

АНАЛИЗ ГОРЕНИЯ СЕРЫ

В настоящее время в технологических линиях ряда производств (удобрений, пластмасс, кислот и т.д.) эксплуатируется значительное количество топочных устройств для сжигания серы.

Разнообразие способов и конструкций печей для сжигания серы обуславливается недооценкой особенностей серы как топлива. В отличие от других видов жидкого топлива она характеризуется большими теплотой испарения, температурой воспламенения, но небольшой теплотой сгорания.

Горение серы в воздухе или кислороде может быть представлено уравнением:



По закону действующих масс скорость реакции будет

$$\frac{dC_S}{d\tau} = k C_S \cdot C_{O_2},$$

где C_S , C_{O_2} - текущие концентрации серы и кислорода (количество молей в единице объема); $k = A e^{-E/RT}$ - константа скорости.

Воспользовавшись уравнением неразрывности для постоянно-го сечения

$$\frac{w}{v} = \frac{w_o}{v_o} \quad \text{или} \quad \frac{w}{w_o} = \frac{v}{v_o} = \frac{\mu T}{\mu_o T_o}$$

и обозначив глубину реакции (относительное количество невыгоревшей серы) через

$$\Omega = \frac{G_S}{(G_S)_o} = \frac{w C_S}{w_o (C_S)_o},$$

выражаем текущую концентрацию серы через начальную

$$C_S = \frac{\mu_o T_o}{\mu T} (C_S)_o \Omega.$$

По уравнению реакции (1)

$$M dG_{O_2} = dG_S,$$

где M - стехиометрический коэффициент реакции.

Интегрируя это уравнение, получим

$$M \left[(C_{O_2})_o w_o - C_{O_2} w \right] = (C_s)_o w_o (1 - \mathfrak{R}).$$

По определению избытка воздуха имеем

$$(C_{O_2})_o = \frac{(C_s)_o \alpha}{M},$$

где α - коэффициент избытка воздуха; $\alpha = \frac{M(C_{O_2})_o}{(C_s)_o}$,

отсюда $\frac{C_{O_2} w}{(C_{O_2})_o w_o} = 1 - \frac{1 - \mathfrak{R}}{\alpha}$

и $C_{O_2} = (C_{O_2})_o \frac{\mu_o T_o}{\mu T} \left(1 - \frac{1 - \mathfrak{R}}{\alpha}\right)$.

Возвращаясь к скорости реакции, имеем

$$w \frac{dC_s}{dx} = \frac{w_o}{w} w (C_s)_o \frac{d\mathfrak{R}}{dx} = k C_s C_{O_2}.$$

И окончательно уравнение закона действующих масс можно представить в виде

$$\frac{d\mathfrak{R}}{dx} = \frac{k}{w_o} (C_{O_2})_o \mathfrak{R} \left(\frac{T_o}{T}\right)^2 \left(1 - \frac{1 - \mathfrak{R}}{\alpha}\right),$$

учитывая, что по условию реакции (1) $\frac{\mu_o}{\mu} = 1$.

Рассмотрим решение этого уравнения применительно к адиабатным условиям сжигания серы, когда тепло реакции идет в основном на нагрев образующихся печных газов, т.е.

$$Q dG_s = c_p \gamma_o w_o dT, \quad (2)$$

где Q - тепловой эффект реакции за вычетом тепла, идущего на нагрев смеси воздуха и серы от температуры подачи их в топку до температуры воспламенения, т.е. T_o :

$$Q = Q_p - C_p (T_o - T_{вх}) \frac{M(G_{O_2})_o}{\gamma_o} \cdot \alpha.$$

Выразив текущую температуру горения из уравнения (2) через \mathfrak{R} и T_o , т.е.

$$T = T_o + \frac{Q(G_s)_o}{C_p \gamma_o w_o} (1 - \mathfrak{R}) = T_o + b(1 - \mathfrak{R}),$$

и подставив ее в уравнение закона действующих масс, получим уравнение в дифференциальном виде сжигания серы в адиабатных условиях:

$$\frac{dR}{dx} = \frac{A}{w_o} e^{-\frac{E}{R[T_o + b(1-R)]}} (C_{O_2})_o \left[\frac{T_o}{T_o + b(1-R)} \right]^{2x} \times \left(1 - \frac{1-R}{\alpha}\right).$$

Разложив экспоненциальную функцию в ряд $e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} \dots$ и проинтегрировав его, получаем окончательное решение

$$k \ln(\alpha - 1 - R) + L \ln R + M(\alpha - 1 - R) \Big|_{R_o}^R = x \Big|_{x_o}^x,$$

где
$$k = \frac{w_o \alpha}{A(C_{O_2})_o T_o^2 (\alpha - 1)} (2bT_o \alpha - 4bT_o - T_o^2 - 4b^2 + 4b^2 \alpha -$$

$$- b^2 \alpha^2) + \frac{w_o E \alpha}{A(C_{O_2})_o R T_o^2 (\alpha - 1)} (b\alpha - 2b - T_o) -$$

$$- \frac{w_o E \alpha}{A(C_{O_2})_o 2R^2 T_o^2 (\alpha - 1)} ;$$

$$L = \frac{w_o \alpha}{A(C_{O_2})_o T_o^2 (\alpha - 1)} (T_o + b)^2 + \frac{w_o E \alpha}{A(C_{O_2})_o R T_o^2 (\alpha - 1)} x$$

$$+ (T_o + b) + \frac{w_o E \alpha}{A(C_{O_2})_o 2R^2 T_o^2 (\alpha - 1)} ;$$

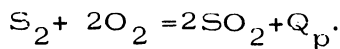
$$M = \frac{w_o \alpha b^2}{A(C_{O_2})_o T_o^2}.$$

Приведенная выше математическая модель рассматривает горение атомарной серы, между тем, как показано в [1], в паровой фазе сера находится в виде молекул S_8 , S_6 , S_4 и

S_2 . Состав паров серы при различной температуре показан на рис. 1.

Поэтому можно предположить, что при реальных температурах горения серы в печах (свыше 700°C) последняя вступает в реакцию окисления в виде молекул S_2 .

И реакция горения рассматривается в виде



Скорость реакции будет

$$\frac{dC_{S_2}}{d\tau} = k C_{S_2} C_{O_2}^2.$$

Тогда уравнение в дифференциальном виде горения серы в адиабатных условиях примет вид

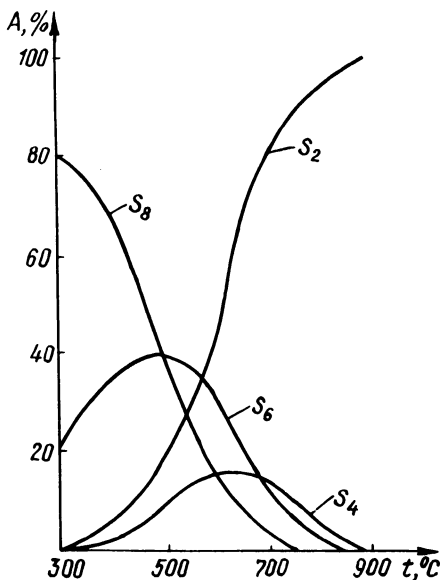


Рис. 1. Зависимость процентного содержания молекул серы S_8 , S_6 , S_4 , S_2 от температуры.

$$\frac{d\Omega}{dx} = \frac{A}{w_o} e^{-\frac{E}{R [T_o + b(1-\Omega)]}} (C_{O_2})_o^2 \Omega \left(\frac{\mu_o}{\mu}\right)^3 \times$$

$$\times \left[\frac{T_o}{T_o + b(1-\Omega)} \right]^3 \left(1 - \frac{1-\Omega}{\alpha}\right)^2,$$

которое может быть проинтегрировано.

Л и т е р а т у р а

1. Особенности сжигания серы в циклонных устройствах/С.А. Цыганков, М.М.Кочеров, В.Д.Терентьев, Л.С.Чернобай. - Химическая промышленность, 1977, №10, с.63.