization problem with dynamic programming in spreadsheets is proposed. It is shown that existing methods of designing ventilation systems do not provide for minimal material outlay of ducts.

Keywords: exhaust system, air ducts, hydraulic network, optimization, dynamic programming.

* главный инженер, «Научно-исследовательская лаборатория фильтров Немцова», г. Мариуполь