

Член-корреспондент АН СССР З. Ф. ЧУХАНОВ

ГОРЕНИЕ УГЛЕРОДА

КИСЛОРОДНАЯ ЗОНА В УГЛЕРОДНОМ КАНАЛЕ

При горении углерода, так же как и при других гетерогенных реакциях, суммарная скорость процесса определяется как химической кинетикой реакции, так и скоростью физических процессов: прогрева углерода и транспорта кислорода и продуктов реакции к реакционной поверхности и от нее.

Распределение концентрации кислорода определяется, как известно, следующим дифференциальным уравнением общего вида:

$$-\frac{\partial c}{\partial t} = w_x \frac{\partial c}{\partial x} + w_y \frac{\partial c}{\partial y} + w_z \frac{\partial c}{\partial z} - D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) + \Delta_c, \quad (1)$$

где w_x, w_y, w_z — соответствующие координатам x, y, z компоненты скорости газа; c — концентрация кислорода; t — время; D — коэффициент диффузии; Δ_c — источник в объеме.

Для условий горения углеродных стенок цилиндрического канала задачу в первом приближении можно свести к одномерной.

Если осреднить значения скорости $w_{x, y}$ и концентраций $c_{x, y}$ по сечению канала:

$$\bar{w} = \frac{1}{s_0} \int_s w ds, \quad \bar{c} = \frac{\int_s cw ds}{\int_s w ds}, \quad (2)$$

первое уравнение можно будет записать в следующем виде:

$$-\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} - D \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial z^2} + \Delta + \Delta_c, \quad (3)$$

где Δ — скорость расходования кислорода на стенке углеродного канала на реакцию горения углерода и окиси углерода на пути dz .

Пренебрегая молекулярной диффузией вдоль потока* по сравнению с конвективным переносом кислорода, а также считая режим стационарным, т. е. диаметр канала, состояние поверхности и температуру реагирования установившимися, получаем из уравнения (3)

$$-\left(\frac{dc}{dz} \right)_s \frac{\int_s w ds}{s_0} = \Delta + \Delta_c. \quad (4)$$

* При сравнительно высоких значениях Re .

В общем случае, при наличии одной реакции $C + O_2$, расход кислорода можно выразить следующим кинетическим уравнением:

$$-\left(\frac{dx}{dt}\right) = k_x x_{ct}^n F_{p_1}, \quad (5)$$

где x_{ct} — концентрация кислорода у реакционной поверхности F_{p_1} , k_x — константа скорости реакции, n — порядок реакции, F_{p_1} — реакционная поверхность в m^2/m^3 .

В случае двух реакций (1) (биреакционная теория) или более сложного хода реакции (2), а также при учете догорания окиси углерода уравнение (5) еще более усложнится. Однако даже решение уравнений (4) и (5) представляет значительные трудности, так как x_{ct} изменяется для различных участков реакционной поверхности в массе углерода. Особенно усложняет решение отличие порядка реакции $C + O_2$ по кислороду от первого (2).

В условиях чисто диффузионной области, когда x_{ct} в любом участке F_p весьма мало* по сравнению с x в газе, а Δ_c практически мало по сравнению с Δ ,

$$-\left(\frac{dc}{dz}\right) \bar{w} = k_x x_{ct}^n F_{p_1} = \alpha_g F_p n. \quad (6)$$

Здесь α_g — коэффициент, аналогичный коэффициенту теплопередачи, — может быть выражен через коэффициент переноса (3) вещества**

$$\alpha_g = \varphi \frac{\int w ds}{s_0}. \quad (7)$$

Для этого практически весьма важного случая чисто диффузионной области уравнение (4) можно переписать в следующем виде***;

$$-\frac{dc}{dz} = \varphi F_p c \quad (8)$$

при $z=0$, $c=c_0$.

Для изотермического режима, интегрируя (8), получим:

$$z = -\frac{1}{\varphi F_p} \ln \frac{c_z}{c_0}, \quad c_z = c_0 e^{-\varphi F_p z}. \quad (9)$$

Для определения φ воспользуемся для турбулентного режима выведенным нами уравнением (2), хорошо совпадающим с опытными данными:

$$\varphi = \frac{0,25 \zeta (1 - 106 Re^{-7/8}) [1 - (w_1/\bar{w})^2]}{[1 + (w_1/\bar{w})(2Pr - (w_1/\bar{w}))][k - (w_1/\bar{w})^2]} \quad (10)$$

Уравнение (10) удовлетворительно аппроксимируется в пределах Re от 5000 до 100000 следующим простым соотношением:

$$\varphi \cong 0,03 Re^{-0,2}. \quad (11)$$

* В том числе и на поверхности стенок канала F_p .

** Коэффициент φ иногда называется критерием Маргулиса.

*** Уравнения (3) и (8) могут быть получены также из материального баланса кислорода на участке канала длиной dz и уравнения (7).

Из уравнений (9) и (11) имеем:

$$c_x \cong c_0 e^{-\frac{0,12z}{d \operatorname{Re}^{0,2}}} \quad (12)$$

Опытный материал по горению угольного канала при турбулентном режиме весьма ограничен, что затрудняет всестороннюю проверку выведенных уравнений (9) и (12).

Чисто диффузионная область практически наблюдается при горении даже мало активного электродного угля при температуре выше 1000°C . Чем выше скорость газового потока и величина Re , тем при более высокой температуре $c_{\text{ст}} \cong 0$.

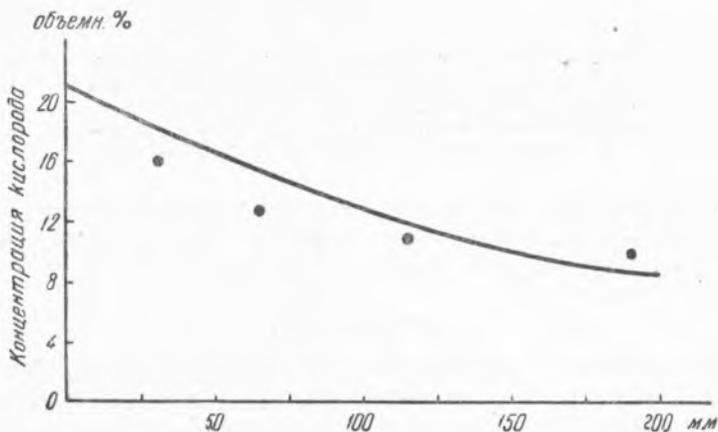


Рис. 1. Изменение концентрации кислорода в горящем угольном канале ($d \sim 4$ мм; $T \sim 1000^\circ\text{C}$, $\operatorname{Re} \sim 5000$). Точки — экспериментальные данные О. А. Цухановой; теоретическая кривая построена по уравнению (9)

О. А. Цухановой⁽³⁾ было исследовано изменение концентрации кислорода в канале длиной 200 мм, $d \cong 4-5$ мм при температуре 1000°C .

На рис. 1 приведены экспериментальные точки О. А. Цухановой. Кривые проведены по уравнению (9), практически совпадающему с уравнением (12).

Как видно из рис. 1, наши теоретические уравнения весьма удовлетворительно не только качественно, но и количественно описывают экспериментальные данные. Количественное совпадение особенно интересно потому, что в наших уравнениях нет экспериментально найденных коэффициентов.

На рис. 2 приведены данные О. А. Цухановой по концентрации кислорода на выходе из углеродного канала длиной 30 мм. Кривые на рис. 2 проведены по уравнению (9). Как видно из рис. 2, совпадение наших уравнений с опытом вполне удовлетворительное.

Полученные нами уравнения имеют не только методический интерес, поскольку позволяют перейти к расчету процесса в горящем слое, но и большой практический интерес для определения размеров

* Уравнение (12) для ламинарного горения будет иметь следующий вид:

$$c_x = c_0 e^{-9,7 \left(\frac{z}{d \operatorname{Re}} \right)^{3/4}} \quad (12^*)$$

Уравнение (12^{*}) действительно для $\operatorname{Re} d/z > 20$.

кислородной зоны в панелях подземных газогенераторов, работающих по методу потока и методу скважин.

Совершенно очевидно, что из уравнения (9) нетрудно получить уравнение, определяющее размер кислородной зоны в угольном канале,

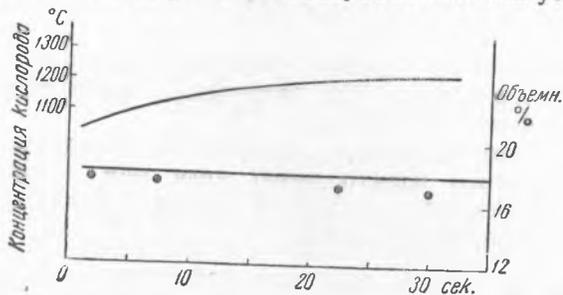


Рис. 2. Изменение концентрации кислорода в газе, выходящем из горящего угольного канала длиной 30 мм ($d \sim 4$ мм, $Re \sim 6000-8000$). Точки — экспериментальные данные О. А. Цухановой; теоретическая кривая построена по уравнению (9)

для чего достаточно его проинтегрировать в соответствующих пределах s . Считая условно, как обычно, конец кислородной зоны при $c_{O_2} \cong 1\%$, получим для длины кислородной зоны z_0 *

$$z_0 \cong 24d Re^{0,2}. \quad (13)$$

Особый интерес представляет то обстоятельство, что размер кислородной зоны мало изменяется с изменением температуры реагирования. Последний вывод справедлив, конечно, только при условии, что для всей реакционной поверхности $c_{ст} \cong 0$, т. е. в чисто диффузионной области.

Бюро по применению кислорода
Министерства черной металлургии
СССР.

Поступило
15 XII 1947

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ З. Ф. Цуханов, ЖТФ, 9, №2 (1938). ² З. Ф. Цуханов, ДАН, 28, № 1 (1940); ДАН, 55, № 6 (1947). ³ З. Ф. Цуханов, ДАН, 28, № 1 (1940); ДАН, 55, № 6 (1947). ⁴ З. Ф. Цуханов, Сб. Процесс горения угля, 1938.

* Уравнение (13) определяет размер кислородной зоны при турбулентном горении стенок угольного канала в диффузионной области при условии, что в объем канала от реагирующих стенок попадает исключительно CO_2 . Таким образом, уравнение (13) справедливо и точно в том случае, если вся окись углерода, образующаяся у стенок канала (по любой реакции), сгорает вблизи поверхности стенок или окиси углерода вообще не образуется. В случае, если в газовый объем (в канале в кислородной зоне) попадает окись углерода и там сгорает, размер кислородной зоны сокращается. В пределе, когда весь кислород у стенки реагирует до CO и эта окись углерода сгорает в газовом объеме в центральной части канала, кислородная зона сокращается вдвое по сравнению с z_{O_2} по уравнению (13). Практически размер кислородной зоны

будет лежать в пределах от 12 до $24 d Re^{0,2}$.

В случае высокоскоростного процесса горения, когда основная часть окиси углерода выносится из кислородной зоны, должно быть справедливо уравнение (13).