

Член-корреспондент АН СССР З. Ф. ЧУХАНОВ

НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ГОРЕНИЕ УГЛЕРОДНОГО КАНАЛА ПРИ ЛАМИНАРНОМ РЕЖИМЕ

Как мы отмечали (1), распределение средней концентрации кислорода \bar{c} по длине горящего углеродного канала z при ламинарном режиме может быть в диффузионной области с достаточной точностью определено следующим уравнением:

$$\left(-\frac{d\bar{c}}{dz}\right) \frac{s}{s_0} = \Delta + \Delta c^* \quad (1)$$

Так как при ламинарном режиме условия догорания CO у стенки весьма благоприятны, то в уравнении (1) Δc приближенно можно считать равным нулю.

Для отмеченных условий уравнение (1) можно записать:

$$\frac{d\bar{c}}{dz} = -\varphi F_p \bar{c}, \quad (2)$$

где φ — коэффициент переноса вещества, который может быть определен для гидродинамического стабилизированного потока из теоретического решения Нуссельта. Для двух крайних режимов приближенно имеем:

$$\varphi_{\min} = \frac{3,659}{Pe} \quad \text{для} \quad \frac{Pe \cdot d}{z} < 1,0; \quad (3)$$

$$\varphi = 1,077 \cdot d^{1/2} \cdot z^{-1/2} \cdot Pe^{-1/2} \quad \text{для} \quad \frac{Pe \cdot d}{z} > 30 \quad (\text{по Левеку}). \quad (4)$$

Подставляя в уравнение (2) значения φ из (3) и (4), получаем после интегрирования соответственно:

$$\frac{\bar{c}_z}{c_0} = e^{-20,2(z/Re \cdot d)}, \quad (5)$$

$$\frac{\bar{c}_z}{c_0} = e^{-8,05(z/Re \cdot d)^{1/2}}. \quad (6)$$

Для промежуточной области $Re \cdot d/z$ расчет c_z можно проводить, пользуясь уравнением Нуссельта.

Насколько удовлетворительно уравнение (2), при определении φ из теоретических уравнений для ламинарного режима, описывает опытные данные, показывает рис. 1.

* Обозначения те же, что и в работе (1).

На рис. 1 изображены экспериментальные данные О. А. Цухановой⁽²⁾ по горению канала из электродного угля при значениях $Re \sim 500$ при температуре 1000°C и при воздушном дутье.

Теоретическая кривая, как видно из рис. 1, вполне удовлетворительно описывает экспериментальные точки. При 1000° , как и следовало ожидать, несмотря на скорость дутья в 20 м/сек., процесс горения находится в чисто диффузионной области.

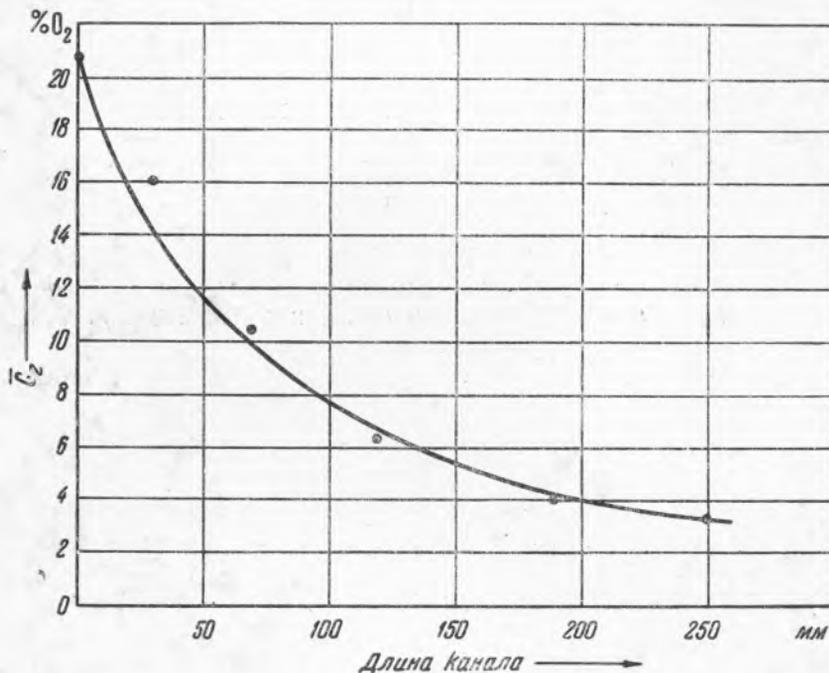


Рис. 1. Изменение концентрации кислорода по длине канала. Опыты А. О. Цухановой⁽⁴⁾. Углеродный канал $d \cong 5$ мм; $T = 1000^\circ\text{C}$; $w = 20$ м/сек. 5 л воздуха в минуту

На рис. 2 показано теоретическое изменение концентрации кислорода, на выходе из канала длиной 250 мм, при изменении температуры (для изотермического режима).

Сравнение теоретической кривой с опытными точками наглядно показывает, что диффузионная область для данных условий опыта (скорость газа 20 м/сек. и d канала 5 мм) лежит в области температур приблизительно выше 950° . Теоретическая кривая и опытные точки в этой области хорошо совпадают.

Интересной отличительной особенностью ламинарного горения канала от турбулентного горения является большая зависимость скорости горения от температуры.

Весь предыдущий расчет проведен, как мы отмечали, для изотермического горения, осуществимого практически только приближенно, т. е. при малых перепадах температуры дутья и горячей поверхности углерода.

В практических условиях горения мы всегда встречаемся с довольно резкой неизотермичностью процесса горения, особенно резкой при применении обогащенного кислородом дутья.

Попытаемся оценить как направление, так и степень влияния неизотермичности процесса на скорость расходования кислорода при ламинарном горении углеродного канала.

Нетрудно показать, что уравнение, определяющее нагрев газа в канале, аналогично уравнениям (1) и (2), а уравнения (5) и (6) определяют при малых перепадах T_c и T_0 интегральный прогрев газа в канале. Эти уравнения можно записать в следующем виде:

$$\frac{T_c - T_z}{T_c - T_0} = e^{-20,2(z/Re \cdot d)} \quad \text{для} \quad \frac{Re \cdot d}{z} < 1,0, \quad (5')$$

$$\frac{T_c - T_z}{T_c - T_0} = e^{-8,05(z/Re \cdot d)^{1/2}} \quad \text{для} \quad \frac{Re \cdot d}{z} > 30. \quad (6')$$

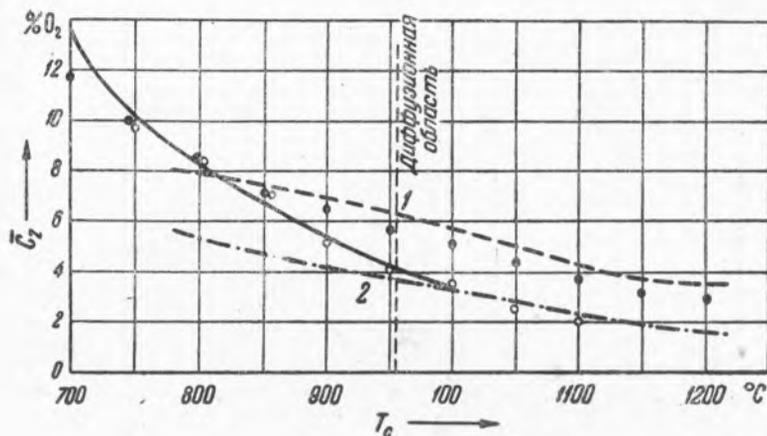


Рис. 2. Изменение концентрации кислорода в газах, выходящих из углеродного канала ($l=250$ мм и $d \sim 5$ мм). Дутье воздушное, 5 л в минуту. 1 — теоретическая кривая для неизотермического режима; 2 — теоретическая кривая для изотермического режима. Опытные точки О. А. Цухановой

Неизотермичность прогрева оказывает в первую очередь влияние на T_c через Re . Полагая*

$$Re_z = Re_c \left(\frac{T_c}{T} \right)^{0,75} \quad (7)$$

и рассматривая наиболее важный участок (6'), получаем:

$$\frac{dT}{dz} = 4,32 d^{-1/2} z^{-1/2} \left[Re_c \left(\frac{T_c}{T} \right)^{0,75} \right]^{-1/2} (T_c - T). \quad (8)$$

Интегрируя (8) при условии, что при $z=0$ $T=T_0$, получим:

$$\frac{T_c - \sqrt{T_c T_z}}{T_c + \sqrt{T_c T_0}} = e^{-8,05(z/Re \cdot d)^{1/2}} \quad (9)$$

На рис. 3 представлено влияние неизотермичности прогрева на распределение температуры по длине канала для $T_c = 1273^\circ \text{K}$ и $T_0 \sim 273^\circ \text{K}$.

Как видно из рис. 3 влияние это достаточно велико. Исследования М. А. Михеева (3) по теплообмену при неизотермическом режиме подтверждают, что, учитывая изменение Re (по температуре потока), можно довольно точно учесть влияние неизотермичности.

* Re_c — значение критерия Re при предположении, что газ имеет температуру стенки канала, Re_z — значение Re при T_z фактическом.

Пользуясь уравнениями (5), (5'), (6), (6') и (9) можно учесть влияние неизотермичности горения углеродного канала на интенсивность расходования кислорода по его длине.

Для конкретных условий экспериментального исследования О. А. Цухановой (4), по неизотермическому горению углеродного канала при ламинарном режиме, мы на рис. 2 нанесли теоретическую кривую расходования кислорода в канале длиной 250 мм.

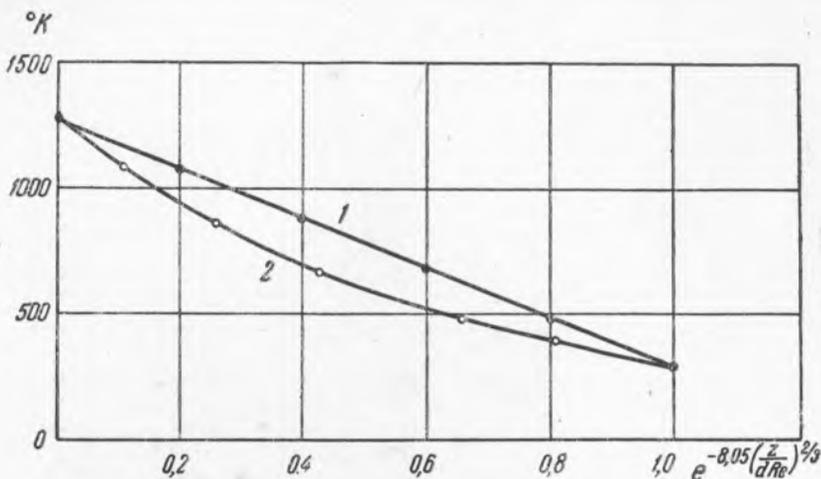


Рис. 3. Влияние неизотермичности режима на теплообмен в канале. $T_c = 1273^{\circ}\text{K}$; $T_0 = 273^{\circ}\text{K}$. 1 — без учета неизотермичности, 2 — с учетом неизотермичности

На том же рис. 2 нанесены опытные точки. Теоретическая кривая вполне удовлетворительно описывает экспериментальные точки в диффузионной области процесса.

Теоретическая кривая лежит несколько выше опытной, что, по-видимому, объясняется наряду с основным тормозящим действием некоторым интенсифицирующим влиянием неизотермичности на процесс молекулярной диффузии*. Влияние это, однако, как видно из рис. 2, весьма невелико для ламинарного горения углеродного канала**.

Бюро по применению кислорода
в черной металлургии
Министерства черной металлургии СССР

Поступило
15 VII 1948

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ З. Ф. Чуханов, ДАН, 59, № 5 (1948). ² О. А. Цуханова, Сборн. процесс горения угля, 1938. ³ М. А. Михеев, Основы теплопередачи, 1947. ⁴ А. О. Цуханова, Диссертация, ЭНИН АН СССР.

* Термодиффузия.

** Следует отметить, что мы не учитываем также некоторого влияния изменения физических свойств газа при неизотермичности режима, в частности изменения критерия Re .