

# ТЕПЛОТЕХНИКА

Член-корреспондент АН СССР З. Ф. ЧУХАНОВ

## РАЗДЕЛЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОГРЕВА И ПОЛУКОКСОВАНИЯ ТОПЛИВНЫХ ЧАСТИЦ

Интенсивность нагрева топливных (сферических) частиц\* определяется (в сферических координатах) из следующего дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где  $\tau$  — время,  $a$  — температуропроводность шара,  $\vartheta$  — температурный напор,  $r$  — расстояние от центра шара. Соответственно граничное и начальное условия:

$$\left( \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right)_{r=R} = -\frac{\alpha}{\lambda_T} (\vartheta)_{r=R}; \quad (\vartheta)_{\tau=0} = \vartheta_0, \quad 0 < r < R, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — так называемый коэффициент теплообмена,  $R$  — радиус шара,  $\lambda_T$  — теплопроводность.

Решение уравнения (1), удовлетворяющее краевым условиям (2) и определяющее, например, отношение количества тепла  $Q$ , воспринятого нагреваемой сферической частицей топлива, к количеству тепла  $Q_a$ , которое она может воспринять при полном нагреве до  $T$  газа, может быть записано в виде следующего соотношения:

$$\frac{Q}{Q_a} = \psi(F_0, Bi), \quad (3)$$

$$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda_T}, \quad F_0 = \frac{\tau \lambda_T}{c_T \gamma_T R^2}, \quad (4)$$

где  $\gamma_T$  — вес 1 м<sup>3</sup> в кг и  $c_T$  — теплоемкость массы топлива.

Пользуясь графическим решением уравнения (1), можно для конкретных значений  $Q/Q_a$ , характеризующих степень нагрева частиц, определить значения  $F_0$  и  $Bi$ .

Нетрудно заметить, что произведение

$$F_0 Bi = \frac{\alpha \tau}{c_T \gamma_T R} \quad (5)$$

для определенного состояния нагрева частиц должно быть постоянным в том случае, когда  $\lambda_T$  — теплопроводность частицы — практически не влияет на время ее прогрева до определенной степени.

\* Полагая изотропной массу топливных частиц.

В этом случае:

$$\tau_{(Q/Q_a)} \approx \text{const } c_T \gamma_T \frac{R}{\alpha} = A c_T \gamma_T \frac{R}{\alpha}. \quad (6)$$

Анализ изменения произведения  $Bi F_0$  показывает, что оно постоянно для определенных соотношений внутреннего и внешнего сопротивления теплообмена, характеризующихся критерием  $Bi$  или его обратной величиной, названной автором критерием высокоскоростного теплообмена  $N = \lambda_T / \alpha R$ .

Для значений  $N \geq 5$  уравнение (6) справедливо для всех представляющих практический \* интерес величин  $Q/Q_a$ .

Чтобы определить значение величины  $A$  для любой степени нагрева частиц в условиях высокоскоростного теплообмена  $N \geq 5$  и получить для этих условий зависимость температуры частицы от времени, рассмотрим уравнение теплообмена на поверхности шара

$$\frac{dQ}{d\tau} = \alpha (T_z - T_u) S_u, \quad (7)$$

где  $Q$  — количество тепла, воспринятого частицей,  $S_u$  — поверхность сферической частицы.

Уравнение (7) можно переписать в следующем виде:

$$\frac{4}{3} \pi R^3 c_T \gamma_T \frac{dT_u}{d\tau} = \alpha 4 \pi R^2 (T_z - T_u), \quad (8)$$

$$\frac{dT_u}{d\tau} = \frac{3\alpha}{c_T \gamma_T R} (T_z - T_u), \quad (9)$$

$$\tau = \frac{1}{3} c_T \gamma_T \frac{R}{\alpha} \ln \frac{T_z}{T_z - T_u}, \quad (10)$$

$$\frac{T_u}{T_z} = 1 - e^{-3\alpha\tau/c_T \gamma_T R}. \quad (11)$$

Из сравнения уравнений (6) и (10) для высокоскоростного теплообмена получаем:

$$A_{(Q/Q_a)} = 0,768 \ln \frac{1}{1 - T_u/T_z} = -0,768 \lg \left(1 - \frac{Q}{Q_a}\right), \quad (12)$$

$$\tau_{(Q/Q_a)} \approx -0,768 c_T \gamma_T \frac{R}{\alpha} \lg \left(1 - \frac{Q}{Q_a}\right). \quad (13)$$

Для определения времени прогрева топливных частиц по уравнениям (6) и (13) необходимо знать  $\alpha$ .

Для прогрева пыли при малых значениях  $Re$   $\alpha$  не зависит от  $Re$  и при стационарном режиме

$$\alpha = \frac{\lambda_z}{R}, \quad Nu = \frac{2\alpha R}{\lambda_z} = 2. \quad (14)$$

В практических условиях прогрева пыли процесс прогрева нестационарен и всегда

$$\alpha \geq \frac{\lambda_z}{R}, \quad Nu \geq 2. \quad (15)$$

В практических условиях  $Nu$  тем ближе к 2, чем больше отношение объемных теплоемкостей топлива и газа.

\* При  $N \geq 5$  температуры в центре частицы и на ее поверхности практически одинаковы.

Вставляя значение  $\alpha$  из (14) в (13), мы для прогрева пыли получим

$$\tau_{(Q/Q_a)} \leq -0,768 c_T \gamma T \frac{R^2}{\lambda_z} \lg \left( 1 - \frac{Q}{Q_a} \right) \quad (16)$$

и для прогрева (в области  $N > 2 - 5$ ) более крупных частиц

$$\tau_{(Q/Q_a)} \leq -0,768 c_T \gamma T \frac{R^2}{\lambda_z f(\text{Re})} \lg \left( 1 - \frac{Q}{Q_a} \right). \quad (17)$$

Органическая масса топливных частиц при прогреве претерпевает физико-химические изменения. Сложные топливные „молекулы“ разлагаются с образованием газо- и парообразных продуктов — летучих веществ.

Термическое разложение топлива является сложным физико-химическим процессом, связанным с развитием ряда параллельных и последовательных реакций.

Скорость этого процесса, очевидно, будет для изотермического режима определенной функцией наличной органической массы топлива  $x$

$$-\frac{dx}{d\tau} = K_1 f(x), \quad (18)$$

откуда время разложения определенной, в том числе и небольшой части топлива  $\tau_{(x_0-x_1)}$  определится:

$$\tau_{(x_0-x_1)} = -\frac{1}{K_1} \int_{x_0}^{x_1} \varphi(x) dx. \quad (19)$$

Для наиболее вероятной  $f(x) = x$

$$\tau_{(x_0-x_1)} = K_1' \lg \frac{x_0}{x_1}. \quad (20)$$

Так как  $K_1$  не зависит\* от размера частиц  $R$ , а является только функцией  $T$ , то при изотермических условиях  $K_1 = \text{const}$ .

В существующих системах полукоксования (термического разложения топлива при 450—550°) частиц твердого топлива газовым теплоносителем процессы прогрева частиц и разложения топливной массы налагаются во времени и совмещаются в пространстве. Это положение приводит к разбавлению газо- и парообразных продуктов полукоксования газовым теплоносителем. Сопоставление уравнений (20) и (16) наглядно показывает, что теоретически возможна совершенно новая система полукоксования, лишенная отмеченного выше недостатка полукоксования газовым теплоносителем.

В самом деле, время прогрева мелких частиц топлива резко изменяется с изменением их размера, тогда как время разложения определенной части топлива при данной температуре постоянно. Таким образом, применяя более мелкие частицы, мы можем теоретически прогреть топливо до заданной температуры так быстро, что оно успеет разложиться настолько мало, что практически этого нельзя будет даже зафиксировать.

Для определения практических условий, в которых возможно такое разделение процессов прогрева топливных частиц и разложения топливной массы — выделения летучих, автор в 1944 г. произвел соответствующую

\* Процесс разложения органической массы необратим, так что повышение концентрации продуктов разложения не должно замедлить процесса.

щую обработку своих экспериментальных данных\* по окислению аэровзвеси кизеловского угля.

Прежде всего было установлено, что в условиях проведенных экспериментальных исследований окись углерода в аэровзвеси образовывалась практически исключительно за счет термического разложения топливной массы.

В связи с тем, что концентрация окиси углерода в газах полукоксования (до 550—600°) мало изменяется при изменении температуры, интенсивность образования окиси углерода в этих исследованиях служила мерой интенсивности процесса термического разложения угля.

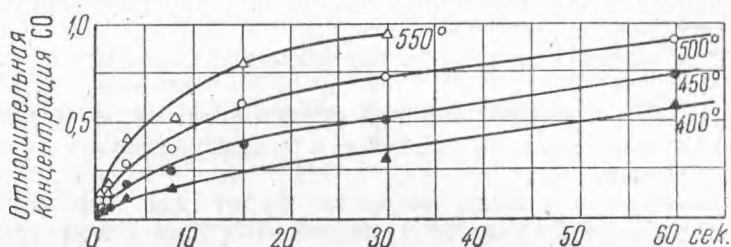


Рис. 1. Выделение летучих из кизеловского угля (по образованию окиси углерода)

На рис. 1 представлена зависимость относительной концентрации окиси углерода (примерно пропорциональной количеству выделившихся летучих) от времени разложения аэровзвеси 20 микронных частиц\*\* кизеловского угля. Кривые на рис. 1, построенные для четырех температур от 400 до 550°, характеризуют скорость разложения органической массы угля.

Представленные кривые не могут служить для определения абсолютной скорости выделения летучих, но они достаточно четко характеризуют порядок времени разложения, при котором практически заметно разложение топливной массы, и времени, при котором выделяется основная масса летучих веществ.

Из этих кривых следует, что практически заметное разложение органической массы кизеловского угля фиксируется лишь при времени разложения в 1—2 сек. Время нагрева 20 микронных частиц кизеловского угля до  $Q/Q_a \approx 0,97$  исчисляется по уравнению (16) сотыми долями секунды.

Для завершения процесса разложения кизеловского угля и выделения летучих по этим опытам даже для 500° требуется время более 1 минуты.

Проведенный теоретический анализ и экспериментальные данные (рис. 1) показывают практический путь создания нового (1) процесса полукоксования.

Поступило  
28 III 1950

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> З. Ф. Чуханов, Вестн. АН СССР, № 9 (1949).

\* Работа выполнена в 1932 и 1933 гг. во Всесоюзном теплотехническом институте.

\*\* Фракция от 0 до 40  $\mu$ .