

Член-корреспондент АН СССР З. Ф. ЧУХАНОВ

**ВОСПЛАМЕНЕНИЕ КОКСОВОЙ ПЫЛИ**

Под воспламенением частиц твердого топлива и, в частности, кокса обычно принято понимать переход окислительного процесса с внешним подводом тепла в самопроизвольный процесс, сопровождающийся перегревом поверхности кокса (по сравнению с газовой средой), и обычно, но не обязательно, появлением пламени горящего газа вблизи поверхности коксовых частиц.

Рассмотрим процесс воспламенения и потухания коксовых частиц.

Газ с концентрацией кислорода  $x$  обтекает твердую коксовую частицу размером  $d$ , расположенную в слое таких же коксовых частиц. Газ со скоростью  $w_\phi$  движется по направлению  $z$ . Расход кислорода запишется в этом случае следующим уравнением:

$$-\frac{dx}{dz} w_\phi = f(x, T_c, d) = \beta F_p (x - x_{ст}). \quad (1)$$

Для реакции первого порядка по  $x_{ст}$ , выражая из (1), по В. И. Блинову (1),  $x_{ст}$  через  $x$ , получим:

$$-\frac{dx}{dz} = \frac{\beta}{w_\phi} F_p x \frac{1}{1 + \frac{\beta}{K_{пр}}}, \quad (2)$$

где  $T_c$  — температура поверхности;  $x_{ст}$  — концентрация кислорода у поверхности частицы;  $F_p$  — внешняя поверхность частиц кокса в единице объема;  $\beta$  — коэффициент массообмена, аналогичный коэффициенту теплообмена  $\alpha$ , и  $K_{пр}$  — в общем случае приведенный коэффициент\* скорости реагирования, а в случае, если  $F_p$  является всей реакционной поверхностью, — константа скорости реакции  $K$ .

Для мелких частиц, как показал Л. Н. Хитрин (2),

$$K_{пр} \approx K \approx K_0 \exp(-E/RT_c). \quad (3)$$

В этих условиях

$$-\frac{dx}{dz} = \varphi_{сл} F_p x \frac{1}{1 + \frac{\varphi_{сл} w_\phi}{K}} = K F_p x \frac{1}{w_\phi} \frac{1}{1 + \frac{K}{\varphi_{сл} w_\phi}}, \quad (4)$$

где  $E$  — так называемая энергия активации\*\* реакции, а  $\varphi_{сл}$  — коэффициент, или, правильнее сказать, функция переноса вещества.

В уравнении (4), определяющем интенсивность расходования кисло-

\* По А. С. Предводителю, Л. Н. Хитрину и О. А. Цухановой (2) — это „коэффициент реакционного газообмена“.

\*\* Для условий  $K_{пр} \neq K$   $E$  не является истинной энергией активации.

рода по длине слоя, дробный множитель отличает уравнение в первом случае от уравнения диффузионной области, во втором — от уравнения кинетической области. Таким образом, безразмерный критерий в дробном множителе определяет условия перехода гетерогенной реакции из кинетической в переходную и диффузионную\* области. Назовем этот критерий — критерием Семенова и обозначим его  $Sm$ . Для реакций первого порядка

$$Sm = \frac{Nu}{Arr_{пр}} = \frac{\varphi}{K_0} \omega_{\phi} \exp\left(\frac{E_{пр}}{RT_c}\right) = \frac{\beta}{K_{пр}}, \quad (5)$$

где  $Nu$  и  $Arr_{пр}$  — соответственно, критерии Нусельта и Аррениуса.

Из (4) очевидно, что  $Sm \approx 0$  отвечает диффузионной области; практически же при  $Sm < 0,1$  можно считать, что гетерогенная реакция находится в диффузионной области. При  $Sm > 10$  мы имеем практически дело уже с так называемой „кинетической“ областью.

При молекулярном переносе вещества, отвечающем малым  $\bar{w}$  и  $Re$  и практически имеющем место в аэрозвеси:

$$Sm = \frac{const \cdot D}{K_{пр} d}, \quad Arr_{пр} = \frac{K_{пр} d}{D}, \quad (6)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии, а величина  $const$  определяется геометрией и положением частицы. Так как выделение тепла на поверхности частиц и отвод тепла от частиц при установившемся режиме равны, то при отсутствии излучения можно записать

$$\alpha (T_c - T_{газа}) = \beta x q_0 \frac{1}{1 + Sm}, \quad (7)$$

где  $q_0$  — тепловыделение на единицу концентрации кислорода.

Но так как \*\*

$$\alpha = \beta c \gamma, \quad \text{а} \quad \frac{q_0 x}{c \gamma} = T_{пред} - T_{газа}, \quad (8)$$

$$\frac{T_c - T_{газа}}{T_{пред} - T_{газа}} = \frac{1}{1 + Sm}. \quad (9)$$

Решение алгебраического уравнения (9) определяет тепловой режим воспламенения и потухания коксовых частичек.

Для газозвеси коксовых частичек при малых значениях  $Re$  уравнение (9) запишется в виде:

$$\frac{T_c - T_{газа}}{T_{пред} - T_{газа}} = \frac{1}{1 + 7,9 \cdot 10^{-9} \cdot T_c^{1,5} d^{-1,0} K_0^{-1,0} \exp(E_{пр} / RT_c)}. \quad (10)$$

В диффузионной области температура поверхности частиц равна так называемой предельной  $T_{пред}$  температуре, близкой (для воздушного дутья) при горении до  $CO_2 \sim 2000^\circ C$ . При увеличении критерия Семенова горящие коксовые частицы только в конце кислородной зоны приобретают предельную температуру.

\* Из уравнения (4) очевидно, что деление на диффузионную и кинетическую области является условным и приближенным, но практически весьма удобным.

\*\* Принимая теплоемкость независимой от температуры и  $Pt = Pe / Re = 1$ .

Кинетическое уравнение для частиц пыли антрацита, по данным Л. Н. Хитрина (2), можно записать в виде:

$$-\frac{dx}{d\tau} = 13,5 \cdot 10^4 \exp\left(-\frac{33500}{RT_c}\right) x; \quad (11)$$

тогда уравнение (10) переписывается следующим образом:

$$\frac{T_c - T_{\text{газа}}}{T_{\text{пред}} - T_{\text{газа}}} = \frac{1}{1 + 5,8 \cdot 10^{-14} \cdot T_c^{1,5} d^{-1,0} \exp\left(\frac{33500}{RT_c}\right)}. \quad (12)$$

На рис. 1 дано графическое\* решение уравнения (12) для различных значений  $K_0 d$ . Кривые 1, 2, 3 и т. д. отвечают различным  $K_0 d$

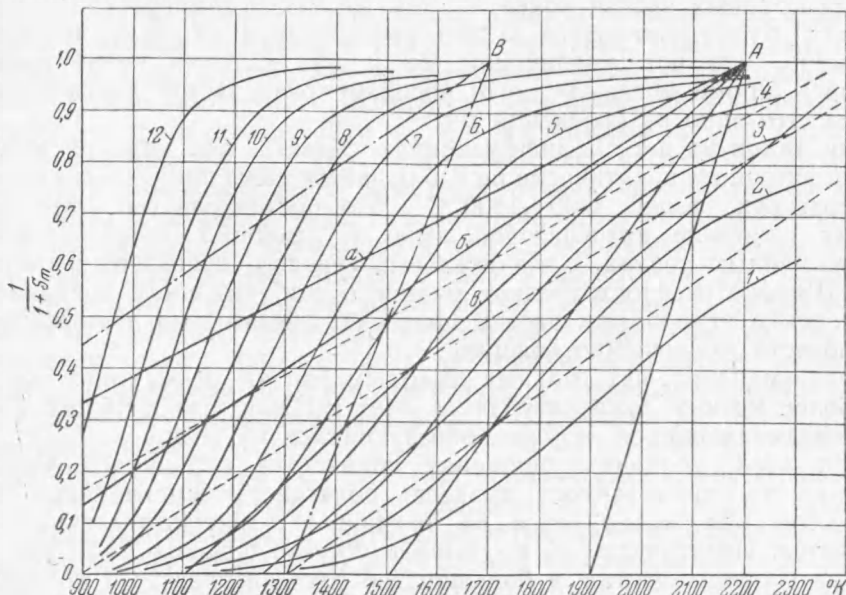


Рис. 1. Графическое решение уравнения теплового баланса коксовых частиц при параллельном стационарном потоке газовзвеси

Номера кривых	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$K_0 d$	2,25	4,50	9,00	18,0	36,00	72,00	144,00	288,00	576,00	1152,00	2300,00	9200,00
$\frac{d}{\text{см}}$	96	48	24	12	6	3	1,5	0,75	0,37	0,18	0,09	0,02

(для 1273° К)

правой части уравнения, а прямые линии получены при различных значениях  $T_{\text{газа}}$  и  $T_{\text{пред}}$ , отвечающим различному подогреву и составам реагирующего газа и продуктов реакции.

Точка А соответствует примерно образованию  $\text{CO}_2$  при холодном воздушном дутье, а точка В — при том же дутье отвечает процессу, при котором на поверхности углерода образуется исключительно окись углерода. Пучки прямых, сходящихся в точки А и В, соответствуют различным температурам дутья, отвечающим определенным  $T_{\text{пред}}$ . Пунктирные прямые отвечают подогретому воздушному дутью при образовании  $\text{CO}_2$ .

Если частицы нагреты до  $T_{\text{пред}}$ , то при холодном воздушном дутье все частицы мельче примерно 200  $\mu$  охлаждаются\*\*. Если к дутью при-

\* Графическое решение такого типа задачи было впервые предложено В. И. Блиновым (1).

\*\* Если, конечно, за период тушения (за счет реагирования кокса) газ не успеет нагреться до температуры, достаточной для горения мелких частиц.

бавить горячих продуктов реакции (за счет подсосывания в факел), то останутся раскаленными (горящими) и более мелкие частицы.

Чтобы мелкие холодные частицы кокса загорелись (воспламенились) и дали практически заметную разность температур  $T_c - T_{\text{газа}}$ , необходимо нагреть дутье до температуры свыше  $900^\circ\text{C}$ . В практических условиях, когда в горячее дутье подаются холодные частички кокса, крупные частицы медленно нагреваются, и поэтому мелкие частицы могут воспламениться раньше крупных.

При одинаковых значениях  $E$  различные  $K_0$  будут отвечать различной активности кокса, в том числе различным сортам углерода. Приблизленно для металлургического кокса и электродного угля (близким по активности)  $K_0$  будет в 20—30 раз больше, чем для антрацита, так что кривая  $b$  будет отвечать пыли металлургического кокса размером  $\sim 40 \mu$ , а  $\delta$  — частицам  $160 \mu$ .

Для крупных частиц кокса  $K_0$  (так же как и температурный коэффициент) будет изменяться за счет реагирования на поверхности пор. Очевидно, что при увеличении  $Re$  и при наличии конвективного переноса (кроме молекулярного) воспламенение частиц кокса затрудняется, что ясно из уравнения (9).

Как видно из рис. 1, диффузионная область для горения мелких частиц антрацита практически не наблюдается даже при весьма высоких температурах, выше  $1400\text{—}1600^\circ\text{C}$ . Это обстоятельство объясняет, почему сжигание антрацитовой пыли в камерных топках связано, в современных топках, с значительным уносом несгоревшего антрацита. Широко распространенное мнение о том, что после воспламенения горение углеродных частиц протекает обязательно в диффузионной области, совершенно неверно.

Воспламенение натуральных твердых топлив происходит обычно при более низких температурах за счет нагрева газа и частиц кокса от воспламеняющихся летучих, образующихся из угля.

При всех условиях снижение количества первичного воздуха (конечно, до определенного предела) облегчает воспламенение газозвеси, так как расход тепла на повышение температуры газозвеси снижается. Практически  $T_c$  не бывает обычно близким  $T_{\text{пред}}$ , так как система горящих частиц в большинстве случаев связана с потерей и подводом тепла излучением. Изменение порядка реакции, т. е. отличие ее от первого порядка по кислороду, не меняет принципиальных выводов, сделанных выше.

Энергетический институт  
им. Г. М. Кржижановского  
Академии наук СССР

Поступило  
12 X 1951

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> В. И. Блинов, Тр. Воронежск. гос. ун-та, 11, в. 1, Воронеж, 1939.  
<sup>2</sup> А. С. Предводителев, Л. Н. Хитрин, О. А. Цуханова и др., Горение углерода, АН СССР, М., 1949.