ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 139 1965

О РАСЧЕТЕ КИНЕТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ФАКЕЛА НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ВЫГОРАНИЯ

Е. А. КОНЬКОВ

(Представлена научным семинаром кафедры котлостроения и котельных установок)

Горящий пылевоздушный поток, движущийся в цилиндрической трубе радиуса R, ограничим следующими условиями:

1) поток одномерный, ламинарный ($\mathrm{Re} \ll 2000$);
2) движение потока равномерное ($T = \mathrm{const}$);
3) скорость движения частиц по отношению к потоку равна нулю.

При таких условиях пылеугольный факел можно считать однородной системой и применять к нему метод комплексного исследования выгорания [1]. Кроме того, будем считать топливные частицы сферическими, а их выгорание происходящим по внешней геометрической поверхности.

Дифференциальное уравнение выгорания рассматриваемого потока

$$\frac{dG_т}{dx} = M \alpha c s, \tag{1}$$

где $G_т$ — расход невыгоревшего топлива в сечении камеры горения (на единицу площади поперечного сечения камеры);
M — стехиометрический коэффициент;
c — концентрация кислорода в рассматриваемом сечении;
α — видимая константа скорости реакции;
s — реакционная поверхность в единице объема твердой фазы.

Очевидно, что при постоянном по длине реакционной трубки коэффициенте избытка воздуха, равном единице, количество невыгоревшего топлива пропорционально количеству неизрасходованного окислителя, т. е.

$$G_т = \omega c M, \tag{2}$$

где ω — скорость потока.

Подставляя значение $G_т$ из (2) в (1), получим

$$\omega \frac{dc}{dx} = \alpha c s. \tag{3}$$

Интегрируя уравнение (3) при начальном условии

$$x = 0;\ c = c_0, \tag{4}$$

после потенцирования получим

$$c = c_0 \exp - \int_0^x \frac{\alpha s}{\omega} dx, \tag{5}$$

где c_0 — концентрация окислителя на входе в реакционную трубку Величина

$$z = \int_0^x \frac{\alpha s}{\omega} dx \tag{6}$$

в общем случае есть функция большого числа переменных (кинетических, режимных и т. п.), вследствие чего интеграл (6) не берется в квадратурах.

Однако если принять для каждого из узких пределов выгорания

$$\alpha = \bar{\alpha} = \text{const}, \qquad s = \bar{s} = \text{const}, \tag{7}$$

где $\bar{\alpha}$ и $\bar{s}$ — средние значения α и s — на рассматриваемом участке, то можно провести зональное интегрирование

$$z = \sum_{i=1}^{n} \int \frac{\bar{\alpha}_i s_i}{\omega} dx = \sum_{i=1}^{n} \frac{\bar{\alpha}_i s_i}{\omega} (x_i - x_{i-1}). \tag{8}$$

Таким образом,

$$c_x = \frac{c}{c_0} = \exp - \sum_{i=1}^{n} \frac{\alpha_i s_i}{\omega} (x_i - x_{i-1}). \tag{9}$$

В выражениях (7) — (9) и последующих i означает номер сечения в конце исследуемых участков выгорания, которых всего n.

Согласно α — формулы [2] при $\beta = 1$

$$\Omega = (1 - c_x), \tag{10}$$

где Ω — степень выгорания факела,

β — коэффициент избытка воздуха.

Из (9) и (10) получаем для i-го участка выгорания

$$\ln (1 - \Omega_i) = \bar{\alpha}_i \bar{s}_i \tau_i = \alpha_{0i} \exp - \frac{E_i}{RT} \bar{s}_i \tau_i, \tag{11}$$

где $\tau_i = \dfrac{x_i - x_{i-1}}{\omega}$ — время пребывания частиц на i-ом участке;

$(1 - \Omega_i) = 1 - \dfrac{c_{i-1} - c_i}{c_{i-1}}$ — степень недожога факела на этом участке.

Логарифмируя повторно уравнение (11), получаем окончательное выражение для определения кинетических констант для i-го участка

$$\ln \left[\frac{-(\ln 1 - \Omega_i)}{\bar{s}_i \tau_i} \right] = \ln \bar{\alpha}_{0i} - \frac{E_i}{RT}, \tag{12}$$

легко решаемое обычным графическим способом [3].

Приемом, аналогичным рассмотренному, можно получить расчетные соотношения и для случая $\beta \neq 1$. Нетрудно, например, показать, что в этом случае выражение для концентрации окислителя в произвольном

сечении реактора по сравнению с уравнением (5) видоизменяется следующим образом

$$c = \frac{c_0}{\beta} \exp - \int_0^x \frac{\alpha s \beta}{\omega} dx + \frac{c_0}{\beta}(\beta - 1). \qquad (5')$$

Основное усложнение методики в данном случае связано с тем, что при этом коэффициент избытка воздуха является переменным по длине реакционной трубки. Это накладывает дополнительное условие на интегрируемость выражения (6)

$$\beta_i = \bar{\beta}_i = \text{const} \qquad (7')$$

и практически связано с затруднениями при оценке величины Ω^i для различных участков.

Величина реакционной поверхности, входящая в уравнение (12), легко оценивается только в случае использования в качестве критерия реакционной способности коэффициента реакционного газообмена, так как в этом случае она условно принимается равной внешней геометрической поверхности частиц. При этом среднее значение величины реакционной поверхности на каждом из выжигательных участков можно находить линейной интерполяцией ее начального и конечного значений для соответствующего участка, так как зависимость поверхности от степени выгорания имеет вид полукубической параболы

$$s_г = s_0 \sqrt[3]{(1 - \Omega)^2}, \qquad (13)$$

достаточно точно аппроксимируемой линейной зависимостью вплоть до весьма глубоких степеней выгорания (рис. 1).

Величина S_0 рассчитывается по начальному размеру частиц.

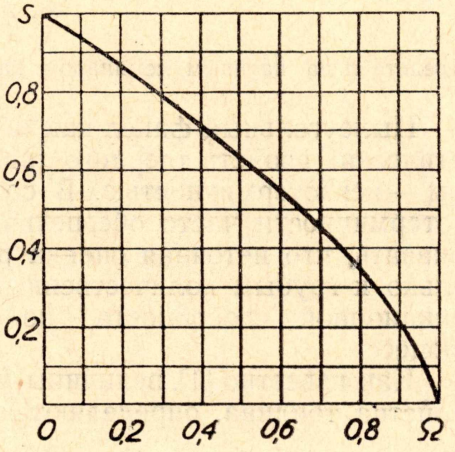

Рис. 1. Зависимость внешней поверхности топливных частиц от степени выгорания $\left(s = \frac{s_г}{s_0} = \sqrt[3]{(1-\Omega)^2}\right)$

Выводы

1. Рассматривается методика расчета кинетических констант по данным исследования одномерного изотермического факела на различных стадиях выгорания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. В. Канторович. Основы теории горения и газификации твердого топлива. Изд. АН СССР, М., 1958.
2. А. Б. Резняков. Горение пылеугольного факела как полидисперсной системы. Алма-Ата, 1958.
3. Г. М. Панченков и В. П. Лебедев. Химическая кинетика и катализ. Изд. МГУ, 1961.