

ТЕПЛОТЕХНИКА

Член-корреспондент АН СССР З. Ф. ЧУХАНОВ

НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ГОРЕНИЕ ЧАСТИЦ
УГЛЕРОДА (КОКСА) В СЛОЕ

Для изотермического горения слоя кокса уравнения, определяющие изменение концентрации кислорода по длине слоя*, формально идентичны нашим уравнениям⁽¹⁾ для горения углеродного канала.

Для случая, когда учитывается продольная молекулярная диффузия:

$$\bar{c}_z = c_0 \exp \left[-\frac{1}{8} F_p z (\sqrt{Pe^2 + 16Nu} - Pe) \right], \quad (1)$$

где \bar{c}_z — средняя (по сечению слоя) концентрация кислорода в точке z (высоте слоя горящего кокса); F_p — внешняя „контурная“ поверхность углеродных частиц (без учета пор); $Re_\phi = w_\phi d/\nu$; w_ϕ — скорость фильтрации (на полное сечение шахты); d — средний диаметр частиц; $Nu = \alpha_d d/D$; $Pe = Re_\phi / Pr_d$.

Для условий, когда продольная диффузия не играет существенной роли, что для слоя соответствует значению $Re_\phi > 10$:

$$\bar{c}_z = c_0 \exp(-\varphi_l F_p z), \quad \text{где } \varphi_l = Nu / Pe. \quad (2)$$

Специфика слоя отражается в уравнениях (1) и (2) через величины Nu и φ_l .

По данным гидродинамической теории⁽²⁾ переноса, уравнение переноса в газе для слоя шаров имеет следующий несколько упрощенный вид:

$$\bar{Nu} \approx \frac{0,36 Re_\phi^{0,8}}{1 + 0,88 Re_\phi^{-0,1} (1,48 - 0,88 Re_\phi^{-0,1})} \approx 0,2 Re_\phi^{0,82}. \quad (3)$$

Уравнение (3) вполне удовлетворительно описывает почти все имеющиеся экспериментальные данные по переносу тепла и вещества в слое частиц как сферической, так и неправильной формы. Для значения Re_ϕ меньше 50 это уравнение будет давать несколько заниженные данные по Nu , и для этих значений Re_ϕ следует пользоваться уравнением А. П. Сокольского⁽³⁾, в котором учтено увеличение скорости в слое:

$$\bar{Nu} \approx 2 + 0,25 Re_\phi^{0,8}. \quad (4)$$

Таким образом, пользуясь уравнениями (3) и (4) для определения φ_l , мы можем для изотермического горения слоя малозольного кокса рассчитать расход кислорода по высоте слоя z , пользуясь уравнением (2).

Практически горение слоя кокса почти всегда неизотермично вследствие сильной экзотермики процесса горения. В работе⁽¹⁾ по неизотермическому горению углеродного канала мы убедились, что учет влияния неизотермичности по сечению канала мало изменяет

* В диффузионной области.

ход кислородной кривой и, как показывает расчет, приближенно компенсируется учетом влияния изменения значения Re_ϕ по длине канала. В отмеченной работе (1) мы не учитывали весьма существенного фактора — изменения весовой концентрации c_z по длине канала, связанного с повышением температуры газа.

Если через \bar{P} обозначить среднее парциальное давление кислорода, то интенсивность расходования кислорода по длине канала или слоя можно выразить следующим уравнением:

$$-\frac{d\bar{P}}{dz} = \varphi_i F_p \frac{T_c}{T_z} \bar{P} = \varphi_i F_p \frac{T_c \bar{P}}{T_c - (T_c - T_0) \exp(-\varphi_i F_p z)}. \quad (5)$$

где T_c — температура горячей поверхности, а T_0 — температура дутья, подаваемого в горящий слой кокса.

Интегрируя (5) и учитывая, что при $z = 0$ $\bar{P} = P_0$, мы получаем для неизотермического горения

$$\bar{P}_{ni} = P_0 \frac{T_0 / T_c}{\exp(\varphi_i F_p z) - 1,0 + T_0 / T_c}. \quad (6)$$

Уравнение (6) не учитывает изменения Re_ϕ по высоте слоя, а также не учитывает изменения φ_i за счет термодиффузии и наличия градиента температуры по сечению канала (1) или элемента слоя.

Если учесть влияние отмеченных факторов так, как это мы делали для канала (1), мы получим вместо (3) для слоя горящего кокса:

$$\bar{Nu}(z) \approx \frac{0,36 Re_\phi^{0,8}}{1 + 0,88 Re_\phi^{-0,1} (1,48 / f(T) - 0,88 Re_\phi^{-0,1})}. \quad (7)$$

Определяя φ из (7) и подставляя его в (5), а также учитывая изменение Re_ϕ по длине слоя, мы получим дифференциальное уравнение, учитывающее все три фактора влияния неизотермичности на распределение кислорода по слою. Для практической цели расчета процесса горения слоя, однако, вполне достаточно уравнения (6), учитывающего, как мы отмечали, основное влияние неизотермичности на распределение P кислорода по z .

В теоретическом уравнении (6) нет ни одной экспериментально определяемой из процесса горения величины, так как φ_i определяется из (3):

$$\varphi_i \approx \frac{0,5 Re_\phi^{-0,2}}{1 + 0,88 Re_\phi^{-0,1} (1,48 - 0,88 Re_\phi^{-0,1})} \approx 0,28 Re_\phi^{-0,18}. \quad (8)$$

Подставляя φ_i из (8)* в (6), а также значение F_p для слоя частиц, мы получим расчетное уравнение для определения кривой расхода кислорода по длине слоя частиц горящего углерода или малозольного кокса:

$$\frac{P_{ni}}{P_0} \approx \frac{T_0 / T_c}{\exp(0,84 Re_\phi^{-0,18} z / d) - 1,0 + T_0 / T_c}. \quad (9)$$

Уравнение (9) справедливо при условии реагирования кислорода на поверхности углерода или вблизи ее. Это может иметь место при исключительном образовании CO_2 на поверхности углерода, а также непосредственно вблизи ее или при высокоскоростном процессе горения, когда CO выносится из кислородной зоны несгоревшей.

В условиях работы практических аппаратов топок и газогенераторов, как правило, выполняется первое условие, и уравнение (9) вполне

* Определяя Re_ϕ при температуре дутья T_0 .

применимо для этого случая. При работе на крупнокусковом слое кокса при больших скоростях образующаяся на коксе окись углеро-

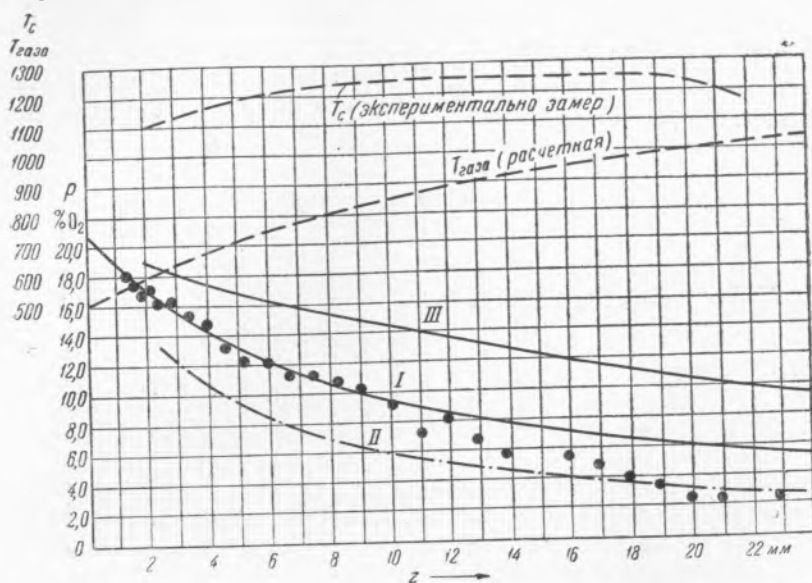


Рис. 1. Распределение концентрации кислорода и температуры в слое горящего древесного угля по опыту Н. А. Коржавиной. Размер шариков древесного угля 10 мм, скорость дутья $\sim 0,64$ м/сек. (опыт № 61). I — теоретическая кривая с учетом изменения размера частиц угля при горении и неизотермичности процесса горения; II — то же, но при догорании CO в межкусковом объеме; III — то же, но без учета изменения размера частиц и неизотермичности горения

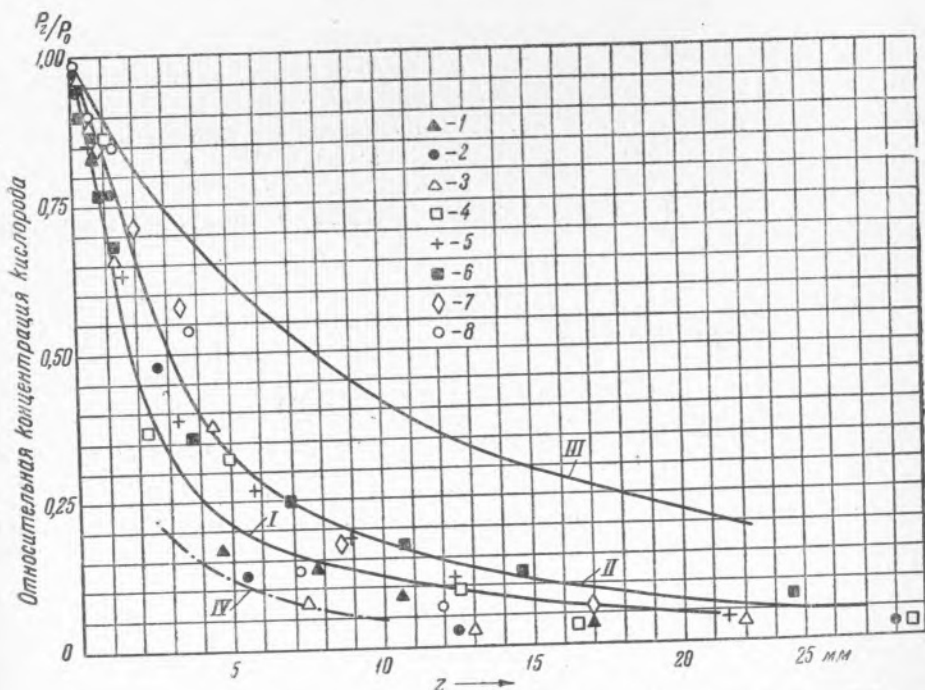


Рис. 2. Распределение концентрации кислорода в слое горящего кокса по опытам М. К. Гроздовского. Средний размер частиц 7,5 мм, скорость дутья $\sim 0,1$ м/сек., средняя температура $\sim 1400^\circ \text{C}$ (от 1300°C до 1600°C), холодное дутье. I — теоретическая кривая с учетом изменения размера частиц при горении и неизотермичности процесса горения; II — то же без учета изменения размера частиц; III — то же без учета неизотермичности процесса горения; IV — то же, что кривая I, но при догорании CO в межкусковом объеме. 1 — оп. № 39, 35,5% O_2 ; 2 — оп. № 41, 46% O_2 ; 3 — оп. № 42, 55% O_2 ; 4 — оп. № 43, 46% O_2 ; 5 — оп. № 40, 39% O_2 ; 6 — оп. № 20, 27,5% O_2 ; 7 — оп. № 18, 25,5% O_2 ; 8 — оп. № 45, 53% O_2

да сгорает в межкусковом газовом объеме, что сокращает размер зоны горения. При образовании исключительно окиси углерода на поверхности и ее полном сгорании в межкусковом объеме величина z , соответствующая данному значению P_{ni} , сокращается примерно вдвое.

Как видно из рис. 1, 2 и 3, результаты исследований ряда авторов вполне прилично описываются теоретическими кривыми; исключением являются опыты Х. И. Колодцева (4), в которых имеется какая-то экспериментальная ошибка.

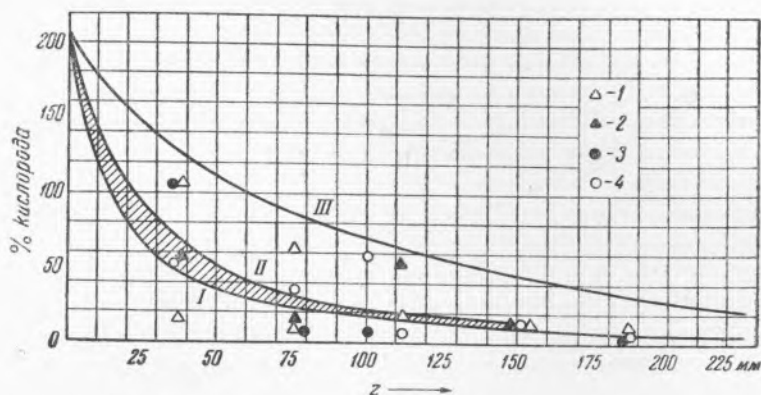


Рис. 3. Распределение концентрации кислорода в слое горящего угля и кокса по опытам Крейзингера и Мотта. Средний размер частиц 31 мм, скорость дутья $\sim 0,25$ м/сек., средняя температура 1300°C , холодное дутье. I — теоретическая кривая с учетом изменения размера частиц угля и неизотермичности процесса горения; II — то же без учета изменения размера частиц угля; III — то же без учета неизотермичности процесса горения. 1 — антрацит (Крейзингер); 2 — питсбургский уголь (Крейзингер); 3 — древесный уголь (Мотт); 4 — печной ретортный уголь (Мотт)

Если учесть, что в уравнении (9) нет величин, определяемых из опытов по горению, то полученное совпадение кривых расхода кислорода по высоте слоя угля (рис. 1, 2 и 3) следует признать исключительно хорошим *. Это уравнение (9), насколько нам известно, впервые позволяет теоретически рассчитать количественно расход кислорода в горящем слое, а также косвенно судить о характере процессов газообразования.

Бюро по применению кислорода в черной металлургии при Министерстве черной металлургии СССР

Поступило
19 II 1949

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1 З. Ф. Чуханов, ДАН, 62, № 3 (1948); 59, № 5 (1948). 2 З. Ф. Чуханов, Изв. АН СССР, ОТН, № 10 (1947). 3 А. П. Соколовский и Ф. А. Тимофеева, Исследование процессов горения натурального топлива, Сб. под ред. Г. Ф. Кнорре, 1948. 4 Х. И. Колодцев, Изв. Всесоюзн. теплотехнич. ин-та, № 4 и 8 (1948).

* Приближенный учет изменения размера частиц при горении слоя можно производить в соответствии с следующей таблицей: 1-й ряд частиц $z_1/d_0 \approx 0,61 z_1/d_1$; 2-й ряд частиц $z_2/d_0 \approx 0,82 z_2/d_2$; 3-й ряд частиц $z_3/d_0 \approx 0,90 z_3/d_3$; 4-й ряд частиц $z_4/d_0 \approx 0,95 z_4/d_4$; 5-й ряд частиц $z_5/d_0 \approx 0,98 z_5/d_5$; с 6-го ряда можно считать $z_6/d_0 \approx z_6/d_0$.