

Член-корреспондент АН СССР З. Ф. ЧУХАНОВ и А. П. ЧИРКИН

### ГОРЕНИЕ ГАЗОВЗВЕСИ КОКСОВЫХ ЧАСТИЦ

Теоретический расчет процесса горения газозвеси имеет большое практическое значение для существующих камерных топок. При сжигании большинства видов натуральных топлив сжигание коксовых частиц топлива является главнейшим решающим этапом процесса, а при комплексных энерго-технологических схемах использования твердых топлив — по существу единственным процессом, протекающим в топочной камере. Известные попытки теоретического расчета горения газозвеси коксовых частиц (1) или носили односторонний характер или недостаточно правильно учитывали кинетическую сторону химического процесса. В данной работе сделана попытка создания приближенного метода теоретического расчета горения газозвеси. Задачу формулируем следующим образом.

Горящий гидродинамически установившийся поток газозвеси мелких частиц кокса размером  $d_0$  имеет большое поперечное сечение и постоянные по сечению скорости, так что задачу можно считать практически одномерной. Температура горящих частиц остается постоянной по мере их выгорания. Требуется определить распределение концентрации кислорода по длине факела при различных условиях горения, если реакция на поверхности кокса и вблизи ее протекает с образованием в качестве конечного окисла двуокиси углерода по макрокинетическому уравнению первого порядка.

Скорость расходования кислорода в факеле определится уравнением (2)

$$-\frac{dx}{d\tau} = \beta F(x - x_f) = kFx_f, \quad (1)$$

где  $\tau$  — время от начала горения частиц;  $x$  — средняя концентрация кислорода в газовом объеме;  $x_f$  — концентрация кислорода у контурной реакционной поверхности;  $F$  — величина внешней контурной поверхности частиц в единице объема;  $\beta$  — коэффициент переноса вещества;  $k$  — так называемая приведенная константа скорости реакции, учитывающая суммарно как внешнее, так и внутреннее реагирование.

Обозначим

$$Sm = \frac{\varphi\omega}{k}; \quad Sm = \frac{Nu}{Pv}; \quad \varphi = \frac{Nu}{Pe} = \frac{\beta}{\omega}; \quad Nu = \frac{\beta d}{D}; \quad Pv = \frac{kd}{D}, \quad (2)$$

где  $\varphi$  — функция переноса;  $\omega$  — скорость движения газозвеси;  $D$  — коэффициент молекулярной диффузии;  $Sm$ ,  $Nu$ ,  $Pv$  и  $Pe$  — соответственно, критерии Семенова, Нуссельта, Предводителя и Пекле.

Из (1) получим

$$\frac{x_f}{x} = \frac{1}{1 + 1/Sm}; \quad (3)$$

$$-\frac{dx}{d\tau} = \beta Fx \frac{1}{1 + Sm} = kFx \frac{1}{1 + 1/Sm}. \quad (4)$$

Принимая, что частицы кокса имеют сферическую форму, получим:

$$F = \frac{6k_1 x_0 d^2}{\alpha_n \gamma a_0^3}; \quad g = \frac{k_1 x_0 d^3}{x_n a_0^3} = k_1 \left[ x + \left( \frac{1}{\alpha_n} - 1 \right) x_0 \right]; \quad (5)$$

$$d = d_0 \sqrt[3]{\alpha_n \frac{x}{x_0} + (1 - \alpha_n)}, \quad (6)$$

где  $\alpha_n$  — коэффициент избытка воздуха;  $\gamma$  — объемный вес частиц в  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $g$  — текущие концентрации пыли;  $d$  — размер частиц кокса;  $k_1$  — переходной множитель.

Подставляя в (4) значения  $\beta$ ,  $F$ ,  $Sm$  и  $d$ , получаем исходное диф-

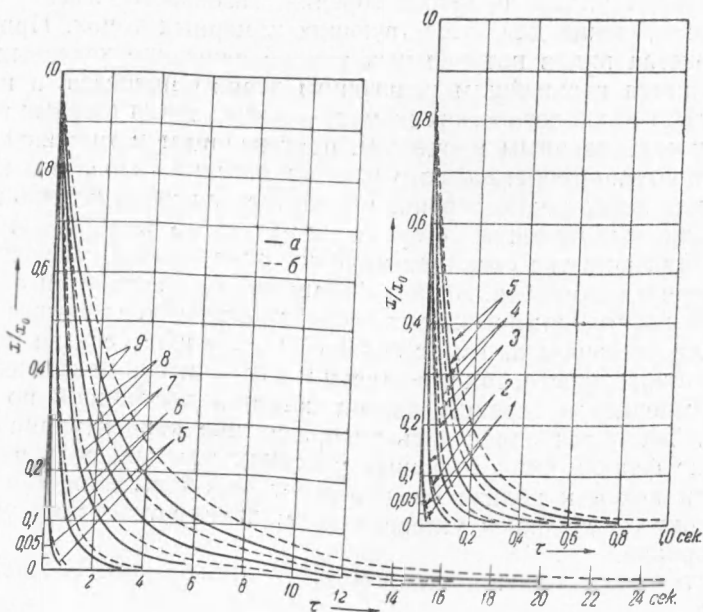


Рис. 1. Изменение концентрации кислорода в газозвеси кокса при различных размерах горящих частиц.  $a - T = 1837^\circ\text{K}$ ;  $b - T = 1473^\circ\text{K}$ . 1 —  $d_0 = 20 \mu$ ; 2 —  $40 \mu$ ; 3 —  $60 \mu$ ; 4 —  $80 \mu$ ; 5 —  $100 \mu$ ; 6 —  $200 \mu$ ; 7 —  $300 \mu$ ; 8 —  $400 \mu$ ; 9 —  $d_0 = 500 \mu$

ференциальное уравнение, определяющее распределение концентрации по времени движения мелких частиц газозвеси (по длине факела):

$$-\frac{dx}{d\tau} = \frac{6k_1 Nu Dx_0^{2/3}}{\gamma a_0^2 \alpha_n^{1/3}} x \frac{\sqrt[3]{x + x_0 (1/\alpha_n - 1)}}{1 + \frac{Nu Dx_0^{1/3}}{kd_0 \alpha_n^{1/3}} \sqrt[3]{x + x_0 (x + x_0) (1/\alpha_n - 1)}} = \frac{A_1 x \sqrt[3]{x + a_1}}{1 + a_2 / \sqrt[3]{x + a_1}} \quad (7)$$

Интегрируя уравнение (7) с учетом начальных условий, получаем общее решение задачи в следующем виде:

$$\tau = -\frac{1}{A_1} \int \frac{a_2 + \sqrt[3]{x + a_1}}{x \sqrt[3]{(x + a_1)^2}} dx + C; \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{при } \tau = 0, x = x_0 \quad \tau = & \frac{\gamma d_0^2 \alpha_n}{6k_1 x_0 \text{Nu} D \sqrt{1-\alpha_n}} \left\{ \frac{3}{2} \left( 1 + \text{Sm} \frac{1}{\sqrt{1-\alpha_n}} \right) \times \right. \\ & \times \ln \frac{1 - \sqrt[3]{1-\alpha_n}}{\sqrt{1-\alpha_n} + \alpha_n x/x_0 - \sqrt{1-\alpha_n}} \sqrt[3]{\frac{x}{x_0}} + \sqrt{3} \left( 1 - \text{Sm} \frac{1}{\sqrt{1-\alpha_n}} \right) \times \\ & \left. \times \left( \text{arc tg} \frac{\sqrt{3}}{1 + 2\sqrt{1-\alpha_n}} - \text{arc tg} \frac{\sqrt{3} \sqrt{1-\alpha_n} + \alpha_n x/x_0}{\sqrt{1-\alpha_n} + \alpha_n x/x_0 + 2\sqrt{1-\alpha_n}} \right) \right\}. \quad (9) \end{aligned}$$

Для стехиометрического отношения углерода и кислорода в газозвеси, т. е. для  $\alpha_n = 1$ , уравнение (7) упрощается:

$$-\frac{dx}{d\tau} \frac{A_1 x^{3/2}}{a_2 + \sqrt{x}}; \quad \tau = \frac{1}{A_1} \left[ \int \frac{dx}{x^{3/2}} + a_2 \int \frac{dx}{x^{5/2}} \right] + C; \quad (10)$$

$$\tau = \frac{\gamma d_0^2}{2k_1 x_0 \text{Nu} D} \left[ \left( \sqrt[3]{\frac{x_0}{x}} - 1 \right) + \frac{1}{2} \text{Sm} \left( \sqrt[3]{\left( \frac{x_0}{x} \right)^2} - 1 \right) \right]. \quad (11)$$

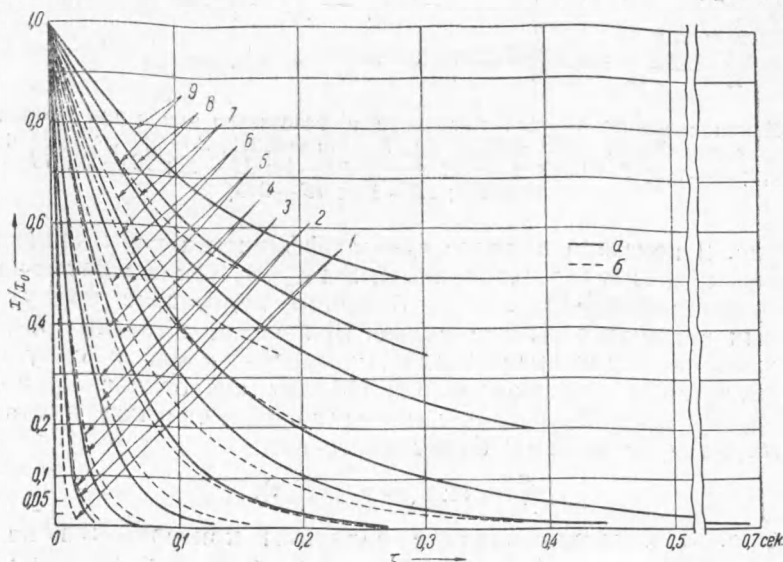


Рис. 2. Изменение концентрации кислорода в газозвеси кокса при различных коэффициентах избытка воздуха.  $d_0 = 100 \mu$ ;  $\text{Nu}_g = 2$ ;  $\gamma_T = 1200 \text{ кг/м}^2$ .  
 $a - T = 1473 \text{ }^\circ\text{К}$ .  $b - T = 1873 \text{ }^\circ\text{К}$ ;  $1 - \alpha_n = 0,05$ ;  $2 - 0,1$ ;  $3 - 0,2$ ;  
 $4 - 0,4$ ;  $5 - 0,6$ ;  $6 - 0,8$ ;  $7 - 1,2$ ;  $8 - 1,5$ ;  $9 - 2$

Прежде всего уравнение (11) весьма наглядно показывает условия перехода процесса горения в так называемую диффузионную область. При  $\text{Sm} = 0$  время выгорания частиц кокса определится следующим уравнением, являющимся одновременно интегралом уравнения (1) при  $x - x_f \approx x$ :

$$\tau = \frac{\gamma d_0^2}{2k_1 x_0 \text{Nu} D} \left( \sqrt[3]{\frac{x_0}{x}} - 1 \right). \quad (12)$$

В уравнении (11) общее время выгорания частиц как бы складывается из времени, определяемого „сопротивлением“ физического процесса переноса, и времени, определяемого „сопротивлением“ химического реагирования углерода с кислородом. Начиная с  $\text{Sm} \sim 10$

и выше (кинетическая область) время выгорания практически прямо пропорционально величине этого критерия.

На рис. 1 представлен характер выгорания коксовых частиц во времени, рассчитанный по уравнению (12) для частиц диаметром от 20 до 500  $\mu$  для температур 1473 и 1873° К.

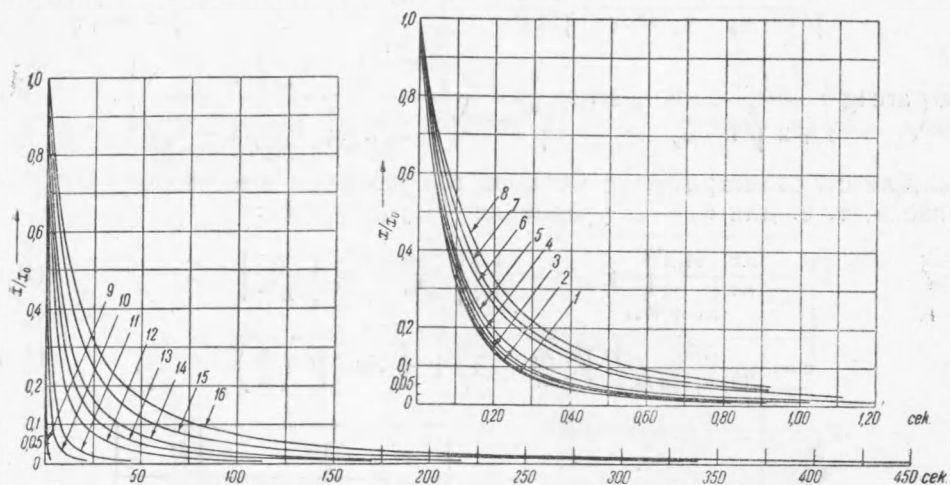


Рис. 3. Изменение концентрации кислорода в газозвеси кокса при различных значениях критерия Семенова ( $T = 1873^\circ \text{K}$ ). 1 —  $Sm = 0,001$ ; 2 — 0,01; 3 — 0,05; 4 — 0,1; 5 — 0,2; 6 — 0,5; 7 — 0,66; 8 — 0,8; 9 — 1; 10 — 10; 11 — 20; 12 — 50; 13 — 75; 14 — 100; 15 — 150; 16 — 200

На рис. 2 показано влияние  $\alpha_n$  — коэффициента избытка воздуха — на ход расходования кислорода при  $Sm < 0,1$ , так же как и на рис. 1 в диффузионной области. При большом недостатке воздуха, т. е. при малых значениях  $\alpha_n$ , предельная кривая расходования кислорода для газозвеси, так же как и для „кипящего“ слоя, в силу практически неизменных во времени  $\beta$  и  $F$  будет аналогична кривой расходования  $O_2$  в плотном слое коксовых частиц, так как в этом случае интеграл уравнения (1) будет иметь вид:

$$\frac{x}{x_0} = \exp(-\varphi_0 \omega F_0 \tau). \quad (13)$$

На рис. 3 показано влияние величины критерия  $Sm$  на время выгорания определенной доли кислорода в дутье, т. е. на длину факела горения.

В практических условиях повышение интенсивности горения газозвеси будет наиболее эффективным глазным образом путем снижения величины  $Sm$  при одновременном увеличении  $Nu$  и  $\varphi$ . Этот путь повышения интенсивности горения практически осуществим за счет повышения температуры горения и относительной скорости движения частиц кокса, а также путем организации энерго-технологических схем топливоиспользования, при которых в топку полного сжигания коксовой пыли поступают только наиболее мелкие коксовые частицы, нагретые до 700—1400° С.

Энергетический институт  
Академии наук СССР

Поступило  
25 XI 1953

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> Нуссельт, Zs. V.D.I., 68 (1924); В. И. Блинов, Изв. ВТИ, № 7 (1934); В. И. Блинов, П. Г. Смирнов, Тр. ВГУ, 11, в. 1, 33 (1939). <sup>2</sup> З. Ф. Чуханов, Изв. АН СССР, ОТН, № 4 (1953).