

Д. ЕГОРОВ, А. ОТС, И. АНДРЕЕВ

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ГОРЮЧИХ НА ВНУТРЕННЮЮ ДИФФУЗИЮ ПРИ ГОРЕНИИ ВЫСОКОЗОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Процесс выжигания углерода при высоких температурах из высокозольных материалов в основном определяется диффузией кислорода к реакционной поверхности через образующийся в ходе горения слой золы. До сих пор вопросы внутренней диффузии кислорода в порых топливах исследовались только для частиц беззольного или малозольного топлива [1,2] и некоторых конкретных видов зольного топлива [3-5].

В данной работе рассматриваются некоторые вопросы влияния первоначальной плотности горючих многозольного топлива на внутренне-диффузионную характеристику его зольного остатка.

Эксперименты по определению коэффициента внутренней диффузии при горении высокозольных материалов производились на состоящей из печи и автоматических весов термомассометрической установке [6], которая позволяла фиксировать изменение массы опытного образца, а также температуру внутри его и в окружающей среде.

Опыты проводились со сферическими образцами диаметром 15 мм, которые спрессовывались из однородных порошков каолина и электродного кокса производства Кохтла-Ярвского сланцеперерабатывающего комбината ($R = 63 \div 100$ мкм). Благодаря такому методу изготовления образцы имели одинаковую структуру, но различались по содержанию углерода. После изготовления образцы прокаливались в течение 6,5 часов в атмосфере чистого азота до температуры 1100°С. Начальное содержание горючих в материале находилось в пределах $q_0 = 0,30 \div 0,82$ г/см³. Опыты проводились в диапазоне температур окружающей среды 800—1200°С. При этом температура в печи поддерживалась постоянной с точностью $\pm 5^\circ$ С.

Исследования проводились в среде смеси азота и кислорода. Концентрация кислорода во всех опытах составляла по объему 15%. В зависимости от температуры скорость в печи выбиралась так, чтобы число Рейнольдса, рассчитанное по диаметру образца, было постоянным ($Re = 13$).

Исходя из уравнения горения сферической частицы многозольного топлива [3], коэффициент внутренней диффузии, выраженный при помощи мгновенной и средней скоростей выгорания, рассчитывался соответственно по формулам

$$D_i = \frac{1}{4\pi\beta c_1 r_0} \cdot \frac{1-\psi}{\psi} \left| \frac{dM}{d\tau} \right| \quad (1)$$

и

$$D_i = \frac{1}{4\pi\beta c_1 r_0} \cdot \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{1 - \psi^2}{1 - \psi^3} - 1 \right) \frac{\Delta M}{\tau} \quad (2)$$

Относительный радиус $\psi = r/r_0$ невыгоревшего ядра определялся из относительного остатка $z = M/M_0$ углерода в образце как $\psi = \sqrt[3]{z}$. В случае использования выражения (2) величину ψ можно определить также путем непосредственного измерения радиуса невыгоревшего ядра в разрезанном образце. В случае же полного выгорания образца для определения коэффициента внутренней диффузии при известном начальном содержании M_0 углерода в нем необходимо только определить полное время τ_0 выгорания частицы топлива.

Большая часть опытов продолжалась до полного выгорания образцов, при этом по мгновенным скоростям на различных стадиях выгорания производилось определение D_i . В некоторых опытах горение останавливалось прекращением подачи кислорода в печь (опыты с частичным выгоранием углерода). В этом случае после охлаждения образцы разрезались и производились измерения диаметра невыгоревшего ядра. Существенной разницы между данными, полученными обоими способами, не наблюдалось, однако последний дает более значительный их разброс.

При обработке результатов опытов концентрация кислорода на внешней поверхности образца определялась расчетным путем соответственно из выражений

$$c_1 = c_0 - \frac{1}{\alpha_D \cdot \beta \cdot 4\pi r_0^2} \left| \frac{dM}{d\tau} \right| \quad (3)$$

и

$$c_1 = c_0 - \frac{1}{\alpha_D \cdot \beta \cdot 4\pi r_0^2} \cdot \frac{\Delta M}{\tau}, \quad (4)$$

где $\alpha_D = DNu_D/2r_0$ — коэффициент кислородного обмена с внешней поверхностью частицы.

Коэффициент диффузии к внешней поверхности образца вычислялся из общеизвестного выражения $D = D_0(T/T_0)^n = 0,18(T/T_0)^2$ по температуре окружающей частицу среды. До сих пор не существует общепринятого выражения для расчета диффузионного критерия Нуссельта Nu_D . Так, Л. Н. Хитрин [2] предлагает формулу

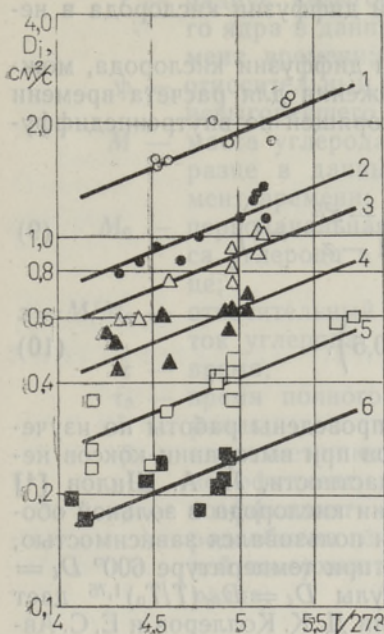
$$Nu_D = \frac{0,70 \sqrt{Re}}{1 - e^{-0,35\sqrt{Re}}}, \quad (5)$$

причем он считает, что при малых значениях Re число $Nu = 2$. Г. Гребер и др. [7] предлагают для диапазона $2 < Re < 200$ выражение

$$Nu_D = 2,0 + 0,6 Re^{0,5} Sc^{1/3}. \quad (6)$$

Значения Nu_D , вычисленные по (5) и (6) при $Re = 13$, равны соответственно 3,5 и 3,9, т. е. близки друг к другу. При обработке опытных данных было использовано последнее значение.

На рис. 1 в логарифмических координатах представлена зависимость коэффициента внутренней диффузии кислорода D_i от отношения $T/273$ для образцов с различным содержанием горючих. Видно, что полученные данные подтверждают степенную зависимость коэффициента диффузии от температуры и ее можно выразить формулой $D_i = D_{0i}(T/T_0)^n$.



← Рис. 1. Зависимость коэффициента внутренней диффузии D_i , вычисленного при $\beta = 0,375$, от отношения $T/273$ для образцов с начальным содержанием углерода: 1 — $0,82 \text{ г/см}^3$; 2 — $0,74 \text{ г/см}^3$; 3 — $0,645 \text{ г/см}^3$; 4 — $0,55 \text{ г/см}^3$; 5 — $0,435 \text{ г/см}^3$; 6 — $0,30 \text{ г/см}^3$.

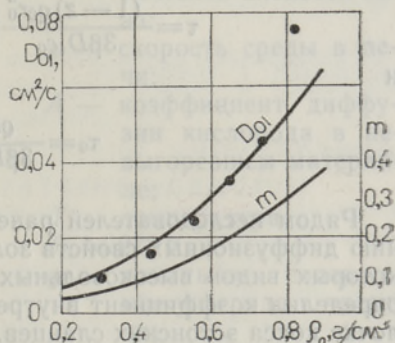


Рис. 2. Зависимости коэффициента внутренней диффузии кислорода в зольном остатке при температуре 273 К и отношения $m = D_i/D$ от первоначального содержания углерода.

Показатель степени n оказался приблизительно равным 2, т. е. таким же, как у коэффициента внешней диффузии кислорода. Это дает возможность пользоваться для проведения многих расчетов не зависящим от температуры отношением $m = D_i/D$. Сплошные линии на рис. 1 построены при значении $n = 2$.

Из представленных на рис. 1 данных видно, что при определенной температуре образца коэффициент внутренней диффузии в его зольном остатке сильно зависит от первоначального содержания горючих в образце. На рис. 2 приведена зависимость D_{O_i} от ρ_0 . Она аппроксимируется выражением

$$D_{O_i} = 0,004 + 0,075 \rho_0^2, \quad (7)$$

где ρ_0 — первоначальная плотность горючих в материале (г/см^3).

Обращает на себя внимание тот факт, что коэффициент внутренней диффузии кислорода зависит от ρ_0 в степени, большей единицы. Это можно объяснить тем, что в зольной оболочке, образующейся при выгорании материала с небольшим содержанием углерода, диффузионное сопротивление обусловлено порами в минеральном скелете и уменьшается за счет отдельных полостей, образующихся при выгорании углеродных включений. При выгорании частиц с большим содержанием горючих, пустоты, образовавшиеся при выгорании углерода, сливаются и более заметно уменьшают диффузионное сопротивление.

Таким образом, можно предположить, что в более общем случае коэффициент внутренней диффузии кислорода в первом приближении можно выразить формулой

$$D_{O_i} = A + B \rho_0^n, \quad (8)$$

где постоянные A , B , n зависят от первоначальной плотности материала, размера и формы частиц углерода и заполнителя, причем свободный

член A является коэффициентом внутренней диффузии кислорода в невыгоревшем материале.

Зная величину коэффициента внутренней диффузии кислорода, можно из (2) и (4) получить следующие выражения для расчета времени частичного и полного выгорания частицы, горящей во внутренидиффузионном режиме:

$$\tau = \frac{(1-z) \rho_0 r_0^2}{3\beta D_i c_0} \left(\frac{2m}{Nu_D} + 1,5 \frac{1-z^{2/3}}{1-z} - 1 \right) \quad (9)$$

и

$$\tau_0 = \frac{\rho_0 r_0^2}{3\beta D_i c_0} \left(\frac{2m}{Nu_D} + 0,5 \right). \quad (10)$$

Рядом исследователей ранее уже были проведены работы по изучению диффузионных свойств зольных остатков при выгорании коксов некоторых видов высокозольных топлив. В частности, Л. А. Шилов [4] определил коэффициент внутренней диффузии кислорода в зольной оболочке кокса эстонских сланцев. Для этого он пользовался зависимостью, аналогичной (2). По данным Л. А. Шилова при температуре 600° $D_i = 0,4 \text{ см}^2/\text{с}$, что при справедливости формулы $D_i = D_{0i} (T/T_0)^{1,75}$ дает $D_{0i} = 0,052 \text{ см}^2/\text{с}$. Аналогичную работу провели Д. К. Коллеров и Е. С. Авдотина [7]. Они принимали, что D_i зависит от температуры по закону $D_i = D_{0i} (T/T_0)^{1,5}$, и получили для кокса сухой перегонки сланцев $D_{0i} = 0,062 \text{ см}^2/\text{с}$. Если пересчитать эти значения при зависимости $D_i = D_{0i} (T/T_0)^2$, то данные Л. А. Шилова и Д. К. Коллерова получаются соответственно равными $D_{0i} \approx 0,039$ и $D_{0i} \approx 0,03 \text{ см}^2/\text{с}$. Меньшее значение D_{0i} в последнем случае можно, на наш взгляд, объяснить тем, что в [5] не было учтено сопротивление внешней диффузии.

Нами были проведены эксперименты по определению диффузионных характеристик сланцевого кокса. Сланец слоя В карьера Сиргала был закоксован при температуре 1100°С в течение 6 часов в атмосфере азота. Затем из него были выточены сферические образцы. Определение коэффициента диффузии кислорода в зольном остатке было проведено по описанному в статье методу при температурах окружающей среды 600 , 800 и 900°С . На основе полученных данных был рассчитан коэффициент внутренней диффузии кислорода при 273 К , который в среднем оказался равным $0,0365 \text{ см}^2/\text{с}$. Это значение близко к данным других авторов [4, 5].

Обозначения

D_i — коэффициент внутренней диффузии в зольной оболочке;	диффузии кислорода в окружающей среде при 273 К ;
D — коэффициент внешней диффузии кислорода в окружающей среде;	c_0 — концентрация кислорода в окружающей среде;
D_{0i} — коэффициент внутренней диффузии в зольной оболочке при 273 К ;	c_1 — концентрация кислорода на поверхности образца;
D_0 — коэффициент внешней	r_0 — наружный радиус образца;

r — радиус невыгоревшего ядра в данный момент времени;	Nu_D — диффузионный критерий Нуссельта;
ψ — относительный радиус невыгоревшего ядра;	$Sc = \nu/D$ — критерий Шмидта;
M — масса углерода в образце в данный момент времени;	$Re = \omega 2r_0/\nu$ — критерий Рейнольдса;
M_0 — первоначальная масса углерода в образце;	n, B — постоянные;
$z = M/M_0$ — относительный остаток углерода;	ν — коэффициент кинематической вязкости газа;
τ — время;	ω — скорость среды в печи;
τ_0 — время полного выгорания;	A — коэффициент диффузии кислорода в невыгоревшем материале;
β — стехиометрический коэффициент;	T — температура;
α_D — коэффициент кислородообмена с внешней поверхностью образца;	$T_0 = 273\text{ K}$;
	q_0 — начальное содержание углерода в частице;
	$m = D_i/D$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Предводителев А. С., Хитрин Л. Н., Цуханова О. А., Колодцев Х. И., Гроздовский М. К., Горение углерода, М.—Л., 1949.
2. Хитрин Л. Н., Физика горения и взрыва, М., 1957.
3. Гуревич М. А., Палеев И. И., Тимошин Ю. А., Процесс выжигания горючих добавок из пористых материалов, ЖТФ, 24, № 4 (1954).
4. Шилов Л. А., О диффузионных и кинетических свойствах кокса сланца-кукерита, Изв. АН ЭССР, Сер. физ.-матем. и техн. н., VII, № 1 (1958).
5. Коллеров Д. К., Авдотина Е. С., Определение диффузионной характеристики и скоростей горения кусков сланцевого кокса, Теплоэнергетика, № 8 (1958).
6. Отс А., Егоров Д., Выгорание углерода из пористых высокозольных материалов при низких температурах, Изв. АН ЭССР, Физ. Матем., 21, 277 (1972).
7. Гребер Г., Эрк С., Григуль У., Основы учения о теплообмене, М., 1958.

Таллинский политехнический институт

Поступила в редакцию
14/IV 1972

D. JEGOROV, A. OTS, I. ANDREJEV

PÖLEVAINESISALDUSE MÕJU SISEDIFUSIOONI KARAKTERISTIKALE KÕRGE TUHASISALDUSEGA KÜTUSE PÕLEMISEL

Käsitletakse süsinikusisalduse mõju hapniku sisedifusioonile sarnaneva struktuuriga kõrge tuhasisaldusega ainetes ning näidatakse hapniku sisedifusiooniteguri sõltuvust temperatuurist. Selgus, et see tegur on proportsionaalne temperatuuri ruuduga.

D. JEGOROV, A. OTS, I. ANDREJEV

EINFLUSS DER DICHTe DES KOHLENSTOFFES AUF DIE INNEREN DIFFUSIONSEIGENSCHAFTEN BEI DER VERBRENNUNG ASCHENREICHER BRENNSTOFFE

Der Aufsatz behandelt den Einfluß des Kohlenstoffgehaltes auf die innere Sauerstoffdiffusion in aschenreichen Brennstoffen bei gleichartigem Bau. Auch die Abhängigkeit des inneren Sauerstoffdiffusionskoeffizienten von der Temperatur wird gezeigt.