

УДК 536.4,622.6

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ГАЗОВОЙ СМЕСИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЖИГАНИЯ, ГОРЕНИЯ И САМОПРОИЗВОЛЬНОГО ПОГАСАНИЯ КОКСОВ УГЛЕЙ РАЗНОГО ПОЛИМОРФИЗМА

В. В. Калинин, А. С. Черненко

Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова, 65082 Одесса, Украина
terphys@onu.edu.ua

Проводится анализ зависимости диаметра пористой углеродной частицы от стационарной температуры при различных давлениях газовой смеси. Рассматриваются случаи самовоспламенения частицы в нагретой азотно-кислородной смеси и вынужденного воспламенения (зажигания) в холодной азотно-кислородной смеси, приводящие к квазистационарному горению, которое сменяется самопроизвольным погасанием. Показано, что температура горения мелких частиц диаметром $d < 200$ мкм, для которых характерен переходный режим протекания химических реакций, возрастает с ростом давления газовой смеси. Получена аналитическая зависимость, качественно описывающая эту динамику. Наибольший рост приходится на интервал давления $0.1 \div 0.3$ МПа. Представлен аналогичный анализ для частиц различных углей. С учетом внутреннего реагирования аналитически получена зависимость критических концентраций кислорода, соответствующих воспламенению и погасанию, от диаметра углеродной частицы. Показано, что повышение давления в смеси приводит к понижению критических концентраций кислорода.

Ключевые слова: частица, кокс, давление, горение, воспламенение, зажигание.

DOI 10.15372/FGV20210210

ВВЕДЕНИЕ

Данные по горению отдельных частиц углей, имеющиеся в литературе, в основном используются для создания и проверки физико-математических теорий и моделей процесса их сгорания. В работе [1] приведен обзор исследований воспламенения и горения отдельных частиц угля за последние годы. Авторы отмечают, что результаты различных исследовательских групп не всегда согласуются между собой. Эти различия часто возникают из-за недостатков самой методологии исследования, а также вследствие широкого спектра характеристик исследуемых углей.

Отличие свойств углей обусловлено различной морфологией углей и их пористостью (таблица). Это, в частности, учитывается в изменении энергии активации E_1 основной реакции окисления углерода $C + O_2 = CO_2$ [2]. Так, для электродного угля $E_1 = 167$ кДж/моль, антрацита — $140 \div 146$, каменного угля — $115 \div 135$, бурого угля — $90 \div 105$, древесного угля — $E_1 = 75 \div 84$ кДж/моль.

Представляют интерес процессы горения [3] и газификации [4] частиц угля при повы-

шенном давлении. Результаты [3] показывают значительное отличие в поведении частиц различных углей. Так, в случае каменного угля избыточные температуры при объемной концентрации кислорода 12 % составляли около 350 К, в то время как в случае бурого угля — около 550 К.

В работе [5] показано, что температура горения частиц угля сильно зависит от концентрации кислорода и общего давления. Повышение давления кислорода при постоянном общем давлении приводило к значительному росту температуры частиц, а увеличение общего давления при постоянном давлении кислорода, в отличие от результатов работы [3], существенно снижало температуру частиц. К недостаткам работы [5] следует отнести то, что сравнение температур горения проводилось при одинаковых концентрациях кислорода, но при различных температурах газовой смеси. Аналогичные исследования влияния давления проводились и в [6].

Аналитическое исследование условий самовоспламенения, самопроизвольного погасания и квазистационарного горения затруднено не только учетом кинетики параллельных реакций на внешней поверхности и на поверх-

Принятые свойства рассматриваемых углей

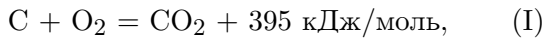
Вид угля	Плотность, кг/м ³	Энергия активации, кДж/моль	Удельная поверхность пор, м ⁻¹	Зольность
Электродный	1 600	167	$2 \cdot 10^5$	0
Антрацит	1 550	140	$2 \cdot 10^5$	0.01
Каменный	1 450	120	$2 \cdot 10^5$	0.08

ностях пор внутри углеродной частицы ($C + O_2 = CO_2$, $2C + O_2 = 2CO$, $Q_1 > Q_2$, $E_1 < E_2$), но и нелинейными температурными зависимостями скорости реакций и теплопотерь излучением.

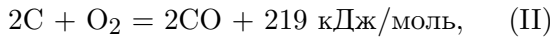
Целью данной работы является аналитическое исследование влияния давления газовой смеси на характеристики горения частицы кокса различных углей — температуру горения, критические значения диаметров самовоспламенения и самопроизвольного погасания.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Химическое взаимодействие углеродной частицы в сухой азотно-кислородной смеси можно представить следующими гетерогенными реакциями:



$$Q_1 = 12.343 \text{ МДж/кг } O_2;$$



$$Q_2 = 6.844 \text{ МДж/кг } O_2,$$

где Q_1 , Q_2 — тепловые эффекты реакций. Кинетические константы данных реакций записываются в виде ($k_* = 100 \text{ м/с}$ и $T_* = 2600 \text{ К}$) [2]:

$$k_{0i} = k_* \exp(E_i/RT_*), \quad E_2 = 1.1E_1,$$

где E_1 , E_2 — энергии активации химических реакций (I) и (II).

Свойства азотно-кислородных смесей определялись согласно температурным зависимостям:

$$\lambda_g = \lambda_{g0} \left(\frac{T_*}{T_0} \right)^n, \quad a_g = \frac{\lambda_g}{c_g \rho_g},$$

$$c_g = c_{g0} + \Omega(T_* - T_0),$$

$$\rho_g = \rho_{g0} \frac{T_0}{T_*} \frac{p}{p_0}, \quad \rho_{gs} = \rho_{g0} \frac{T_0}{T} \frac{p}{p_0},$$

$$D_g = a_g = D_{g0} \left(\frac{T_*}{T_0} \right)^{n+1} \frac{p_0}{p},$$

$$T_* = \frac{T_g + T}{2}, \quad \beta = \frac{D_g \text{Sh}}{d} = \frac{D_g}{d_*},$$

где приняты следующие начальные параметры: плотность $\rho_{g0} = 0.277 \text{ кг/м}^3$; теплопроводность $\lambda_{g0} = 8.19 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; удельная теплоемкость газовой смеси $c_{g0} = 1110 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$; температура $T_0 = 1273 \text{ К}$; степень черноты поверхности частицы $\varepsilon = 0.78$; $n = 0.75$; давление $p_0 = 0.1 \text{ МПа}$. Здесь T , T_g — температуры частицы и окружающей холодной газовой смеси, ρ_{gs} — плотность газовой смеси у поверхности частицы, D_g — коэффициент диффузии кислорода в газовой смеси, β — коэффициент массообмена частицы с газом, Sh — число Шервуда, d — диаметр частицы, d_* — приведенный диаметр.

При высоких температурах и диаметрах частицы константа внутреннего реагирования не зависит от диаметра частицы [7]:

$$k_v \approx \frac{2D_v}{d} \text{Se}_v = \sqrt{(k_1 + k_2)D_v F_v},$$

$$D_v = \chi^2 D_g, \quad F_v = F_{v0}(1 - \chi), \quad \chi = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{tr}} \right),$$

где D_v — коэффициент внутренней диффузии кислорода в порах, $\text{м}^2/\text{с}$; F_v — удельная поверхность пор, м^{-1} ; χ — пористость частицы; Se_v — диффузионно-кинетическое отношение; k_1 , k_2 — константы химических реакций (I), (II); ρ_{tr} — истинная плотность углеродного материала в угле.

При описанных выше условиях и параметрах зависимость диаметра частицы от стационарной температуры [7] удобно представить в виде двух дополняющих друг друга частей:

$$d = \frac{D_g c_g \rho_g \text{Sh}}{q_{ch,m} Y_{O_2}} \frac{T - T_g}{A^2 + \sqrt{A^2 - A_g A_w}}, \quad (1)$$

$$d = \frac{D_g c_g \rho_g \text{Sh}}{c_g \rho_{gs}} \frac{q_{ch,m} Y_{O_2}}{k_1 + k_2 + k_v + U_{sk}} \times \frac{A^2 + \sqrt{A^2 - A_g A_w}}{\varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4)}, \quad (2)$$

$$q_{ch,m} = (1 - X_A)(Q_1 k_1 + Q_2 k_2) \times \left(1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2}\right) \rho_{gs},$$

$$A_g = \frac{c_g \rho_{gs} (k_1 + k_2 + k_v + U_{sk})(T - T_g)}{q_{ch,m} Y_{O_2}},$$

$$A_w = \frac{\varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4)}{q_{ch,m} Y_{O_2}}, \quad A_{st} = \frac{1}{2} \frac{U_{sk} \rho_{gs} c_g (T + T_g)}{q_{ch,m} Y_{O_2}},$$

$$A = \frac{1}{2} (1 - A_g - A_w - A_{st}),$$

$$U_{sk} = \frac{M_C}{M_{O_2}} (k_1 + 2k_2) \left(\frac{k_v}{k_1 + k_2} + 1 \right) Y_{O_2}.$$

Здесь ρ_g — плотность газовой смеси внутри приведенной пленки; A_g , A_w , A_{st} — теплопотери излучением газовой смеси, стенки, стационарная; k_v — константа скорости внутреннего реагирования; q_{ch} — стационарная скорость химического тепловыделения; Y_{O_2} — массовая доля кислорода в холодной газовой смеси; X_A — зольность; U_{sk} — скорость стефановского течения; σ — постоянная Стефана — Больцмана; M_C , M_{O_2} — молярные массы углерода и кислорода; T_w — температуры окружающих частицы стенок.

Зависимости (1) и (2) диаметра частицы от ее стационарной температуры при различных давлениях и температурах смеси представлены на рис. 1. Случай $d > d_{i1}$ (рис. 1,а) соответствует самовоспламенению частиц [8], а $d_{e1} < d < d_{i1}$ — вынужденному воспламенению (зажиганию). При $d_{e1} < d < d_{e2}$ (рис. 1,б) также может быть реализовано зажигание [8].

На обратной зависимости существует максимум (соответствует d_m) [9]. Для частиц малых размеров $d < d_m$ теплопотери излучением незначительны ($A_w \ll A_g$). Стационарная зависимость диаметра частицы от температуры определяется выражением (1). При размерах углеродных частиц $d > d_m$ основную роль играют теплопотери излучением. Для них стационарная зависимость диаметра от температуры горения определяется зависимостью (2).

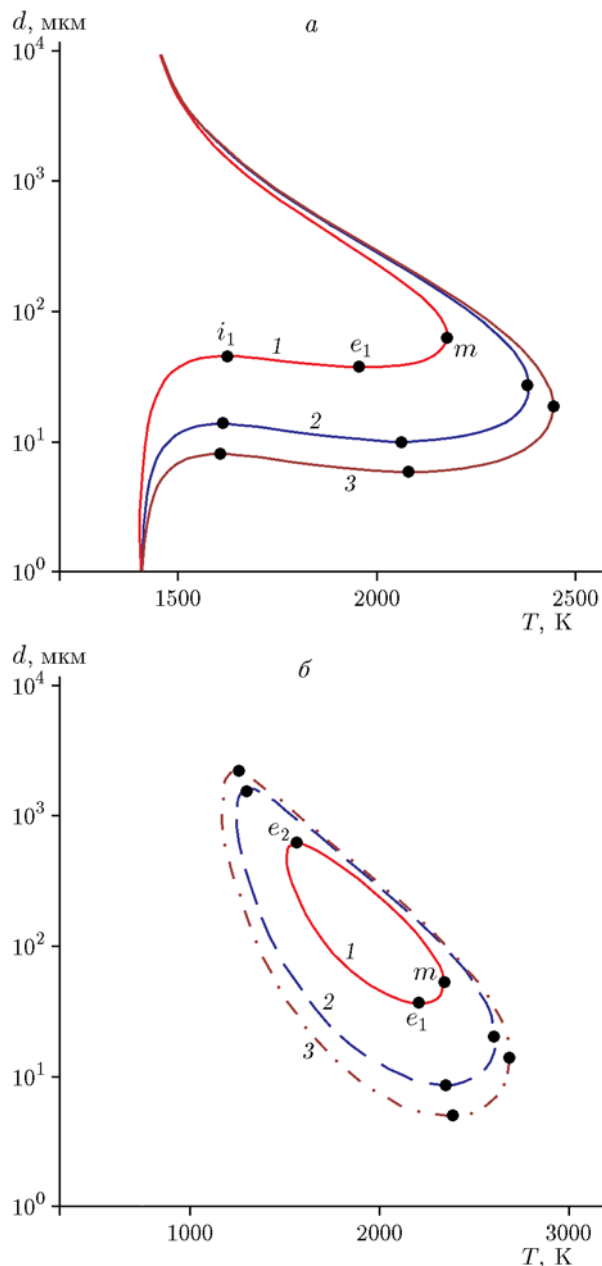


Рис. 1. Зависимость диаметра частицы антрацита от стационарной температуры:

а — $T_g = 1400$ К, $T_w = 1400$ К, $Y_{O_2} = 0.23$; б — $T_g = 293$, $T_w = 293$ К, $Y_{O_2} = 0.50$; давление: 1 — 0.1 МПа, 2 — 0.3 МПа, 3 — 0.5 МПа

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В случае диффузионного режима протекания реакций, когда теплопотери излучением не учитываются, температура горения не зависит от давления газовой смеси и оценивается согласно [9]:

$$T_m \approx \frac{Q_1 k_1 + Q_2 k_2}{(k_1 + k_2) c_{pg}} Y_{O_2} + T_g.$$

В диффузионном режиме химическое тепловыделение составляет $q_{ch,d} \sim D_g \rho_g \neq f(p)$ и теплотери частицы с газовой смесью $q_g \sim D_g \rho_g \neq f(p)$. Поэтому при учете теплотерь излучением в диффузионном режиме горения (крупные частицы или высокие температуры) давление смеси не оказывает влияния на температуру горения.

При уменьшении концентрации кислорода в смеси, когда температура горения частиц понижается, для мелких частиц режим не является чисто диффузионным (диффузионно-кинетическое отношение $Se_m < 6$), а является переходным [10]. Именно в этом заключается одна из причин возникновения самопроизвольного погасания. Как видно из рис. 1, именно вблизи максимальной температуры горения (мелкие частицы $d < 200$ мкм) и критических условий воспламенения (точка i) и погасания (точка e) влияние давления смеси наиболее существенно.

В результате с увеличением давления возрастает максимальная температура горения T_m , уменьшаются критические диаметры воспламенения d_i и погасания d_e . Объясняется это тем, что в переходном режиме скорость тепловыделения зависит от давления:

$$q_{ch} = q_{ch,d} \frac{Se_0 p / p_0}{1 + Se_0 p / p_0},$$

$$Se_0 = \frac{k_1 + k_2 + k_v + U_{sk} \rho_{gs}}{D_g Sh} \frac{\rho_{gs}}{\rho_g} d \Big|_{p=p_0},$$

где Se_0 — диффузионно-кинетическое отношение при $p_0 = 0.1$ МПа, $q_{ch,d}$ — скорость химического тепловыделения в диффузионном режиме. Чем меньше Se_0 , тем больше разность $q_{ch,d} - q_{ch}$ и выше скорость увеличения скорости тепловыделения с ростом давления (рис. 2, а).

Для выяснения влияния давления на температуру горения из условия стационарности температуры нужно выделить давление:

$$p = p_0 [\beta c_g \rho_g (T - T_g) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4)] / \{ (1 - X_A) (Q_1 k_1 + Q_2 k_2) \rho_{gs(p=p_0)} Y_{O_2} - Se_0 [\beta c_g \rho_g (T - T_g) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4)] \}. \quad (3)$$

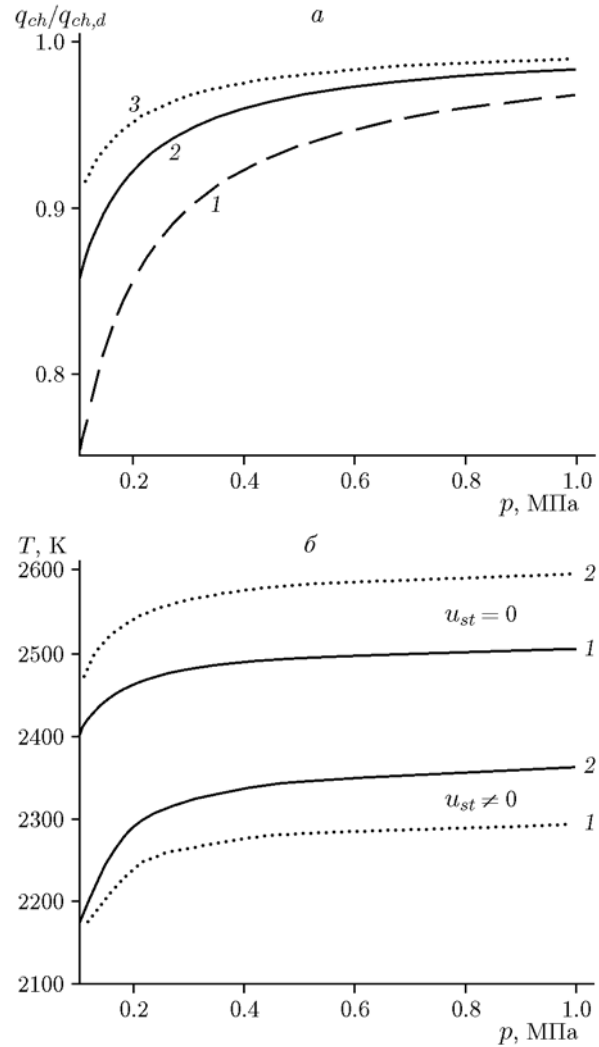


Рис. 2. Зависимость скорости тепловыделения от давления при различных значениях соотношения Se_0 (а) и зависимость стационарной температуры от давления нагретого воздуха ($T_g = 1400$ К и $Y_{O_2} = 0.23$) для частиц антрацита различных диаметров (б):

а — $Se_0 = 3$ (1), 6 (2), 10 (3); б — $d = 100$ мкм (1), 70 мкм (2)

Из рис. 2, б видно, что данная зависимость качественно описывает динамику изменения температуры горения при возрастании давления смеси. Так, наибольший ее рост приходится на диапазон давления смеси 1 ÷ 3 МПа. Зависимость (3) не учитывает стефановское течение, которое при высоких температурах существенно понижает температуру горения. Так как скорость стефановского течения зависит от давления смеси, это усложняет получение аналитической зависимости, аналогичной (3).

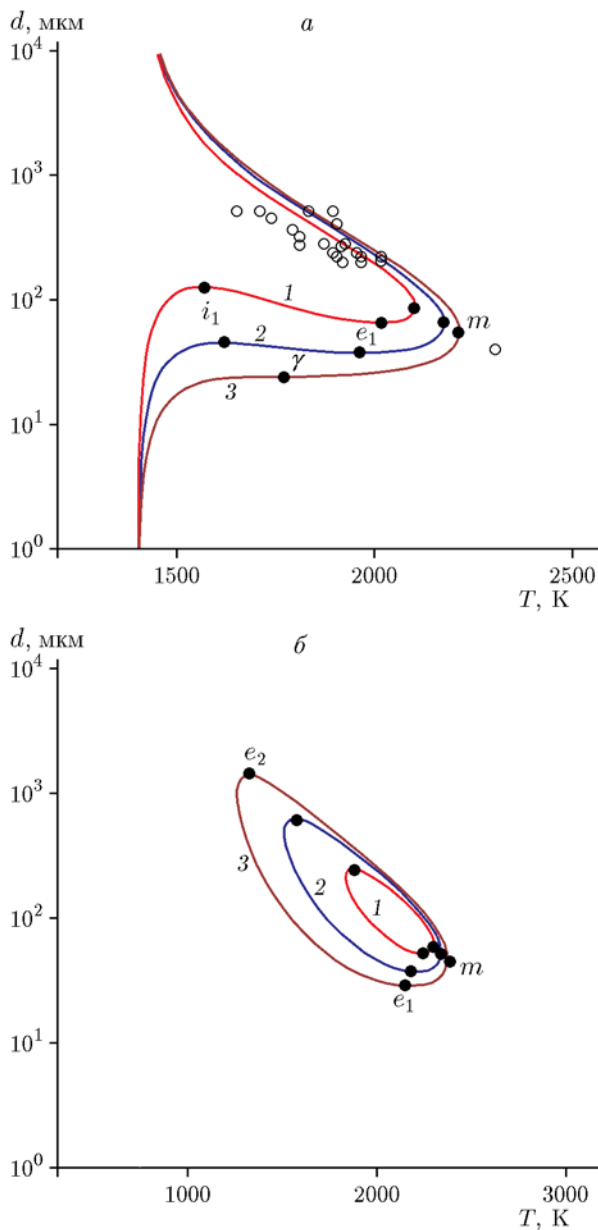


Рис. 3. Зависимость диаметра частицы от стационарной температуры в воздухе и влияние на нее вида угля:

a — $T_g = T_w = 1400$ К, $Y_{O_2} = 0.23$; *б* — $T_g = T_w = 293$ К, $Y_{O_2} = 0.50$; 1 — электродный уголь, 2 — антрацит, 3 — каменный уголь; давление смеси 0.1 МПа; \circ — эксперимент [2]

Рис. 3 иллюстрирует влияние вида угля на рассматриваемые характеристики горения. Так, уменьшение энергии активации (в ряду электродный уголь — антрацит — каменный уголь) во многом сходно с увеличением давления: повышается максимальная температура горения — понижается диаметр воспламенения

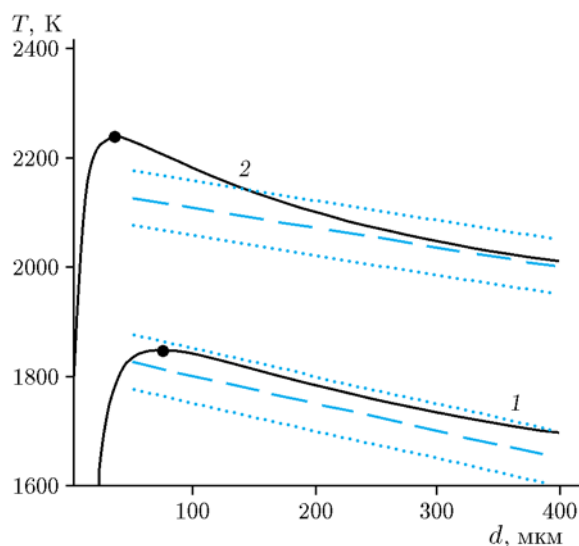


Рис. 4. Зависимость диаметра частицы каменного угля от стационарной температуры в обедненном воздухе ($Y_{O_2} = 0.12$) при $T_g = T_w$: 1 — 1373 К, 2 — 1773 К; давление смеси 0.3 МПа; \bullet — эксперимент [3]

и погасания (рис. 3, *a*), а также расширяется область зажигания по диаметру частиц в холодных смесях (рис. 3, *б*).

На рис. 4 приведены расчетные зависимости температуры горения частиц каменного угля (сплошные кривые 1, 2) в сравнении с экспериментальными данными (штриховая линия). Температура частиц определялась оптическим двухцветным пирометром. Большое количество имеющихся экспериментальных значений температуры представлено в виде зависимости средней температуры горения от диаметра (штриховая линия) с указанием границ изменений (пунктирные).

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Для анализа зависимостей критических условий от диаметра частицы удобно рассмотреть зависимость концентрации кислорода в смеси от стационарной температуры частицы, как это сделано в [11]:

$$Y_{O_2} = \frac{\beta \rho_g c_g (T - T_g) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4)}{(1 - X_A)(Q_1 k_1 + Q_2 k_2) \rho_{gs} [1 + k_v / (k_1 + k_2)]} \times \left(1 + \frac{k_1 + k_2 + k_v}{\beta} \right). \quad (4)$$

Для поиска критических условий используем условие $\left. \frac{\partial Y_{O_2}}{\partial T} \right|_{i,e} = 0$ для зависимости (4).

Вначале определим температурные производные:

$$(Q_1 k_1 + Q_2 k_2)'_T = \frac{E_{eff1}}{RT^2} (Q_1 k_1 + Q_2 k_2),$$

$$(k_1 + k_2)'_T = \frac{E_{eff2}}{RT^2} (k_1 + k_2),$$

$$(k_v)'_T = (\sqrt{(k_1 + k_2)F_v D_v})'_T = \frac{1}{2} \frac{E_{eff2}}{RT^2} k_v,$$

$$E_{eff1} = \frac{Q_1 k_1 E_1 + Q_2 k_2 E_2}{Q_1 k_1 + Q_2 k_2},$$

$$E_{eff2} = \frac{k_1 E_1 + k_2 E_2}{k_1 + k_2}, \quad E_{eff1} < E_{eff2}.$$

В результате дифференцирования (4) получаем следующее уравнение:

$$\left[E_{eff1} \left(\frac{\sum k}{\beta} + 1 \right) \left(1 - \frac{1}{2} \frac{E_{eff2}}{E_{eff1}} \frac{k_v}{\sum k} \right) - E_{eff2} \frac{\sum k - k_v/2}{\beta} \right] \frac{1}{RT^2} \times$$

$$\times [\beta \rho_g c_g (T - T_g) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4)] =$$

$$= \left(\frac{\sum k}{\beta} + 1 \right) (\beta \rho_g c_g + 4 \varepsilon \sigma T^3).$$

Введем замену $\frac{1}{\beta} = \frac{\sum k}{\beta}$ и $\sum k = k_1 + k_2 + k_v$.

Решение полученного квадратного уравнения представим в виде

$$\bar{\beta}|_{i,e} =$$

$$= \frac{B \pm \sqrt{B^2 + (A_g(1 - A_v) - 1)(A'_w - (1 - \bar{E})A_w)}}{A_g(1 - A_v) - 1}, \quad (5)$$

где

$$A_v = \frac{1}{2} \bar{E} \frac{k_v}{\sum k}, \quad A'_w = \frac{4 \varepsilon \sigma T^3}{\sum k \rho_g c_g},$$

$$A_g = \frac{T - T_g}{RT^2} E_{eff1}, \quad \bar{E} = \frac{E_{eff2}}{E_{eff1}} > 1,$$

$$A_w = \frac{\varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4)}{\sum k \rho_g c_g RT^2 / E_{eff1}},$$

$$2B = (1 + A'_w - (1 - A_v)A_w - (1 - \bar{E})A_g).$$

Выражения для диаметра частицы и концентрации кислорода (4) и (5), которые соответствуют воспламенению и погасанию, представим в виде системы параметрических уравнений (параметр T):

$$Y_{O_2}|_{i,e} = \frac{c_g \rho_g RT^2}{(1 - X_A) E_{eff1} Q_{eff} \rho_{gs}} \times$$

$$\times \left(\frac{1}{\bar{\beta}|_{i,e}} + 1 \right) (A_g \bar{\beta}|_{i,e} + A_w), \quad (6)$$

$$d_*|_{i,e} = \frac{D_g}{\sum k} \{ [A_g(1 - A_v) - 1] / (B \pm$$

$$\pm \sqrt{B^2 + [A_g(1 - A_v) - 1][A'_w - (1 - \bar{E})A_w]}) \},$$

где $Q_{eff} = (Q_1 k_1 + Q_2 k_2) / (k_1 + k_2)$ — эффективный тепловой эффект окисления углерода.

На рис. 5, а представлена зависимость критической концентрации кислорода от размера угольной частицы. При диаметре частицы меньше диаметра вырождения $d < d_\gamma$ в нагретом воздухе существуют два критических значения концентрации кислорода. Большее значение соответствует самовоспламенению (точка i), нижнее — погасанию (точка e). Для этой области размеров частиц характерны скачкообразное возникновение их горения при превышении концентрацией кислорода значения Y_{O_2i} и скачкообразное погасание при концентрации ниже Y_{O_2e} . В диапазоне концентраций $Y_{O_2e} < Y_{O_2} < Y_{O_2i}$ (гистерезисная область) горение частицы возникает в результате вынужденного воспламенения [11], т. е. после повышения начальной температуры частицы выше температуры зажигания.

Для диаметров частиц $d > d_\gamma$ при повышении и понижении концентрации кислорода изменение температуры стационарного окисления, в том числе и горения, происходит плавно, не скачкообразно.

С ростом давления газовой смеси уменьшаются оба значения концентрации — Y_{O_2i} и Y_{O_2e} . При этом диаметр вырождения смещается в область меньших значений.

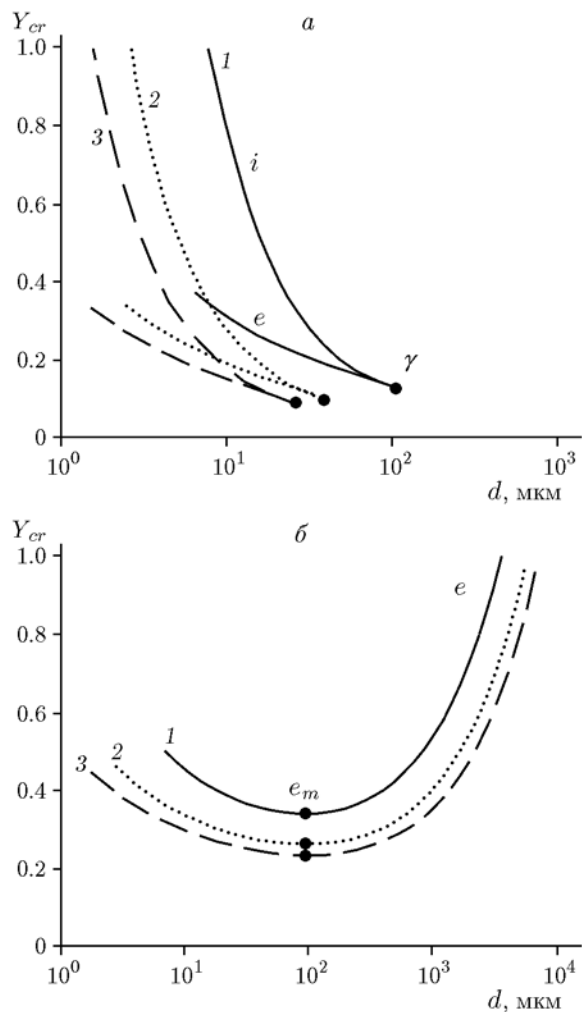


Рис. 5. Критические концентрации воспламенения (i) и погасания (e) в зависимости от диаметра частицы антрацита в азотно-кислородной смеси:

a — $T_g = T_w = 1400$ К, $Y_{O_2} = 0.23$; b — $T_g = T_w = 293$ К, $Y_{O_2} = 0.50$; давление: 1 — 0.1 МПа, 2 — 0.3 МПа, 3 — 0.5 МПа

При понижении температуры газовой смеси (рис. 5, b) остается лишь кривая погасания (точки e), которая имеет минимум (точка e_m). Это означает, что при $Y_{O_2} > Y_{O_2 e_m}$ имеется диапазон диаметров частиц, в котором удаётся вынужденно их воспламенить (зажечь) в холодном воздухе [8]. Увеличение давления газа понижает предельную концентрацию кислорода $Y_{O_2 e_m}$, соответствующую зажиганию угольной частицы, и расширяет область зажигания по диаметру частиц. Возрастание критического значения концентрации кислорода с увеличением диаметра частицы связано с теплопотерями излучением [11].

ВЫВОДЫ

Таким образом, с использованием аналитических зависимостей диаметра частицы и концентрации кислорода от стационарной температуры показано влияние давления смеси на температуру горения, определены критические значения концентрации воспламенения и погасания частицы в нагретых и холодных азотно-кислородных смесях. Наиболее существенно влияние давления проявляется в интервале 0.1 ÷ 0.3 МПа для частиц размерами $d < 200$ мкм.

Уменьшение энергии активации реакции окисления кокса угля (электродный уголь → антрацит → каменный уголь), как и повышение давления смеси, увеличивает максимальную температуру ее горения и понижает ее диаметры воспламенения и погасания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Marek E., Staczyk K. Case studies investigating single coal particle ignition and combustion // J. Sustain. Mining. — 2013. — V. 12, N 3. — P. 17–31.
2. Основы практической теории горения: учеб. пособие для вузов / под ред. В. В. Померанцева — Л.: Энергоатомиздат, 1986.
3. Reichelt T., Joutsenoja T., Spliethoff H., Hein K. R. G., Hernberg R. Characterization of burning char particles under pressurized conditions by simultaneous in situ measurement of surface temperature and size // 27th Symp. (Int.) on Combustion. — The Combust. Inst., 1998. — P. 2925–2932.
4. Liu G.-S., Niksa S. Coal conversion submodels for design applications at elevated pressures. Part II. Char gasification // Prog. Energy Combust. Sci. — 2004. — V. 30, N 6. — P. 679–717.
5. Monson C. R., Germane G. J., Blackham A. U., Douglas Smoot L. Char oxidation at elevated pressures // Combust. Flame. — 1995. — V. 100, N 4. — P. 669–683.
6. Ma L. Combustion and gasification of chars in oxygen and carbon dioxide at elevated pressure: Ph D. / Stanford Univ. — 2006.
7. Kalinchak V., Chernenko A. S., Zinchenko Yu., Kuzemko R. D. Combustion and spontaneous extinction of pulverized coal particles // Metall. Mining Industry. — 2015. — N 10. — P. 238–244.
8. Калинин В. В., Черненко А. С. Горение и самопроизвольное погасание пористых углеродных частиц в азотно-кислородных смесях комнатной температуры // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 2. — С. 80–88.

9. **Калинчак В. В., Черненко А. С., Корчагина М. Н.** Влияние параметров газовой смеси на максимальную температуру и скорость горения углеродной частицы углеродной частицы // Физика аэродисперсных систем. — 2016. — № 53. — С. 105–116.
10. **Chernenko A. S., Kalinchak V. V., Korchagina M. N., Darakov D. S.** Influence of mass transfer on the critical conditions and the time of the coke particle ignition // Ukrain. J. Phys. — 2019. — Т. 64, № 9. — С. 793–802.
11. **Kalinchak V. V., Chernenko A. S., Kalugin V. V.** Critical condition limits for the high temperature oxidation of gases on a catalyst particle // Kinet. Catal. — 2014. — V. 55, N 3. — P. 269–277.

Поступила в редакцию 17.02.2020.

Принята к публикации 08.06.2020.
