

17. Похил П.Ф., Нефедова О.И., Марголин А.Д. Об аномальной зависимости скорости горения пороха от начальной температуры // Докл. АН СССР. — 1962. — 145, № 4. — С. 860—862.
18. Конев Э.В. О влиянии светового излучения на скорость горения пороха Н // Научно-технические проблемы горения и взрыва. — 1965. — № 2. — С. 76—81.
19. Симоненко В.Н. Исследование нестационарного горения порохов: Дис... канд. физ.-мат. наук. — Новосибирск: ИХКиГ СО РАН. 1981. — 155 с.
20. Маршаков В.Н. Дис... д-р физ.-мат. наук. — М.: ИХФ АН СССР. 1986. — 357 с.

14100, г. Сергиев Посад,
НИИПХ

Поступила в редакцию 6/V 1993,
после доработки — 5/VIII 1993

УДК 662.612

В.М. Гремячкин

МОДЕЛЬ ГОРЕНИЯ И ГАЗИФИКАЦИИ КОКСА В СМЕСИ РЕАКЦИОННЫХ ГАЗОВ

Разработана теоретическая модель горения и газификации пористых коксов в смеси реакционных газов (диоксид углерода, пары воды, водород, кислород). Рассматриваются процессы тепло- и массопереноса, а также химическое реагирование веществ в газовой фазе и кинетика гетерогенных реакций внутри пористой структуры кокса. Модель дает возможность определять скорость, а также состав продуктов горения и газификации кокса. Приведены расчетные зависимости скорости горения кокса от состава окисляющих газов и интенсивности тепло- и массообмена кокса с газом.

Подземная газификация углей, технологические процессы их переработки с целью получения топливного газа, а также химических продуктов и сырья для химической промышленности требуют для своего развития разработки математической модели горения и газификации углей. Разработка такой модели позволит без значительных материальных затрат определять оптимальные технологические параметры процессов переработки угля, обеспечивающие необходимый состав продуктов газификации.

Исследования процессов горения и газификации коксов [1—5] направлены главным образом на определение кинетических констант химических реакций взаимодействия коксов с отдельными реакционными газами: кислородом, водородом, водяным паром и диоксидом углерода. Однако уже предварительное рассмотрение процесса течения в угольном канале показывает, что состав реакционных газов по длине канала существенно меняется — в газах уменьшается количество кислорода и паров воды, а количество водорода, оксида и диоксида углерода увеличивается. Таким образом, для расчета технологического процесса газификации угля необходимо прежде всего иметь данные по скорости взаимодействия кокса со смесью реакционных газов, а также по скоростям потребления реакционных компонентов газовой смеси и образования продуктов горения и газификации.

Рассмотрим плоский, полубесконечный слой кокса, над поверхностью которого в газовой фазе имеется «приведенная пленка» толщиной δ . На внешней границе пленки задаются условия в окружающей среде: температура T_0 и состав газовой фазы z_c^0 ($j = 1 - \text{CO}_2$, $2 - \text{CO}$, $3 - \text{H}_2\text{O}$, $4 - \text{H}_2$, $5 - \text{CH}_4$, $6 - \text{O}_2$).

Математическая модель горения и газификации кокса должна быть основана на рассмотрении уравнений диффузии и теплопроводности в газовой фазе и внутри пористой структуры кокса, которые могут быть записаны в виде уравнений сохранения атомов, участвующих в процессе (углерода, кислорода и водорода), а также тепла, что позволяет в уравнениях исключить из рассмотрения скорости газозаменных химических реакций:

$$\operatorname{div} \sum \frac{m_j I_j}{\mu_j} = \Phi_c / \mu_c, \quad (1)$$

© В.М. Гремячкин, 1994.

$$\operatorname{div} \sum \frac{n_j I_j}{\mu_j} = 0, \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \sum \frac{I_j}{\mu_j} = 0, \quad (3)$$

$$I_i = 0, \quad (4)$$

$$\operatorname{div} (\sum I_j h_j + I_h) = \Phi_c h_c - I_R \delta(x), \quad (5)$$

где m_j, n_j, l_j — соответственно число атомов углерода, кислорода, водорода в молекуле $C_m O_{n_j} H_{l_j}$ с молекулярной массой μ_j ; Φ_c — скорость потребления углерода в гетерогенных реакциях с реагирующими газами; h_j и h_c — энтальпии образования газообразных веществ и твердого углерода на единицу массы; $\delta(x)$ — дельта-функция Дирака; $I_j = m z_j - \rho D \operatorname{grad} z_j$, $I_h = m c T - \lambda \operatorname{grad} T$ — потоки газообразных веществ и тепла; I_i — поток инертного газа; $I_R = \sigma(T_s^4 - T_w^4)$ — поток тепла излучением с единицы поверхности кокса; m — массовый поток газа.

Отметим, что учет излучения осуществляется в предположении о прозрачности газа для лучистого потока энергии, который излучается поверхностью кокса, а поглощается внешними поверхностями с температурой T_w .

Кроме (1)–(5) рассмотрим также уравнения

$$\sum z_j + z_i = 1, \quad (6)$$

$$\operatorname{div} m = \Phi_c, \quad (7)$$

$$m = -\frac{k}{\mu} \rho \operatorname{grad} p, \quad (8)$$

учитывающие, что сумма относительных массовых концентраций равна единице, изменение массового потока газа связано со скоростью выхода углерода в газовую фазу и существование потока газа в пористой среде кокса связано с наличием градиента давления известным законом Дарси.

Однако выражений (1)–(8) еще недостаточно для описания процессов, так как необходимо рассмотреть также уравнения химической кинетики взаимодействия кокса с реакционными газами. Количество химических реакций, протекающих при горении и газификации кокса, как гетерогенных, так и гомогенных, может быть достаточно велико. При этом в разных условиях протекания процессов различные химические реакции могут играть определяющую для процесса роль. Учет химических реакций взаимодействия кокса с реакционными газами может быть осуществлен следующими способами.

1. Рассматриваются кинетические уравнения всех возможных химических реакций, протекающих при горении и газификации кокса [4–7]. В результате будем иметь так называемую диффузионно-кинетическую модель, которая, конечно же, наиболее общая. Однако уравнения, описывающие процессы в этой модели, оказываются весьма сложными и сильно нелинейными, а получаемый объем информации трудно поддается анализу. К тому же отсутствуют достоверные кинетические данные по отдельным химическим реакциям.

2. Предполагается, что все химические реакции протекают в диффузионном режиме [8–10]. Такая диффузионная модель не требует конкретных кинетических данных и с успехом зарекомендовала себя при описании высокотемпературного горения капель жидких топлив, когда протекают в основном только газофазные химические реакции. Но в случае горения и газификации кокса диффузионная модель, по-видимому, применима только для очень крупных частиц кокса, когда скорости и гомогенных и гетерогенных химических реакций оказываются много больше интенсивности потоков реагирующих веществ.

3. В разрабатываемой модели горения и газификации кокса считается, что газофазные химические реакции протекают в диффузионном режиме, а

гетерогенные — в кинетическом. Оценки показывают [11], что при горении частиц кокса, так же как и при горении капель жидких топлив, режим протекания газозафазных химических реакций переходит от диффузионного к кинетическому только при микронных размерах частиц.

Если газозафазные химические реакции протекают в диффузионном режиме, то в газовой фазе должно осуществляться химическое равновесие между всеми компонентами. Это условие дает дополнительные уравнения, которые могут быть записаны в виде [12]

$$p_j = p_c^m p_o^n p_h^l / K_j, \quad (9)$$

где K_j — константы равновесия реакций образования веществ из элементов их составляющих.

Для полного замыкания системы (1) — (9) необходимо также определить режимы протекания гетерогенных химических реакций в слое кокса. При диффузионном режиме, когда устанавливается равновесие между газовой и конденсированной фазами, следует считать заданными парциальное давление паров углерода p_c , равное давлению насыщенных паров. При кинетическом режиме необходимо задать кинетическое уравнение для скорости химической реакции взаимодействия кокса с реагирующими газами:

$$\Phi_c = \rho S [\gamma_1 (z_1 - z_{e1})^{q_1} + \gamma_2 (z_3 - z_{e3})^{q_2} + \gamma_3 (z_4 - z_{e4})^{q_3} + \gamma_4 (z_0 - z_{e0})^{q_4}], \quad (10)$$

где ρ — плотность газа; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ и γ_4 — константы скоростей химических реакций взаимодействия кокса соответственно с $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{H}_2$ и O_2 ; ($z_j - z_{ej}$) — разность концентраций и равновесных концентраций соответствующих компонентов; S — удельная (на единицу объема) внутренняя поверхность кокса; q_j — порядки гетерогенных химических реакций.

Таким образом, система (1) — (10) оказывается замкнутой и описывает процессы, протекающие при горении и газификации кокса, в газовой фазе, на поверхности и внутри кокса. Отметим, что сформулированные уравнения справедливы не только для случая горения и газификации плоского слоя кокса, но и для горения и газификации частиц кокса, угольного канала, а также образцов кокса другой геометрии.

Граничные условия для сформулированной задачи о горении и газификации полубесконечного слоя кокса имеют вид

$$\begin{aligned} x = \delta, T = T_0, z_j = z_j^0, p = p_a; \\ x = -\infty, I_j = 0, I_h = 0, m = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Исключая в (1) и (5) с использованием (7) скорость потребления углерода кокса Φ_c и интегрируя уравнения (1) — (5) по координате с учетом граничных условий при $x = -\infty$, получим

$$\sum \frac{m_j I_j}{\mu_j} = \frac{m}{\mu_c}, \quad (12)$$

$$\sum \frac{n_j I_j}{\mu_j} = 0, \quad (13)$$

$$\sum \frac{l_j I_j}{\mu_j} = 0, \quad (14)$$

$$\sum I_j h_j + I_h = m h_c - I_R \Theta(x), \quad (15)$$

$$I_i = 0, \quad (16)$$

где $\Theta(x) = 0$ при $x < 0$ и $\Theta(x) = 1$ при $x > 0$.

Подставляя в (12) — (16) выражения для потоков веществ I_j и тепла I_h и интегрируя их по координате с граничными условиями при $x = \delta$ в предпо-

ложении о равенстве между собой бинарных коэффициентов диффузии и критерия Льюиса единице, найдем

$$\sum \frac{m_i z_i}{\mu_j} = e^{-\eta} \left(\sum \frac{m_i z_i^0}{\mu_j} - \frac{1}{\mu_c} \right) + \frac{1}{\mu_c}, \quad (17)$$

$$\sum \frac{n_i z_i}{\mu_j} = e^{-\eta} \sum \frac{n_i z_i^0}{\mu_j}, \quad (18)$$

$$\sum \frac{e_i z_i}{\mu_j} = e^{-\eta} \sum \frac{e_i z_i^0}{\mu_j}, \quad (19)$$

$$(1 - \sum z_j) = e^{-\eta} (1 - \sum z_j^0), \quad (20)$$

$$\sum z_j (h_j + (c_j - c_i)T) = h_c - I_R \Theta(x) (1 - e^{-\eta}) / m_0 + e^{-\eta} \left(\sum z_j^0 (h_j + (c_j - c_i)T_0) + c_i T_0 - h_c \right), \quad (21)$$

где $\eta = \int_x^0 mdx / \rho D$; m_0 — массовый поток в газовой фазе; $c = c_i + \sum z_j (c_j - c_i)$ — средняя теплоемкость газа; c_i — теплоемкость инертного газа.

Следует отметить, что при кнудсеновском режиме течения газа в пористой структуре кокса коэффициенты диффузии внутри слоя кокса могут отличаться от коэффициентов диффузии в газовой фазе. Эффективный коэффициент температуропроводности в слое кокса также может быть отличен от коэффициента температуропроводности в газе. Однако в рамках данной работы полагаем, что предположение о равенстве критерия Льюиса единице справедливо как в газовой фазе, так и внутри кокса.

Кроме этих уравнений из (8) найдем

$$-\frac{d\eta}{dx} = \frac{m}{\rho D} = -\frac{\kappa}{\rho_0 p_a} \rho \frac{dp}{dx}, \quad (22)$$

где $\kappa = k \rho_0 p_a / \mu \rho D$ — параметр, характеризующий проницаемость кокса.

Условия равновесия в газовой фазе (9) могут быть переписаны в виде

$$\begin{aligned} p_2 p_3 &= \beta_1 p_1 p_4, \quad p_1 p_5 = \beta_2 p_2^2 p_4^2, \\ p_1^2 &= \beta_3 p_2^2 p_6, \end{aligned} \quad (23)$$

где $\beta_1 = K_1 K_4 / K_3 K_4$ — константа равновесия химической реакции $H_2 + CO_2 = CO + H_2O$; $\beta_2 = K_2^2 K_4^2 / K_1 K_5$ — реакции $2CO + 2H_2 = CO_2 + CH_4$ и $\beta_3 = K_2^2 K_6 / K_1^2$ — реакции $2CO + O_2 = 2CO_2$.

Так как условия равновесия (23) записываются в парциальных давлениях компонентов, то и в уравнениях (17)–(21) также необходимо перейти от относительных массовых концентраций к парциальным давлениям с использованием соотношения

$$z_j = \frac{p_j \mu_j}{p \mu_i + \sum p_j (\mu_j - \mu_i)}$$

В результате найдем

$$\sum p_j (1 + n_j M) = p, \quad (24)$$

$$\sum p_j (l_j - n_j N) = 0, \quad (25)$$

$$\sum p_j A_j = B p, \quad (26)$$

$$e^{-\eta} = \frac{\sum p_j \mu_j (n_j \mu_j + \sum p_j (\mu_j - \mu_i))}{\sum p_j^0 \mu_j (p \mu_i + \sum p_j (\mu_j - \mu_i))}, \quad (27)$$

где

$$M = (p_a - \sum p_j^0) / \sum p_j^0 n_j; \quad N = \sum l_j p_j^0 / \sum n_j p_j^0;$$

$$B = (H_c - \mu_c I_R \Theta(x) / m_0) \cdot \mu_i / \mu_c - c_i T;$$

$$A_j + H_j + (c_j - c_i) T - n_j L - (H_c - \mu_c I_R \Theta(x) / m_0) \frac{\mu_j - \mu_i}{\mu_c};$$

$$L = \frac{\sum p_j^0 \left(H_j + (c_j - c_i) T_0 - (H_c - \mu_c I_R \Theta(x) / m_0) \frac{\mu_j - \mu_i}{\mu_c} \right) + p_a \left(c_i T_0 - \frac{\mu_i}{\mu_c} \left(H_c - \frac{\mu_c I_R \Theta(x)}{m_0} \right) \right)}{\sum p_j^0 n_j}.$$

Здесь введены теплоемкость c_i и энтальпия H_i на моль вещества.

Система уравнений (23)–(27) определяет состав газа и его температуру как в газовой фазе, так и внутри кокса в зависимости от функции η . Для определения зависимости η , а следовательно, состава газа и температуры от координаты в газовой фазе имеем уравнение

$$\eta = \frac{m_0}{\rho D} (\delta - x), \quad (28)$$

которое получено при условии, что в газовой фазе $m = m_0$.

В слое кокса определение зависимости функции η от координаты более сложное, так как здесь при изменении координаты меняются не только температура и состав газа, но и массовый поток газа, а также давление. Поэтому в слое кокса кроме (23)–(27) необходимо рассматривать и уравнение (22), которое устанавливает связь между давлением и параметром η .

Для определения зависимости $\eta(x)$ внутри слоя кокса имеем уравнение

$$\frac{d^2 \eta}{dx^2} = \Phi_c / (\rho D), \quad (29)$$

которое получено из (7) с учетом первого равенства (22). Скорость потребления углерода кокса в результате протекания гетерогенных химических реакций зависит от температуры, давления и концентраций реагирующих газовых компонентов, зависимость которых от функции η определяется из (22)–(27).

На поверхности кокса при выводе граничных условий для решения (29) необходимо рассмотреть условия сшивки решений в газовой фазе и внутри слоя кокса. Такими условиями являются непрерывность температуры и концентраций, что задается непрерывностью функции η , а также непрерывность расхода газа, которая задается непрерывностью производной $d\eta/dx$.

Со стороны газовой фазы на поверхности кокса будем иметь

$$\eta = \eta_0 = \frac{m_0}{\rho D} \delta, \quad \frac{d\eta}{dx} = -\frac{m_0}{\rho D} = -\frac{\eta_0}{\delta}.$$

Вводя величину $\beta = -\frac{d\eta}{dx} \delta$, перепишем (29) в виде

$$\frac{d\beta^2}{d\eta} = -2\delta^2 \Phi_c / (\rho D), \quad (30)$$

после интегрирования которого найдем

$$\beta = \sqrt{\eta_0^2 - 2 \frac{\delta^2}{\rho D} \int_{\eta_0}^{\eta} \Phi_c d\eta}, \quad (31)$$

$$-x = \int_{\eta_0}^{\eta} \frac{d\eta}{\beta}.$$

Таким образом, сформулированная теоретическая модель горения и газификации кокса позволяет при произвольно заданных температуре и составе окружающей среды рассчитывать скорости горения и газификации кокса, потребления различных реакционных газов, а также образования и состав продуктов, температуру поверхности кокса, распределения температуры и концентраций реагирующих веществ в газовой фазе и внутри кокса, распределения скорости потребления углерода внутри кокса и потоков реагирующих веществ и тепла.

Для иллюстрации приведем некоторые результаты расчетов параметров процесса горения кокса в среде, близкой по составу к воздуху ($p_6^0 = 0,2$). В качестве характеристик внутренней структуры кокса, которые для коксов разных сортов углей могут быть различны, полагаем $\kappa = 1 \cdot 10^{-4}$ и $S = 3,78 \cdot 10^7$ 1/м [13]. Кроме этого предполагаем, что теплообмен излучением кокса с окружающей средой отсутствует. Некоторые результаты влияния теплообмена излучением на процесс горения частицы углерода приведены в [14], откуда следует, что теплообмен излучением весьма сильно влияет на горение и газификацию кокса и приводит не только к количественным, но и качественным изменениям в закономерностях этих процессов. Поэтому исследования влияния теплообмена излучением на характеристики рассматриваемых процессов должны быть проведены отдельно.

Для расчета этих характеристик необходимо задать кинетические уравнения для скоростей гетерогенных химических реакций взаимодействия углерода с реакционными газами: диоксидом углерода, водяным паром, водородом и кислородом. Данные по кинетическим константам реакций углерода с реакционными газами в разных исследованиях очень сильно отличаются, за исключением, может быть, реакции углерода с диоксидом углерода. Такой разброс опытных данных, по-видимому, связан с разными условиями проведения опытов, а также с использованием разных теоретических моделей для обработки экспериментальных результатов.

Необходимо провести систематический анализ имеющихся экспериментальных данных на основе единой теоретической модели процессов горения и газификации коксов, учитывающей условия проведения экспериментов (способа изменения температуры кокса, наличия теплообмена излучением кокса с окружающей средой и др.), с целью получения кинетических уравнений взаимодействия коксов с реакционными газами. Разрабатываемая здесь теоретическая модель горения и газификации коксов может быть полезна для проведения такого анализа.

В общем случае выражение для скорости гетерогенных реакций взаимодействия кокса с реакционными газами может быть записано в виде (10). Обычно полагают, что равновесная концентрация z_6 мала и ее величиной пренебрегают. Однако в случаях взаимодействия углерода кокса с диоксидом углерода, водяным паром или водородом равновесная концентрация этих веществ может быть существенно отлична от нуля, поэтому здесь этот параметр при расчетах будет рассматриваться. Порядки химических реакций, определенные в разных опытах, сильно различаются, и до уточнения значений этих величин принимаем $q_i = 1$. Энергия активации и предэкспонент для реакции углерода кокса с диоксидом углерода, согласно [13],

$$E/R = -30\ 214 \text{ К}, k_0 = 760 \text{ м/с.}$$

Для реакций углерода кокса с водяным паром, водородом и кислородом эти значения могут быть выбраны, например, в соответствии с рекомендациями [15].

Полагаем, что кокс находится в среде с $T_0 = 1000$ К, имеющей следующий состав: $p_1^0 = 0,2$, $p_2^0 = p_3^0 = p_4^0 = p_5^0 = 0$, $p_6^0 = 0,2$. Для этого случая рассчитанные распределения температуры, концентраций компонентов и скорости потребления углерода внутри слоя кокса и в газовой фазе представлены на рис. 1. В рассматриваемом случае горения кокса в воздухе в газовой фазе формируется фронт газовой фазной химической реакции $2\text{CO} + \text{O}_2 =$

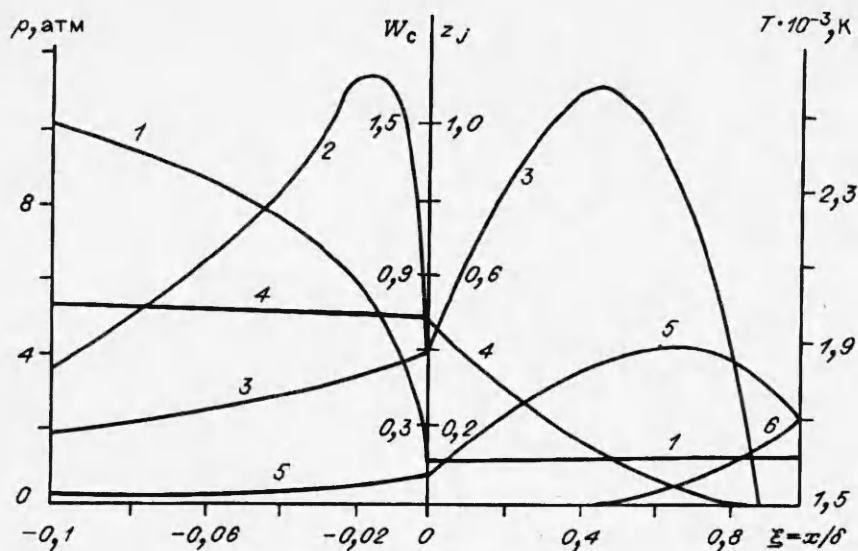


Рис. 1. Распределения давления (1), скорости потребления углерода $W_c = \Phi_c \delta^2 / \rho D$ (2), температуры (3), концентраций CO (4), CO₂ (5) и O₂ (6) в газовой фазе и внутри пористого кокса; $\delta = 10^{-3}$ м, $p_a = 1$ атм.

$= 2\text{CO}_2$, в которой потребляется практически весь кислород, а внутри слоя кокса протекает гетерогенная химическая реакция $\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$. Первичный продукт этой реакции у поверхности кокса — оксид углерода, а конечный — диоксид углерода.

На рис. 2 приведена зависимость скорости горения кокса (условия аналогичны рис. 1) от содержания в окружающей среде диоксида углерода p_1^0 . Рост p_1^0 при малых концентрациях приводит к возрастанию η_0 , так как увеличивается суммарная концентрация окисляющих компонентов в среде. Реакция углерода с диоксидом углерода эндотермическая, поэтому при повышении концентрации CO₂ снижается также и температура поверхности кокса, что приводит к уменьшению скорости химической реакции и при дальнейшем увеличении концентрации CO₂ — к замедлению скорости горения кокса. Учет этого обстоятельства может быть важен при обработке экспериментальных результатов по горению кокса.

Штриховыми кривыми на рис. 2 представлены аналогичные зависимости скорости горения и температуры поверхности кокса от содержания диоксида углерода в окисляющей среде при горении кокса в диффузионном режиме. Видно, что при больших содержаниях диоксида углерода в среде скорость горения и температура поверхности кокса при диффузионном и кинетическом режимах горения сильно различаются, что указывает на необходимость рассмотрения кинетического режима горения кокса в этих условиях. Однако при малых значениях p_1^0 можно рассматривать диффузионный режим горения кокса, так как в этих условиях диффузионный и кинетический режимы горения близки по своим характеристикам.

Зависимости скорости горения кокса и температуры поверхности кокса от толщины «приведенной пленки» δ , которая характеризует интенсивность тепло- и массообменных процессов кокса с окружающим газом в результате обтекания кокса газовым потоком, представлены на рис. 3. При уменьшении интенсивности тепло- и массообменных процессов кокса с газом (увеличении параметра δ) температура поверхности кокса и скорость горения $m = \eta \rho D / \delta$ уменьшаются. Если построить зависимость логарифма скорости горения от величины обратной температуры поверхности кокса путем исключения параметра δ в зависимости, представленной на рис. 3, то получим приблизительно прямую линию, указывающую на аррениусовскую зави-

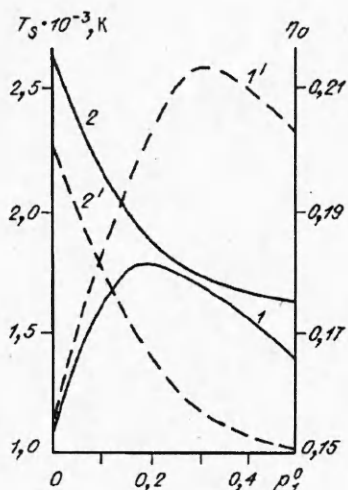


Рис. 2. Зависимость безразмерной скорости горения η_0 (1) и температуры поверхности кокса T_s (2) от p_1^0 .

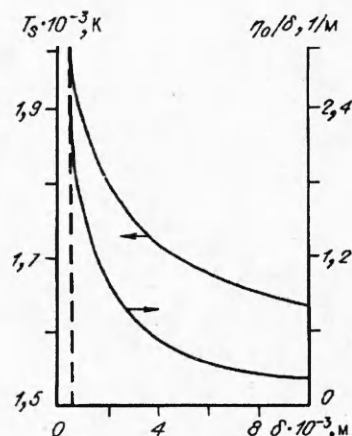


Рис. 3. Зависимость температуры поверхности кокса и скорости горения η_0/δ от параметра δ при горении в условиях рис. 1.

симость скорости горения от температуры. Однако получаемое при этом значение $E/R \approx -64\,472$ К значительно больше энергии активации химической реакции взаимодействия углерода с CO_2 , которая принималась при расчетах. Это связано с тем, что в рассматриваемых условиях численного опыта при уменьшении δ наряду с повышением температуры поверхности кокса увеличивается интенсивность тепло- и массообмена, в результате зависимость скорости горения от температуры оказывается более сильной, чем кинетическая.

Отметим также, что при малых δ резко изменяется картина горения кокса. При больших интенсивностях процессов тепло- и массообмена кислород достигает поверхности кокса, вступает в гетерогенную реакцию с углеродом и в слое кокса образуется зона тепловыделения. На рис. 3 минимальное значение δ , при котором происходит переход на другой режим горения, отмечено штриховой линией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Laurendau N.M. Heterogeneous kinetics of coal gasification and combustion. // Progress in Energy and Combust. Sci. — 1978. — 4, N 4. — P. 221—270.
2. Dutta S., Wen C.Y., Belt R.J. Reactivity of Coal and Char. 1. In Carbon Dioxide Atmosphere // Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. — 1977. — 16, N 1. — P. 20.
3. Chin G., Kimura S., Tone S. et al. Gasification of Coal Char with Steam (Part 1, 2) // Int. Chem. Eng. — 1983. — 23, N 1. — P. 105—120.
4. Предводителев А.С., Хитрин Л.Н., Цуханова О.А. и др. Горение углерода. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1949. — 407 с.
5. Головина Е.С. Высокотемпературное горение и газификация углерода. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 174 с.
6. Tu C.M., Davis H., Hottel H.C. // Ind. Eng. Chem. — 1934. — 26, N 7. — P. 749—757.
7. Srinivas B., Amundson R.N. // AIChE J. — 1980. — 26. — P. 487.
8. Nusselt W. // Zs. VDI. — 1924. 68.
9. Burke S., Shumann T. // Ind. Eng. Chem. — 1932. — 24. — P. 451.
10. Головин А.М., Песочин В.Р., Толмачев И.Я. Горение углеродной частицы в высокотемпературной среде // ФГВ. — 1982. — 18, N 2. — С. 28.
11. Гремячкин В.М., Щиборин Ф.Б. О диффузионном и кинетическом режимах горения частицы углерода // Там же. — 27, N 5. — С. 67—73.
12. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справочник / Под ред. В.П. Глушко. — М.: Наука, 1978.
13. Lee S., Angus J.C., Edwards R.V. et al. Noncatalytic Coal Char Gasification. // AIChE J. — 1984. — 30, N 4. — P. 583—593.
14. Гремячкин В.М., Рощина Л.М. Диффузионно-тепловая модель горения частицы углерода // ФГВ. — 1990. — 26, № 6. — С. 63—68.

15. Виленский Т.В., Хзмалян Д.М. Динамика горения пылевидного топлива: Исследования на электронных вычислительных машинах. — М.: Энергия, 1978. — 442 с.

117526, г. Москва,
ИПМ РАН

Поступила в редакцию 15/II 1993,
после доработки — 3/IX 1993

УДК 662.04:549.21

*В.П. Пацков, В.Б. Редькин, А.А. Анищенко,
Г.Ф. Кузнецов*

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ВЫГОРАНИЯ КОКСОВЫХ ЧАСТИЦ В СУХОМ ВОЗДУХЕ

Предложены математическая модель, алгоритм и программа расчета процесса выгорания одиночных коксовых частиц в сухом воздухе. Выполнен численный анализ влияния параметров модели на выгорание и термический развал частиц.

При математическом моделировании процессов термохимической переработки (пиролиз, сжигание и газификация) энергетических твердых топлив в высокотемпературных дисперсных потоках [1, 2], в кипящем и фонтанирующем слое [3, 4] важное значение имеет корректное описание стадии выгорания коксового остатка топлива. Это необходимо для уточнения границ протекания реакции горения и газификации топливных частиц, выявления основных типов нестационарных и стационарных режимов, характерных для данного класса процессов, оценки эффективных времен выгорания и наблюдаемых скоростей превращения топлива [5, 6], теоретического объяснения явлений термического разрушения частиц и образования коксовой мелочи [7, 8], анализа условий воспламенения частиц [9].

Существующие в настоящее время методики расчета эффективных времен выгорания частиц коксовых остатков в низкотемпературном кипящем слое (КС) базируются [4] преимущественно на принципах стационарной диффузионно-кинетической теории горения и газификации твердого топлива, трактующей процесс горения кокса как диффузионный, слагающийся из реакции между углеродом и кислородом, углеродом и углекислотой, окисью углерода и кислородом [7, 10]. При этом рассматривается установившийся температурный режим, характеризующийся заданными температурными условиями. Особенности выгорания частиц на первоначальных стадиях взаимодействия коксовой частицы с окислителем, характеризующихся существенным изменением во времени основных характеристик процесса [5, 6] и влиянием конвективного переноса на его протекание, уделялось гораздо меньше внимания. Однако такие практически важные задачи управления процессами горения твердых топлив в кипящем слое, как пуск и остановка процесса, переходные режимы, управление температурой слоя, снижение степени механического недожога, прогнозирование вероятности термического разрушения и оптимизации времени пребывания частиц в слое как раз обуславливают повышенный интерес к закономерностям низкотемпературного горения частиц в нестационарных условиях.

В работе [11] предложено математическое описание процесса горения — газификация одиночной коксовой частицы, окруженной горячей газовой оболочкой. Модель учитывает процессы молекулярной диффузии, теплопроводности и конвективного переноса, гомогенные химические превращения в газовой оболочке, поверхностные гетерогенные реакции взаимодействия коксового остатка с газами, изменение размеров частицы во времени. Частица предполагается сферической и беззольной, радиационный обмен осуществляется от изотермической поверхности, среда оптически прозрачна, коэффициент облученности равен 1, минимальный размер микротурбулентности

© В.П. Пацков, В.Б. Редькин, А.А. Анищенко, Г.Ф. Кузнецов, 1994.