

УДК 536.46:662.612

С.Г. Орловская, В.В. Калинин, О.Н. Зуй, М.Н. Чесноков

Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова, г. Одесса

Тепломассообмен и кинетика химических превращений монодисперсной газозвеси пористых углеродных частиц с учетом стефановского течения

Исследованы нестационарный тепломассообмен и кинетика химических превращений монодисперсной газозвеси пористых углеродных частиц с учетом стефановского течения. Приведен анализ влияния внутрипористого реагирования на характеристики высокотемпературной стадии (время горения, максимальная температура частиц), период индукции и критические параметры самопроизвольного потухания частиц в газозвеси (критические диаметр и плотность углеродной частицы).

Исследование устойчивых режимов высокотемпературного тепломассообмена (ТМО) и кинетики химических превращений частиц углерода и металлов в условиях газозвеси является актуальной задачей, что связано с необходимостью разработки эффективных методов использования дисперсных систем в различных технологических процессах. Важной задачей есть управление процессом горения диспергированного топлива с помощью изменения режимных параметров с целью создания ресурсосберегающих и экологически чистых технологий переработки топлив. В связи с этим очень важным, с точки зрения охраны окружающей среды, есть исследование критических режимов самопроизвольного потухания, которые определяют полноту преобразования топлив в реакционных камерах, так как не переработанные частицы угля выбрасываются в атмосферу и создают экологически опасную ситуацию.

Углеродная частица прорезана огромным количеством микротрещин и пор, которые, соединяясь между собой, образуют большую внутреннюю поверхность [1 – 4]. Кислород проникает в поры и при определенных температурах вступает в химическую реакцию с углеродом. Поэтому горение углеродных частиц обусловлено химическим реагированием, как на внешней поверхности частицы, так и внутри – на поверхности пор.

Целью работы является исследование влияния внутреннего реагирования на характеристики высокотемпературного тепломассообмена, критические режимы воспламенения и потухания газозвесей углеродных частиц при различных массовых концентрациях топлив.

В условиях газозвеси нестационарный тепломассообмен и химическое превращение частиц происходят при изменяющихся с течением времени температуры газа и концентрации кислорода. Химическое взаимодействие углеродной

частицы с кислородом сухого воздуха можно представить в виде двух параллельных гетерогенных реакций [1]:



Процессы, происходящие в пограничном слое вблизи горячей поверхности, наиболее просто учитываются в пределах теории приведенной пленки. Считается, что в пределах условной пограничной пленки осуществляется только молекулярный перенос. В связи с этим основной газовый поток однороден и в областях, близких к приведенной пленке, отсутствуют градиенты температуры и парциальных давлений. Пользуясь понятием приведенной пленки, определим критерий Нуссельта, задающий условия теплообмена между частицей и газом, с учетом стесненности газовой среды:

$$\text{Nu} = 2 \left(1 - \frac{d}{d_{\text{cell}}} \right)^{-1}, \quad d_{\text{cell}} = \left(\frac{6}{\pi C_N} \right)^{1/3}, \quad C_N = \frac{N}{V_g},$$

где d_{cell} - диаметр газовой ячейки, окружающей каждую отдельную частицу, м; d - диаметр частицы, м; V_g - объем газовой среды, м³; N - число частиц, C_N - численная концентрация частиц в газовой среде, м⁻³ при $d_{\text{cell}} \gg d$, $\text{Nu} = 2$.

При $\text{Bi} \ll 1$ уравнение нестационарной теплопроводности для углеродной частицы, на поверхности которой протекают параллельные экзотермические химические реакции (I) и (II) и осуществляется конвективно-молекулярный теплообмен с газовой фазой и излучением со стенками реакционной установки, принимает вид:

$$\frac{c \rho d}{6} \frac{\partial T}{\partial t} = q_{\text{ch}} - q_{\lambda, \text{sf}} - q_w, \quad T(t=0) = T_b, \quad (1)$$

где c - удельная теплоемкость частицы, Дж/кг К; ρ - плотность частицы, кг/м³; T , T_b - соответственно, текущая и начальная температуры частицы, К; t - время, с; q_{ch} - суммарная плотность химического тепловыделения на поверхности и в порах частицы, Вт/м²; $q_{\lambda, \text{sf}}$ - плотность теплового потока, молекулярно-конвективным путем и стефановским течением, Вт/м²; q_w - плотность теплового потока излучением от частицы к стенкам реакционной установки, Вт/м².

Суммарная плотность химического тепловыделения состоит из плотностей тепловыделения за счет химических реакций на внешней $q_{\text{ch},s}$ и внутренней $q_{\text{ch},v}$ поверхностях частицы:

$$q_{\text{ch}} = q_{\text{ch},s} + q_{\text{ch},v}. \quad (2)$$

Плотности химического тепловыделения в результате поверхностного и внутреннего реагирования определяются концентрациями кислорода на поверхности и в объеме частицы:

$$q_{\text{ch},s} = (Q_1 k_1 + Q_2 k_2) \rho_g C_{\text{O}_2,s}, \quad q_{\text{ch},v} = (Q_1 k_1 + Q_2 k_2) \rho_g \left\langle C_{\text{O}_2} \right\rangle_v \frac{F_v d}{6}, \quad (3)$$

$$k_1 = k_{01} \exp \left(-\frac{E_1}{RT} \right), \quad k_2 = k_{02} \exp \left(-\frac{E_2}{RT} \right),$$

$$\rho_g = \rho_{g0} \frac{T_0}{T_*}, \quad T_* = \frac{T + T_g}{2},$$

где Q_1, Q_2 – тепловые эффекты химических реакций (I) и (II), рассчитанные на единицу массы кислорода, Дж/кг O_2 ; k_1, k_2 – константы скоростей химических реакций (I) и (II), м/с; ρ_g – плотность газовой смеси, кг/м³; ρ_{g0} – плотность газовой смеси при T_0 ; $C_{O_2,s}$ – относительная массовая концентрация кислорода на поверхности углеродной частицы; $\langle C_{O_2} \rangle_v$ – среднее по объему частицы значение концентрации кислорода; F_v – удельная поверхность пор, м⁻¹; k_{01}, k_{02} – предэкспоненциальные множители для (I) и (II) реакций, м/с; E_1, E_2 – энергии активации для (I) и (II) реакций, Дж/моль; $R = 8,31$ – универсальная газовая постоянная, Дж/моль К; T_g – температура газа, К.

В [5, 6] показано, что средняя по объему относительная концентрация кислорода определяется через значение концентрации окислителя на поверхности частицы

$$\langle C_{O_2} \rangle_v = C_{O_2,s} \frac{k_v}{(k_1 + k_2)} \frac{6}{F_v d}, \quad k_v = \frac{D_v}{r_s} (Se_v \text{cth} Se_v - 1), \quad Se_v = \sqrt{\frac{(k_1 + k_2) d^2 F_v}{4 D_v}}, \quad (4)$$

где k_v – эффективная константа внутреннего реагирования, м/с; Se_v – критерий Семенова; D_v – коэффициент внутренней диффузии, м/с².

Подставив (4) в (3) и учитывая (2), получим

$$q_{ch,v} = \rho_g C_{O_2,s} (k_1 Q_1 + k_2 Q_2) P_v, \\ q_{ch} = (k_1 Q_1 + k_2 Q_2) (P_v + 1) \rho_g C_{O_2,s}, \quad P_v = \frac{k_v}{k_1 + k_2}, \quad (5)$$

где P_v – величина, которая учитывает внутреннее реагирование.

С появлением на поверхности углеродной частицы новых масс газообразных продуктов химических реакций (I) и (II), возникает стефановское течение, которое приводит к появлению дополнительного массового и теплового потоков, направленных от поверхности частицы. В работах [6 – 8] показано, что высокотемпературный тепломассообмен и химическое превращение углеродных частиц в воздухе нужно рассматривать с учетом стефановского течения на их поверхностях.

При химических реакциях на поверхности частицы потоки исходных веществ к поверхности и потоки продуктов реакции от поверхности связаны стехиометрическим соотношением. Инертные газообразные вещества, которые не участвуют в процессе, не должны перемещаться в направлении, нормальном к поверхности, на которой протекает процесс. В этом направлении суммарное давление компонент должно сохраняться неизменным. При этих условиях могут быть найдены направление и скорость стефановского течения.

Концентрация кислорода на поверхности частицы $C_{O_2,s}$ находится из равенства плотности массового потока кислорода суммарной скорости внешнего и внутреннего реагирования по кислороду

$$C_{O_2,s} = \frac{\beta}{\beta + (k_1 + k_2 + U_{sf})(P_v + 1)} C_{O_2,\infty}, \quad U_{sf} = \frac{M_c}{M_{O_2}} (k_1 + 2k_2) C_{O_2,\infty}, \quad (6)$$

где U_{sf} - скорость стефановского течения при протекании химических реакций в кинетической области для сплошной частицы, м/с; $C_{O_2,\infty}$ - относительная массовая концентрация кислорода в газе, окружающем частицу; M_c , M_{O_2} - молярные массы углерода и кислорода, кг/моль; β - коэффициент массообмена неподвижной частицы, м/с.

Подставив (6) в (5), определим суммарную плотность химического тепловыделения

$$q_{ch} = (Q_1 k_1 + Q_2 k_2) \rho_g C_{O_2,\infty} (P_v + 1) \left(\frac{(k_1 + k_2 + U_{sf})(P_v + 1)}{\beta} + 1 \right)^{-1}. \quad (7)$$

В [6] получено выражение для плотности теплового потока на поверхности частицы $q_{\lambda,sf}$, которая определяется молекулярно-конвективным механизмом переноса тепла q_λ и переноса тепла стефановским потоком q_{sf} :

$$q_{\lambda,sf} = \alpha \left[(T - T_g) + \frac{\xi_{sf}}{2} (T + T_g) \right], \quad \alpha = \frac{Nu \lambda_g}{d}, \quad (8)$$

$$\xi_{sf} = \frac{U_{sf} (P_v + 1)}{\beta + (k_1 + 2k_2 + U_{sf})(P_v + 1)}, \quad \lambda_g = \lambda_{g0} \left(\frac{T_*}{T_0} \right)^{0.75},$$

где λ_g - коэффициент теплопроводности газа, Вт/м К; λ_{g0} - коэффициент теплопроводности при T_0 ; ξ_{sf} - безразмерная скорость стефановского течения на поверхности частицы; α - коэффициент теплообмена частицы, Вт/м²К.

Проведем оценку роли теплопередачи излучением от частиц к стенкам реакционной установки так, как это сделано в [9]:

$$\alpha_w \sim \sigma T^3 \frac{\ell}{L},$$

где α_w - эффективный коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/м² К; $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м² К⁴ - постоянная Стефана - Больцмана; L - характерный размер сосуда (в данном случае это диаметр газозвеси $L = dg$); ℓ - длина свободного пробега излучения зависит от диаметра и массовой концентрации частиц:

$$\ell \sim d \left(\frac{\rho}{\rho_g} \right) (B^{-1} - 1), \quad B = \frac{Nm}{Nm + m_g},$$

где B - относительная массовая концентрация топлива; m - масса частицы, кг; m_g - масса газа в объеме газозвеси, кг.

Если $\ell \leq d_g$, то теплообмен излучением каждой отдельной частицы со стенками необходимо учитывать в следующем виде:

$$q_w = \varepsilon_{ef} \sigma (T^4 - T_w^4), \quad \varepsilon_{ef} = \varepsilon (1 - \exp(-\ell/d_g)),$$

где q_w – плотность теплового потока излучением на поверхности частицы, Вт/м²; ε_{ef} – эффективный коэффициент интегральной излучательной способности; ε – коэффициент черноты углерода; T_w – температура стенок реакционной установки, К; d_g – диаметр газозвеси, м.

Проведенные оценки показали, что для исследуемых размеров газозвеси ($d_g = 0.1$ м) и относительных массовых концентрацией углеродного топлива, рассматриваемых нами, $B = 1.4 \cdot 10^{-3} \div 0.23$, отношение $\frac{\ell}{d_g}$ лежит в пределах

$1000 \div 30$. Следовательно, тепловой поток излучением с единицы поверхности частицы к стенкам реакционной установки определим в виде:

$$q_w = \varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4). \quad (9)$$

Временные зависимости диаметра и плотности пористой частицы представим в виде [6]:

$$-\frac{1}{2} \frac{\partial(d)}{\partial t} = \frac{M_c}{M_{O_2}} (k_1 + 2k_2) C_{O_2,s} \rho_g, \quad d(t=0) = d_b, \quad (10)$$

$$-\frac{1}{6} d \frac{\partial(\rho)}{\partial t} = \frac{M_c}{M_{O_2}} (k_1 + 2k_2) C_{O_2,s} P_v \rho_g, \quad \rho(t=0) = \rho_b, \quad (11)$$

где d_b – начальный диаметр частицы, м; ρ_b – начальная плотность частицы, кг/м³.

Дифференциальное уравнение, задающее временную зависимость температуры газа, записывается с учетом теплообмена газа с частицами и окружающей средой:

$$c_g \rho_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \alpha S C_N \left[(T - T_g) + \frac{\xi_{sf}}{2} (T + T_g) \right] - \alpha_g F_g (T_g - T_{g\infty}), \quad T_g(t=0) = T_{g\infty}, \quad (12)$$

$$\alpha_g = \frac{Nu_g \lambda_g}{d_g}, \quad F_g = \frac{S_g}{V_g},$$

где c_g – удельная теплоемкость газа, Дж/кг К; $T_{g\infty}$ – температура газовой среды, окружающей газозвесь, К; α_g – коэффициент теплообмена газозвеси с окружающей средой, Вт/м²·К; Nu_g – критерий Нуссельта, задающий теплообмен газозвеси с окружающей средой; (для неподвижной газозвеси $Nu_g = 2$); F_g – удельная поверхность газозвеси, м⁻¹; S, S_g – поверхность частицы и газозвеси, м².

Масса кислорода в объеме газозвеси уменьшается в результате потребления его в химических превращениях на поверхности частиц. Для открытой газозвеси, при наличии внешнего массообмена между ее поверхностью и окружающей средой, уравнение временной зависимости концентрации кислорода можно записать в виде:

$$-\frac{\partial C_{O_2}}{\partial t} = C_N S C_{O_2,s} (k_1 + k_2 + k_v) - F_g \beta_g (C_{O_2,\infty} - C_{O_2}), \quad C_{O_2}(t=0) = C_{O_2,\infty}, \quad (13)$$

$$\beta_g = \frac{Nu_g D_g}{d_g}, \quad D_g = \frac{\lambda_g}{c_g \rho_g},$$

где β_g - коэффициент массообмена газовой взвеси с окружающей средой, м/с.

Уравнения (1), (4), (6) – (13) описывают нестационарный высокотемпературный теплообмен и кинетику химического превращения в монодисперсной газовой взвеси пористых углеродных частиц с учетом внутреннего реагирования и стефановского течения на их поверхности. Решение представленной физико-математической модели позволяет проанализировать влияние внутрипористого реагирования, скорости стефановского течения, температуры газа и стенок реакционной установки на характеристики высокотемпературного теплообмена газовой взвеси частиц, определить критические параметры газовой взвеси, при которых происходит ее воспламенение и самопроизвольное потухание.

Рассмотрим монодисперсную газовую взвесь углеродных частиц заданной массовой концентрации. Массовая концентрация зависит от диаметра частиц и их численной концентрации.

$$C_m = \frac{1}{6} \pi \cdot d^3 \cdot \rho \cdot C_N.$$

Проанализируем влияние внутрипористого реагирования на характеристики высокотемпературного ТМО газовой взвеси углеродных частиц.

Расчеты проводились для антрацита марки АШ при следующих параметрах: $Q_1 = 12.34375 \times 10^6$, $Q_2 = 6.843750 \times 10^6$ Дж/кгO₂; $k_{01} = 1.3 \times 10^5$, $k_{02} = 4.5 \times 10^4$ м/с; $E_1 = 140030$, $E_2 = 154000$ Дж/моль; $F_v = 3 \times 10^7$ м⁻¹, $D_v = 7.5 \times 10^{-8}$ м²/с. Постоянные значения $\rho_{g0} = 0.277$ кг/м³; $\lambda_{g0} = 8.19 \times 10^{-2}$ Вт/(м·К) определялись для $T_0 = 1273$ К.

На рис. 1 изображены временные зависимости температуры, диаметра, производной температуры и плотности пористой и сплошной частиц, а также температура газа и концентрация окислителя на их поверхности для газовой взвеси с коэффициентом избытка кислорода в воздухе $\eta = 2.75$, указывающим на то, что кислорода в воздухе достаточно для полного сгорания углерода. Экстремумы на временных зависимостях производной от температуры частиц указывают на изменение режимов ТМО и кинетики химических реакций и определяют моменты воспламенения и потухания частиц. Когда производная dT/dt (рис. 1, в) достигает максимального значения (т. I) происходит воспламенение частиц, а время от момента ее нагрева до момента воспламенения определяется как период индукции, t_{ind} . После воспламенения температура частицы увеличивается, достигает максимального значения, а потом уменьшается вследствие перехода химической реакции в диффузионный режим протекания и увеличения теплового потока. Последний случай является причиной потухания частиц при достижении ими критического диаметра потухания d_E (рис. 1, б). В момент потухания теплотери от частицы максимально превышают теплоприход вследствие экзотермических химических реакций, поэтому в этот момент на-

блюдается минимум производной в области отрицательных значений (точка Е – точка потухания, рис. 1, в). Время от момента воспламенения (точка I) до момента потухания (точка Е) есть время горения частицы (рис. 1, в).

Из зависимости плотности частицы от времени, мы наблюдаем, что для пористой частицы в процессе горения уменьшается ее плотность, и в момент потухания возникает изгиб (точка Е) вследствие уменьшения скорости химической реакции. Но т.к. в данном случае внутренняя поверхность пор ($F_v = 3 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$) достаточно большая и температура частиц высокая, то протекание химической реакции в порах приводит к выгоранию углерода и дальнейшему уменьшению плотности. Для меньших значений F_v после потухания плотность уменьшается очень медленно. Таким образом, самопроизвольное потухание пористых частиц происходит вследствие достижения ее диаметром, плотностью, а, следовательно, и массой критических значений.

Из рис. 1, д видно, что температура газа в начальный момент на стадии воспламенения немного уменьшается из-за отдачи энергии холодным частицам газовзвеси, а потом увеличивается в результате нагрева его химически реагирующими частицами.

Сравнивая зависимости для газовзвеси пористых (кривые 1) и сплошных (кривые 2) частиц, мы видим, что период индукции газовзвеси пористых частиц меньше в 1,5 раза периода индукции газовзвеси сплошных частиц (рис. 1, а). Из зависимости $C_{O_2,s}(t)$ видно, что концентрация кислорода на поверхности частиц на стадии высокотемпературного ТМО уменьшается сильнее, вследствие выгорания его в порах (рис. 1, е).

Внутреннее реагирование приводит также к уменьшению диаметра частиц при потухании. Газовзвесь пористых частиц с заданной F_v , в отличие от газовзвеси сплошных, после момента потухания, выгорает больше вследствие уменьшения их плотности.

Проанализируем влияние начального диаметра частиц на период индукции и время горения газовзвеси (рис. 2). Зависимость $t_{ind}(d)$ носит немонотонный характер (рис. 2, а). При уменьшении диаметра частиц период индукции уменьшается, достигает минимального значения, а затем увеличивается и при некотором критическом диаметре d_1 (критический диаметр воспламенения) стремится к бесконечности. Увеличение периода индукции слева от точки минимума связано с увеличением теплотерь молекулярно-конвективным путем при уменьшении диаметра частиц, справа – объясняется ростом теплотерь излучением и уменьшением коэффициента массообмена при увеличении диаметра частиц.

Сравнение представленных зависимостей для газовзвесей пористых и сплошных частиц показывает, что период индукции с учетом внутреннего реагирования намного меньше. Газовзвеси пористых частиц воспламеняются в 2 раза быстрее, чем соответствующие газовзвеси сплошных частиц.

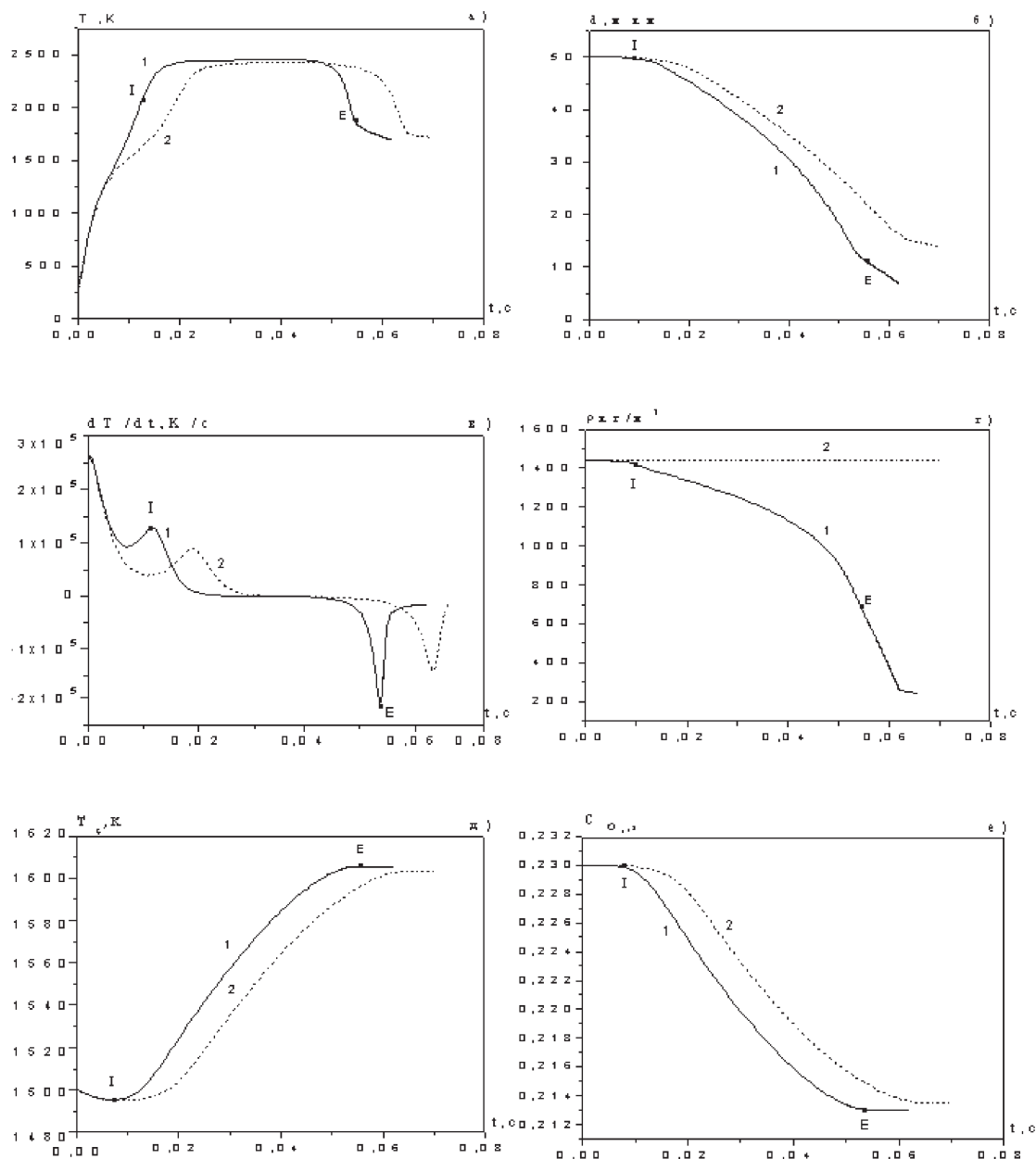


Рис. 1 Зависимости T , d , ρ , dT/dt , T_g , C_{O_2s} от времени, $d_b=50$ мкм, $T_{g\infty}=T_w=1500$ К, $C_N=1,9 \cdot 10^7$ м⁻³, $C_{mb}=0,0144$ кг/м³, $F_v=3 \cdot 10^7$ м⁻¹. 1 - газозвесь пористых частиц, 2 - газозвесь сплошных частиц.

Это объясняется влиянием дополнительного тепловыделения в порах, что приводит к увеличению суммарной плотности химического тепловыделения и в результате температуры частицы. По этой же причине критический диаметр воспламенения для газозвесей пористых частиц в 2 раза меньше, чем для сплошных.

Немонотонность наблюдается и на зависимостях времени горения от диаметра частиц (рис. 2, б). С ростом диаметра частиц (массовой концентрации) время горения увеличивается, достигает максимального значения, затем резко падает. Уменьшение времени горения после точки максимума связано с ростом крити-

ческого диаметра и критической массы, определяющих потухание частиц плотных газозвесей.

Время горения газозвесей пористых частиц всех начальных диаметров меньше времени горения газозвесей сплошных частиц. Данный результат является следствием увеличения суммарной плотности химического тепловыделения за счет химических реакций в порах на всех стадиях ТМО и химического реагирования частиц углерода. По этой же причине критический диаметр и масса пористых частиц при потухании меньше, чем сплошных (табл.).

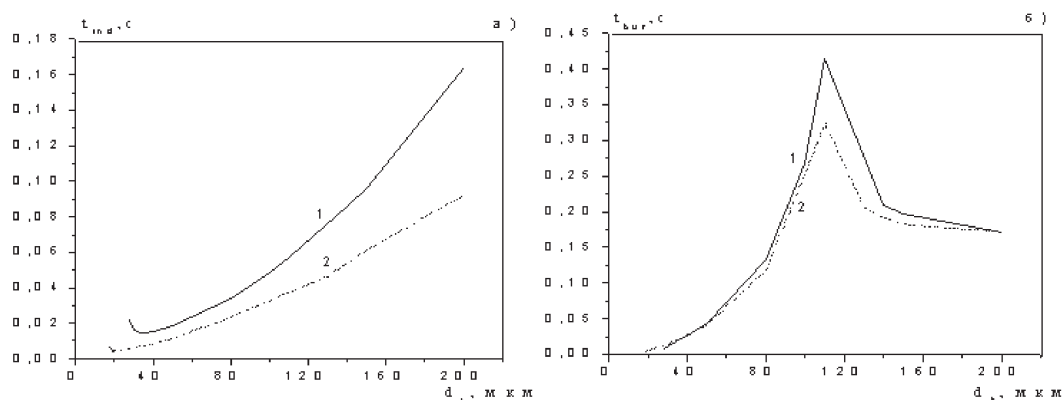


Рис. 2. Зависимость t_{ind} и t_{bur} от начального диаметра частиц газозвеси. $T_g = T_w = 1500$ К,

$$C_N = 1.9 \cdot 10^7 \text{ м}^{-3}, F_v = 3 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1},$$

1 – газозвесь сплошных частиц, 2 – газозвесь пористых частиц.

Таблица

Влияние внутрипористого реагирования на T_m , d_E и ρ_E газозвесей углеродных частиц при различных начальных массовых концентрациях (C_{mb}) для

$$T_{g\infty} = 1500 \text{ К}, F_v = 3 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}.$$

d_b , мкм		50	80	100
C_{mb} , кг/м ³		0.0019	0.0077	0.0150
T_m , К	пористые частицы	2459	2482	2451
	сплошные частицы	2425	2458	2441
d_E , мкм	пористые частицы	12.5	9.1	3.7
	сплошные частицы	15.6	11.4	6.5
ρ_E , кг/м ³	пористые частицы	725	525	301

Таким образом, показано, что внутрипористое реагирование приводит к существенному уменьшению периода индукции, времени горения, критического значения диаметра, ниже которого воспламенение газозвеси не происходит. Это объясняется увеличением суммарной плотности химического тепловыделения за счет дополнительного выделения тепла при протекании химических реакций в порах частиц. Установлено, что дополнительное тепловыделение в результате внутрипористого реагирования не приводит к существенному уве-

личению температуры горения (T_m) (рис 1 а, табл.). Это объясняется тем, что горение протекает во внешнем диффузионном режиме, в котором стефановское течение тормозит доступ кислорода к поверхности частицы и уменьшает внутреннюю энергию частицы.

Литература

1. Основы практической теории горения // Под. ред. Померанцева В.В. – Л.: Энергия, 1973. – 263 с.
2. Головина Е.С. Высокотемпературное горение и газификация углерода. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 173 с.
3. Виленский Т.В., Хзмалян Д.М. Динамика горения пылевидного топлива. – М.: Энергия, 1978. – 246 с.
4. Бабий В.И., Куваев Ю.Ф. Горение углеродной пыли и расчет пылеугольного факела. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 205 с.
5. Калинин В.В., Орловская С.Г., Гулеватая О.Н. Высокотемпературный теплообмен и самопроизвольное потухание пористой углеродной частицы в воздухе // Физика аэродисперсных систем. – 2002. – Вып. 39. – С. 138 – 146.
6. Калинин В.В., Орловская С.Г., Гулеватая О.Н. Высокотемпературный теплообмен нагреваемой лазерным излучением углеродной частицы с учетом стефановского течения на ее поверхности // Физика аэродисперсных систем -2001.- Вып.38. – С.158-169.
7. Калинин В.В., Орловская С.Г., Калинин А.И., Дубинский А.В. Теплообмен углеродной частицы с воздухом при учете стефановского течения и теплопотерь излучением // Теплофизика высоких температур. – 1996. – Т.34, №1. – С. 83 – 91.
8. Калинин В.В., Зуй О.Н., Орловская С.Г. Влияние температуры и диаметра пористых углеродных частиц на кинетику химических реакций и теплообмен с воздухом // Теплофизика высоких температур. – 2005. – Т.43, №5. – С.780 – 788.
9. Лисицын В.И., Руманов Э.Н., Хайкин Б.И. О периоде индукции при воспламенении совокупности частиц // Физика горения и взрыва. – 1971. – Т.7, №1. – С. 3 – 9.

С.Г. Орловська, В.В. Калінчак, О.М. Зуй, М.М. Чесноков

Тепломасообмін та кінетика хімічних перетворень монодисперсної газозависі поруватих вуглецевих часток з урахуванням стефанівської течії

АНОТАЦІЯ

Досліджені нестационарний тепломасообмін та кінетика хімічних перетворень монодисперсної газозависі поруватих вуглецевих часток з урахуванням стефанівської течії. Приведений аналіз впливу внутрішнього реагування на характеристики високотемпературної стадії (час горіння, максимальна температура частинок), період індукції та критичні параметри самовільного потухання частинок у газозависі (критичний діаметр та густину вуглецевої частинки).

S.G. Orlovskaya, V.V. Kalinchak, O.N. Zuj, M.N. Chesnokov

Heat- and mass- transfer and kinetics of chemical transformations of mono-disperse porous carbon particles gas mixture with account Stefan flow.

SUMMARY

Non – stationary heat- and mass- transfer at burning of porous carbon particles gas mixture was investigated. The ignition induction time, critical spontaneous extinction parameters and temperature of particles in carbon torch were analysed. Stefan flow was taken into consideration.