

А. ОТС, Д. ЕГОРОВ

ВЫГОРАНИЕ УГЛЕРОДА ИЗ ПОРИСТЫХ ВЫСОКОЗОЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Значительную часть времени горения частиц натурального твердого топлива занимает выгорание углерода из его коксового остатка. Знание этого явления необходимо при проведении различных технологических процессов, связанных с выжиганием углерода и других нелетучих веществ из пористых материалов. В качестве примера можно привести изготовление некоторых пористых строительных и керамических материалов, обжиг черного брикета для цементного клинкера, регенерацию некоторых видов катализаторов путем выжигания из них углерода и т. д.

Выгоранию углерода из малозольных пористых материалов посвящено много фундаментальных исследований, и существует довольно подробно разработанная теория объемного реагирования в них (см., напр., [1, 2] и др.). В то же время выгорание углерода из высокозольных материалов исследовано недостаточно и существующие теоретические предположения экспериментально проверены слабо. В частности, при теоретическом исследовании выгорания кокса высокозольного топлива с малой плотностью горючих компонентов в [3] предположено, что в ходе горения поверхность активных пор внутри частицы пропорциональна мгновенной плотности горючих, т. е. $s_i \sim \rho$.

Цель настоящей работы заключается в экспериментальном исследовании влияния первоначальной и мгновенной плотности горючих на кинетику их выгорания из высокозольных материалов.

В наших опытах использовались сферические образцы диаметром 15 мм. Последние изготовлялись из углеродного порошка однородного фракционного состава (фракция 63—100 мкм) и однородного порошка каолина. В качестве углерода использовался электродный кокс производства Кохтла-Ярвского сланцеперерабатывающего комбината. Из смеси углеродного и каолинового порошков под давлением 110 МПа были спрессованы цилиндрические заготовки, из которых затем вырезались шарики. Сферические образцы прогревались в нейтральной среде до температуры 1000—1200°С. Плотность углерода в изготовленных таким образом образцах колебалась от 0,310 до 0,853 г/см³.

Схема опытной установки представлена на рис. 1. Установка состоит из автоматических аналитических весов и платиновой печи, в которую поступает газ необходимого состава. Сферический опытный образец насаживался на термопару, укрепленную на весах. Для записи температуры среды в печи и температуры образца, а также для записи из-

менения его массы в процессе выгорания углерода использовались самопишущие потенциометры ЭПП-09. Температура в печи во время опытов поддерживалась постоянной при помощи автоматического регулятора.

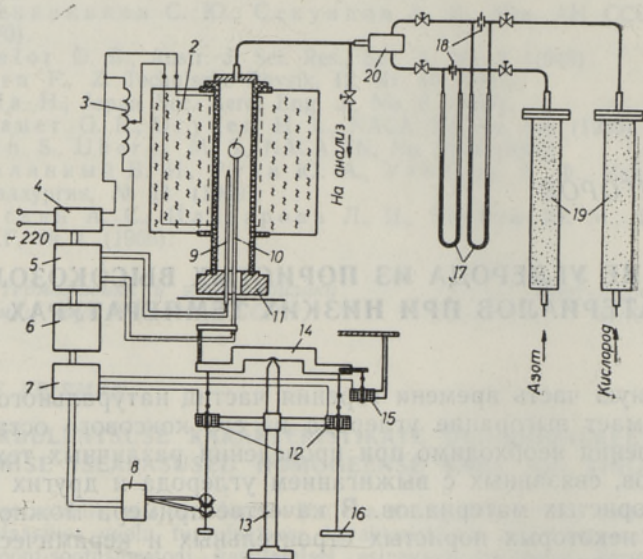


Рис. 1. Схема опытной установки.

1 — опытный образец; 2 — платиновая печь; 3 — автотрансформатор; 4 — терморегулятор; 5 — самопишущий потенциометр для записи температур; 6 — самопишущий потенциометр для записи изменения массы образца; 7 — электродный блок; 8 — гиренакладывающий механизм; 9 — термопара для измерения температуры среды в печи; 10 — термопара для измерения температуры внутри образца; 11 — газовый затвор; 12 — уравнивающие индукционные катушки; 13 — стойка весов; 14 — коромысло весов; 15 — датчик; 16 — чаша весов; 17 — дифференциальные манометры; 18 — диафрагменные расходомеры; 19 — фильтры; 20 — смеситель.

Экспериментальные исследования проводились в диапазоне температур печи 500—600°. Газовая смесь, поступающая в печь при комнатной температуре (20°), имела по объему 15% кислорода. Использование смеси с более низким содержанием кислорода оказалось не рациональным из-за чрезмерного увеличения длительности опытов. Скорость среды в печи изменялась в пределах 7—8,3 см/с при постоянном $Re = 13,1$. В ходе опытов было замечено, что выгорание углерода при всех выбранных первоначальных плотностях горючих и температурах происходило равномерно по всему объему образцов, т. е. процесс горения был близок к внутрикинетическому режиму.

Вначале опытный образец нагревался в атмосфере азота до температуры печи. Затем, после достижения стационарного теплового режима, в печь пускалась смесь азота и кислорода.

В опытах непосредственно регистрировались температура в печи, температура внутри образца и изменение массы образца. Последнее являлось основой для определения объемной скорости выгорания углерода

$$K_v^c = -\frac{dq}{d\tau} \quad (1)$$

Учитывая, что мгновенная плотность углерода в материале $\rho = \rho_0 z$, получим

$$K_v^c = -\rho_0 \frac{dz}{dt} \quad (2)$$

Отметим, что в кинетическом режиме горения (выгорание углерода происходит равномерно по всему объему) относительное содержание углерода z в любой точке образца равно среднему по всему объему. С другой стороны, предполагая, что процесс горения подчиняется закону Аррениуса, будем иметь

$$K_v^c = \beta s_i k_0 c e^{-\frac{E}{RT}} \quad (3)$$

На рис. 2 представлена объемная скорость выгорания углерода из высокозольного материала, деленная на концентрацию кислорода, в зависимости от T^{-1} при различных первоначальных плотностях горючих для некоторых значений относительного содержания углерода. Зависимость скорости выгорания углерода от T^{-1} в логарифмических координатах

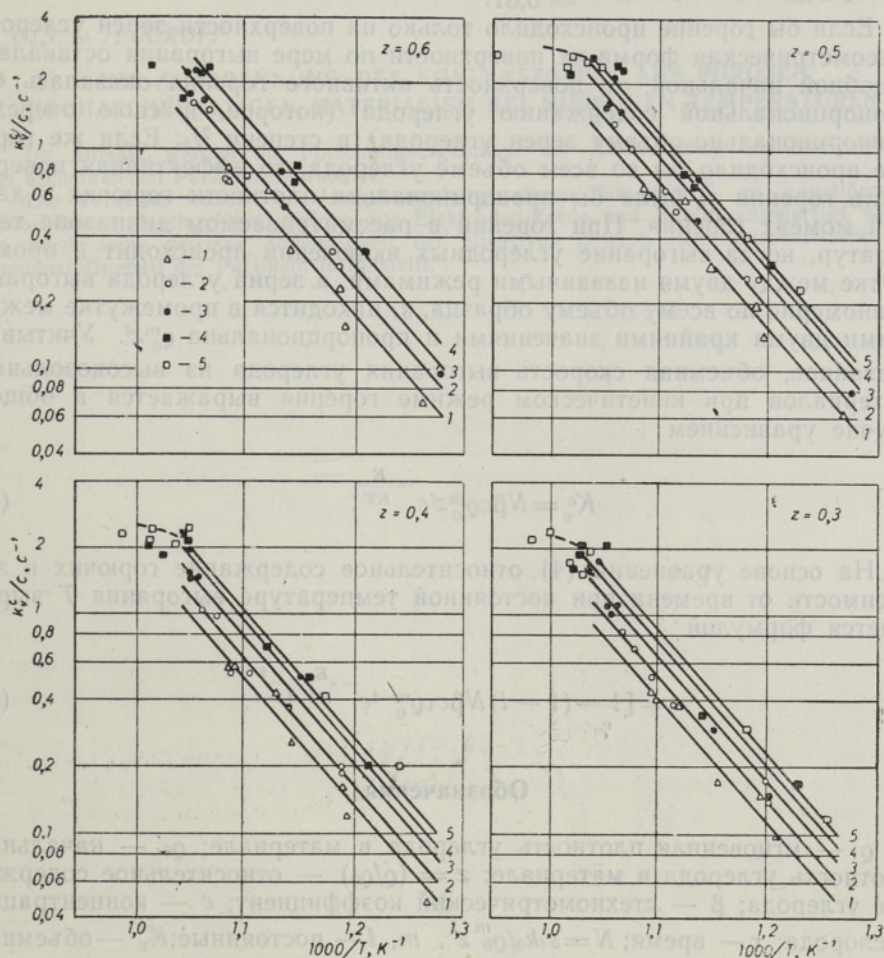


Рис. 2. Зависимость K_v^c / c от T^{-1} .

1 — $\rho_0 = 0.310$; 2 — $\rho_0 = 0.435$; 3 — $\rho_0 = 0.655$; 4 — $\rho_0 = 0.769$; 5 — $\rho_0 = 0.853$ г/см³.

натах при различных начальных плотностях горючих и при различных z в материале аппроксимируется параллельными прямолинейными зависимостями, что объясняется однородностью углеродных включений во

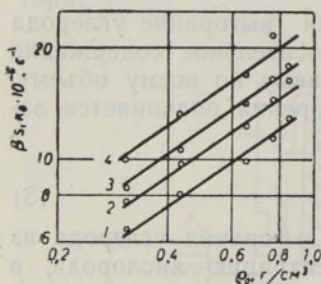


Рис. 3. Зависимость комплекса $\beta s_i k_0$ от Q_0 .
1 — $z = 0,3$; 2 — $z = 0,4$;
3 — $z = 0,5$; 4 — $z = 0,6$.

всех образцах. Сопоставляя энергию активации на различных стадиях выгорания, получаем, что она равна $E = (100 \pm 3) 10^3$ кдж/моль. Полученное значение энергии активации приблизительно составляет 60% энергии активации горения чистого углерода [1].

На рис. 3 представлены зависимости комплекса $s_i k_0$ от начальной плотности углерода в образцах для некоторых значений z . Видно, что комплекс $s_i k_0$ пропорционален начальной плотности горючих в степени $m = 0,70$ и относительному содержанию углерода в рассматриваемый момент времени в степени $l = 0,81$.

Если бы горение происходило только на поверхности зерен углерода и геометрическая форма их поверхности по мере выгорания оставалась подсобной начальной, то поверхность активного горения оказалась бы пропорциональной содержанию углерода (которое, в свою очередь, пропорционально объему зерен углерода) в степени $2/3$. Если же горение происходило бы во всем объеме углерода, то эффективная поверхность горения s_i была бы пропорциональна плотности горючих в данный момент горения. При горении в рассматриваемом диапазоне температур, когда выгорание углеродных включений происходит в промежутке между двумя названными режимами, а зерна углерода выгорают равномерно по всему объему образца, s_i находится в промежутке между этими двумя крайними значениями и пропорциональна $Q_0^m z^l$. Учитывая сказанное, объемная скорость выгорания углерода из высокозольных материалов при кинетическом режиме горения выражается в общем случае уравнением

$$K_v^c = N \beta c Q_0^m z^l e^{-\frac{E}{RT}}. \quad (4)$$

На основе уравнения (4) относительное содержание горючих в зависимости от времени при постоянной температуре выгорания T выражается формулой

$$z = [1 - (1 - l) N \beta c \tau Q_0^{m-1} e^{-\frac{E}{RT}}]^{1-l}. \quad (5)$$

Обозначения

Q — мгновенная плотность углерода в материале; Q_0 — начальная плотность углерода в материале; $z = (Q/Q_0)$ — относительное содержание углерода; β — стехиометрический коэффициент; c — концентрация кислорода; τ — время; $N = s_i k_0 / Q_0^m z^l$, m , l — постоянные; K_v^c — объемная скорость выгорания углерода; s_i — внутренняя удельная поверхность активных пор в образце; k_0 — предэкспоненциальный множитель; E — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура.

ЛИТЕРАТУРА

1. Предводителев А. С., Хитрин Л. Н., Цуханова О. А., Колодцев Х. И., Гроздовский М. К., Горение углерода, М., 1949.
2. Канторович Б. В., Основы теории горения и газификации твердого топлива, М., 1958.
3. Гуревич М. А., Палеев И. И., Тимошин Ю. А., ЖТФ, 24, 1960 (1954).

Таллинский политехнический институт

Поступила в редакцию
11/1 1972

A. OTS, D. JEGOROV

**SÜSINIKU VÄLJAPÕLEMINE KÕRGE TUHASISALDUSEGA MATERJALIDEST
MADALATEL TEMPERATUURIDEL**

Katsed toimusid temperatuuridel 500—600°C, kusjuures kasutati ühtlasest süsiniku- ja kaoliinipulbrist kokkupressitud katsekehi. Tehti kindlaks seos tuharikaste materjalide põlevainesisalduse ja reaktsiooni efektiivse sisemise pindala vahel.

A. OTS, D. JEGOROFF

**DIE AUSBRENNUNG DES KOHLENSTOFFES AUS PORÖSEN
HOCHASCHHEHALTIGEN MATERIALIEN BEI NIEDRIGEN TEMPERATUREN**

Im Aufsatz werden die Forschungsergebnisse der Ausbrennung des Kohlenstoffes aus aschenreichen Partikeln betrachtet.

Die Versuche wurden bei Umgebungstemperaturen 500—600°C an kugelförmigen Probekörpern durchgeführt, welche aus Elektroden-Kohle und Kaolin angefertigt waren. Es wurde eine gewisse Abhängigkeit der effektiven inneren Reaktionsoberfläche vom Kohlenstoffgehalt der Partikeln festgestellt.