

ТЕПЛОТЕХНИКА

Член-корреспондент АН СССР З. Ф. ЧУХАНОВ

УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ОЧАГА

В цилиндрической шахте, заполненной слоем частиц твердого топлива размером  $d$ , создан очаг горения. В шахту по направлению ее оси  $z$  подается воздушное дутье со скоростью  $\overline{w}_\phi$ . Горящий (равномерно по всему сечению шахты) уголь и со стороны подачи дутья и со стороны выхода газа неограничен. Необходимо определить направление и скорость движения очага  $V_{oc}$  в неподвижном слое. В работе (1), посвященной анализу теплового режима горящего слоя, была дана общая схема «модели» процесса, отвечающая поставленной задаче. Для количественного определения  $V_{oc}$  по этой схеме необходимо рассмотреть процесс расходования кислорода в очаге, или, в соответствии с обычно принятой терминологией, рассмотреть процесс в кислородной зоне горящего топлива.

Расход кислорода в горящем слое кокса можно рассчитать, пользуясь уравнениями, выведенными автором (2):

$$\frac{p_{Ni}}{p_i} \approx \frac{T_0 / T_c}{T_0 / T_c - 1,0 + \exp(\varphi_i F_p z)} \quad \text{для } Re_{\phi_0} > 15, \quad (1)$$

где  $p_{Ni}$  и  $p_0$  — соответственно, парциальные давления кислорода в слое в точке  $z$  и при  $z = 0$  (начальное давление);  $T_0$  и  $T_c$  — соответственно, абсолютные температуры дутья на входе и средняя температура горячей поверхности;  $F_p$  — внешняя реакция поверхности частиц в единице объема;  $Re_{\phi_0}$  и  $Re_{\phi_c}$  — соответственно, значения критерия  $Re$  при  $T_0$  и  $T_c$  газа;

$$\varphi_i = \frac{\varphi_{i_0} + \varphi_{i_c}}{2}; \quad (2)$$

$\varphi_{i_0}$  и  $\varphi_{i_c}$  — значения коэффициента переноса ( $\varphi = Nu / Re_{\phi} Pr$ ) для соответственных значений  $Re_{\phi}$ . Для расчета по уравнениям (1) и (2) значения  $\varphi_i$  следует определять или из соответствующих уравнений (2) или из графика рис. 1, нанесенного по этим уравнениям\*.

На рис. 2 представлены теоретические кривые, показывающие изменение характера расходования кислорода в слое горящего кокса при различных значениях  $Re_{\phi}$  для конкретных температурных условий  $T_c \sim 1673^\circ \text{K}$  и  $T_0 \sim 273^\circ \text{K}$ . По оси абсцисс рис. 2 нанесена относительная безразмерная высота слоя  $z/d$ , т. е. число рядов частиц, а по оси ординат — относительная концентрация кислорода в слое  $p/p_0$ . Из рис. 2 наглядно видно, что для больших значений  $Re_{\phi_0} > 100$  кислородная

\* С учетом предельной диффузии.

зона растягивается на несколько (3—5 и более) рядов угольных частиц, а для  $Re_{\phi_0} < 35$  она укладывается практически в один ряд.

Для  $Re_{\phi} < 10$  основная часть кислорода расходуется на первой (лобовой) половине первого горящего ряда частиц угля.

Для ряда важных процессов значительный интерес представляет определение условий движения очага именно при малых значениях  $Re_{\phi}$ , для которых мы и рассмотрим в данной работе уравнение движения очага, определяющее  $V_{оч}$ .

Как мы показали (1), при  $N > 1$  и  $N_p > 1$  частицы угля будут прогреты практически равномерно по всему объему. В этом случае в горящем слое угля максимальную температуру  $T_m$  будет иметь один ряд частиц, которым практически и ограничивается в этих условиях кислородная зона.

Свежее топливо, прилегающее к этому ряду горящих частиц, будет нагреваться главным образом за счет излучения (1) и лишь частично за счет теп-

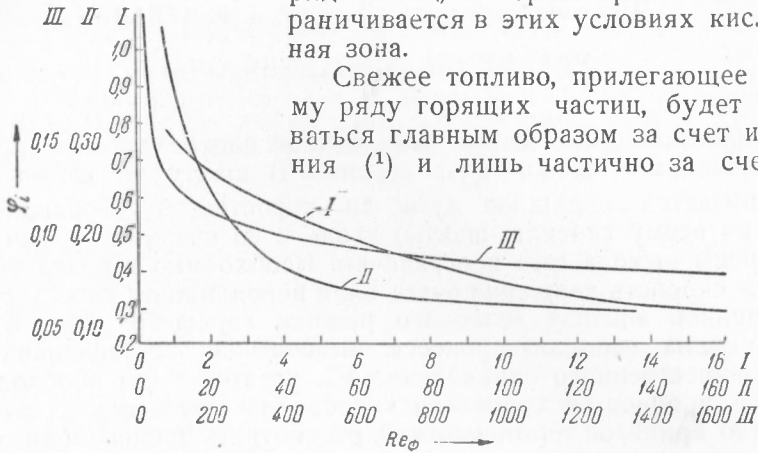


Рис. 1.  $\phi_i = f(Re_{\phi})$

лопроводности. Количество тепла, воспринятое свежим топливом из кислородной зоны, составит:

$$Q \approx \frac{F_{\phi}}{2/c - 1/c_s} \left\{ \left( \frac{T_m}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_x}{100} \right)^4 \right\}, \quad (3)$$

где  $c$  и  $c_s$  — коэффициенты лучеиспускания поверхности угля и абсолютно черного тела,  $F_{\phi}$  — эффективно воспринимающая поверхность угля (несколько большая  $1 \text{ м}^2$ ) и  $T_x$  — температура свежего угля, изменяющаяся (за цикл воспламенения) от  $T_0$  до  $T_{\phi}$  — температуры воспламенения данного угля.

Учитывая практические значения  $T_{\phi}$  — температуры так называемого воспламенения углей, лежащие в пределах  $200 - 600^{\circ} \text{С}$ , можно с достаточной точностью переписать (3):

$$Q_1 \approx \frac{F_{\phi} c_s c}{2c_s - c} \left\{ \left( \frac{T_m}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\phi}}{140} \right)^4 \right\}. \quad (4)$$

Тепло, передаваемое радиацией к свежему углю, распределяется на подогрев топлива и на подогрев дутья.

В общем случае подогрев дутья в одном ряду \* частиц определится следующим уравнением:

$$\frac{T_{\text{дутья}} - T_0}{T_{\text{част}} - T_0} \approx 1 - \exp(-3,8 \bar{\phi}_i) \quad (5)$$

\* Очевидно, что прогревом второго ряда свежих частиц можно пренебречь.

и количество тепла \*, отданного дутью за цикл нагрева частиц топлива до воспламенения:

$$Q_d \approx \frac{T_g - T_0}{1,9} w_\phi c_2 [1 - \exp(-3,8 \bar{\varphi}_i)]. \quad (6)$$

Необходимое для воспламенения 1 кг топлива количество тепла

$$Q_0 \approx c_m (1 - 0,01 W_p) (T_g - T_0) + W_p (i_1 - i_0) 0,01, \quad (7)$$

где  $c_m$  — теплоемкость безводной массы топлива;  $W_p$  — процент влаги в топливе;  $i_1$  и  $i_0$  — теплосодержание паров воды при  $T_g$  и воды при  $T_0$ .

Если через  $\gamma_n$  обозначить насыпной вес угля в килограммах на куб. метр, то, пользуясь уравнениями (4), (6) и (7), мы можем написать уравнение движения очага:

$$V_{oc} \approx \frac{\frac{F_d c_s c}{2c_s - c} \left\{ \left( \frac{T_m}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_g}{140} \right)^4 \right\} - 1900 w_\phi c_u (T_g - T_0) [1 - \exp(-3,8 \bar{\varphi}_i)]}{\gamma_n \{ c_m (1 - 0,001 W_p) (T_g - T_0) + W_p (i_1 - i_0) 0,001 \}}. \quad (8)$$

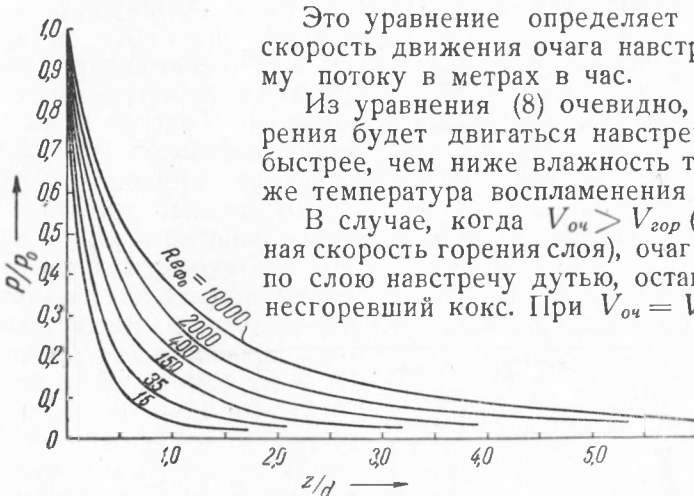


Рис. 2. Расход кислорода в слое горящего кокса при различных значениях  $Re_{\phi_0}$  ( $T_c = 1400^\circ \text{C}$ ,  $T_0 = 0^\circ \text{C}$ )

Это уравнение определяет по существу скорость движения очага навстречу дутьевому потоку в метрах в час.

Из уравнения (8) очевидно, что очаг горения будет двигаться навстречу дутью тем быстрее, чем ниже влажность топлива и ниже температура воспламенения \*\*.

В случае, когда  $V_{oc} > V_{гор}$  ( $V_{гор}$  — линейная скорость горения слоя), очаг продвигается по слою навстречу дутью, оставляя за собой несгоревший кокс. При  $V_{oc} = V_{гор}$  за очагом

остается зола. При условии  $V_{oc} < V_{гор}$  при установившемся процессе в газе, выходящем из очага, будет содержаться кислород, если, конечно, кислородная зона не ограничена одним рядом частиц. При малом значении  $Re_\phi$ , очевидно, при условии  $V_{oc} < V_{гор}$  должен наблюдаться неустойчивый режим горения. При больших значениях  $Re_\phi$  в этом случае может наблюдаться весьма своеобразное явление разрыва кислородной зоны на две части. Первая часть кислородной зоны с неполным использованием кислорода будет двигаться навстречу дутью, а вторая, в которую из первой части остатки кислорода и продукты горения попадают, пройдя

\* Температуру угля определяем, осредняя (приблизительно) тепловой поток во времени.

\*\* Температуру  $T_g$  следует определять, пропуская холодный воздух через один ряд нагреваемых частиц угля.  $T_g$  — температура, при которой наступит быстрый саморазогрев и воспламенение угольных частиц данного размера.

зону шлака и золы, окажется в условиях неограниченного воспламенения и будет двигаться по направлению дутья, выжигая слой угля.

Как только  $V_{оч}$  в уравнении (8) будет равен 0 или получит отрицательное значение, очаг горения будет двигаться по направлению движения дутья со скоростью  $V_{оч}^* \equiv V_{гор}$ . В этом случае (при неограниченном воспламенении) скорость движения очага в диффузионной области гетерогенного процесса тождественно равна скорости сгорания угля.

Только при горении в кинетической или переходной области (не в диффузионной) возможно при так называемом неограниченном воспламенении  $V_{оч} > V_{гор}$ . При горении слоя это практически осуществимо только при сильном снижении концентрации кислорода в дутье, приводящем к снижению температуры ниже  $\sim 1000^\circ \text{C}$ .

Всесоюзный научно-исследовательский  
и проектный институт  
подземной газификации углей

Поступило  
6 II 1950

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> З. Ф. Чуханов, ДАН, 44, № 7 (1944); 47, № 3 (1950). <sup>2</sup> З. Ф. Чуханов, ДАН, 65, № 5 (1949).