

В.В. Калинин, А.С. Черненко, К.И. Семенов

Украина, Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова

Высокотемпературный тепломассообмен и стефановское течение на поверхности окисляющейся стальной частицы

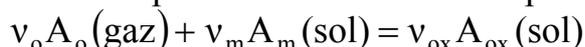
Показано, что влияние стефановского потока на тепломассообмен и кинетику окисления металлической частицы в холодном воздухе проявляется при начальных температурах частицы выше критического значения. Получены и исследованы профили концентраций газовых компонент вблизи частицы при различных температурах частицы и газа, диаметрах и относительных скоростях движения частицы.

В известных работах [1,2] было показано, что общим условием возникновения стефановского потока вблизи поверхности окисляющейся частицы является изменение массы газа в результате фазовых и химических гетерогенных процессов. В результате окисления металла стефановское течение направлено к поверхности частицы, в связи с тем, что окислитель (например, кислород), находящийся в газовой фазе, расходуется на реакцию окисления. В зависимости от температуры и диаметра частицы стефановское течение в разной степени увеличивает массоперенос кислорода к поверхности частицы и уменьшает теплоотдачу.

В работах [3-5] получены аналитические выражения для скорости стефановского течения, тепловых и массовых потоков при протекании на поверхности углеродных частиц параллельных и последовательных химических реакций. В этом случае стефановское течение направлено от поверхности частицы так, как на поверхности частицы образуются газообразные окислы углерода при постоянстве давления и равенстве суммы относительных концентраций газообразных компонент, окружающих частицу, единице.

В данной работе исследовано влияние стефановского потока на тепломассообмен и кинетику окисления металлической частицы с большой глубиной превращения; получены и исследованы профили концентраций газовых компонент воздуха вблизи частицы.

Пусть на поверхности металлической частицы (рис.1), движущейся в окислительной среде, протекает экзотермическая химическая реакция:



с образованием компактного оксидного слоя, обладающего хорошими защитными свойствами, для которого критерий Пиллинга-Бэдворса больше единицы.

Скорость гетерогенной химической реакции по окислителю определим как скорость изменения массы окислителя, рассчитанную на единицу реакционной поверхности.

Предполагая, что химическая реакция протекает на внешней поверхности оксидного слоя частицы (т.е. определяется диффузией ионов металла через оксидный слой), и что скорость химической реакции по окислителю прямо пропорциональна концентрации окислителя и обратно пропорциональна толщине оксидного слоя, получим:

$$W_o = -\frac{1}{\pi d^2} \frac{\partial m_o}{\partial t} = \frac{D_v}{h} \rho_{gs} C_s, \quad (1)$$

$$D_v = D_{v0} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad \rho_{gs} = \rho_{g0} \frac{T_0}{T},$$

где D_v – коэффициент диффузии ионов металла через оксидный слой, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ_{gs} – плотность газа (воздуха) на поверхности частицы, $\text{кг}/\text{м}^3$; h – толщина оксидного слоя, м ; d – диаметр частицы с окислом, м ; C_s – относительная массовая концентрация кислорода на поверхности частицы; E – энергия активации, $\text{Дж}/\text{моль}$; R – универсальная газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$; T – температура частицы, К ; T_{gs} – температура газа на поверхности частицы, К ; ρ_{g0} – плотность воздуха при температуре T_0 , $\text{кг}/\text{м}^3$.

Из уравнения химической реакции ясно, что массы прореагировавших и образовавшихся компонентов смеси строго связаны между собой. Следовательно, и между скоростями химической реакции по этим компонентам имеется связь:

$$W_o = W_m \frac{v_o M_o}{v_m M_m} \quad \text{и} \quad W_o = W_{ox} \frac{v_o M_o}{v_{ox} M_{ox}},$$

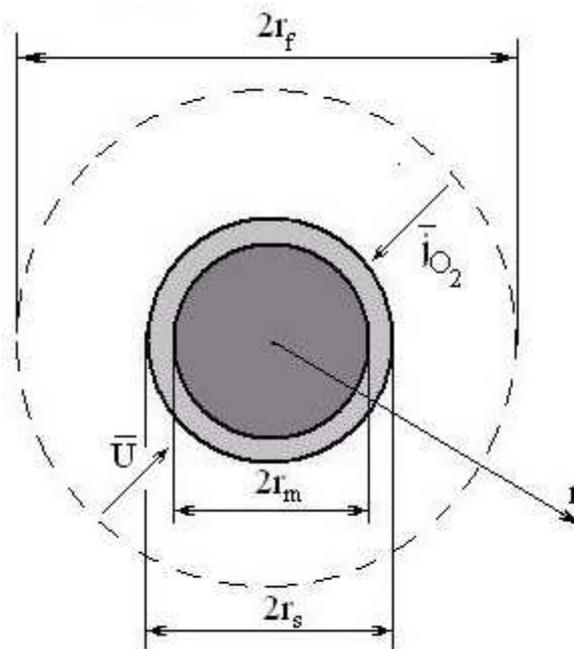


Рис. 1 Металлическая частица, покрытая слоем окисла, где $2r_s = 2r_m + 2h$, $2r_s = d$, $2r_m = d_m$

$$W_m = -\frac{\rho_m}{\pi d^2} \frac{\partial V_m}{\partial t} = \frac{v_m M_m}{v_o M_o} \frac{D_v}{h} \rho_{gs} C_s, \quad W_{ox} = \frac{\rho_{ox}}{\pi d^2} \frac{\partial V_{ox}}{\partial t} = \frac{v_{ox} M_{ox}}{v_o M_o} \frac{D_v}{h} \rho_{gs} C_s, \quad (2)$$

$$V_m = \frac{\pi d_m^3}{6}, \quad V_{ox} = \frac{\pi}{6} (d^3 - d_m^3).$$

Из (2) следует, что отношение объема образующегося окисла металла к объему металла, израсходованного на образование окисла, равно известному критерию Пиллинга-Бедворса:

$$-\frac{\partial V_{ox}}{\partial V_m} = \frac{v_{ox} M_{ox} \rho_m}{v_m M_m \rho_{ox}} = P_b. \quad (3)$$

Здесь A_o , A_m , A_{ox} – окислитель, металл и окисел соответственно; W_m , W_{ox} – скорости химической реакции по металлу и оксиду; v_o , v_m , v_{ox} – стехиометрические коэффициенты; M_o , M_m , M_{ox} – молярные массы окислителя, металла и соединения оксидного слоя, кг/моль; m_m , m_{ox} , m_o – массы металла, оксида, окислителя, кг, ρ_m , ρ_{ox} – плотности металла и оксида, кг/м³.

Из (2) следуют следующие уравнения для скоростей изменения со временем диаметра металлического ядра:

$$\frac{\partial d_m}{\partial t} = -2\Omega_m \frac{\rho_{gs}}{\rho_m} \frac{D_v}{h} \frac{d^2}{(d-2h)^2} C_s, \quad d_m(t=0) = d_b - 2h_b \quad (4)$$

толщины оксидного слоя

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \Omega_m \left(P_b - 1 + \frac{d^2}{(d-2h)^2} \right) \frac{\rho_{gs}}{\rho_m} \frac{D_v}{h} C_s, \quad h(t=0) = h_b. \quad (5)$$

диаметра всей частицы

$$\frac{\partial d}{\partial t} = 2\Omega_m (P_b - 1) \frac{\rho_{gs}}{\rho_m} \frac{D_v}{h} C_s, \quad d(t=0) = d_b. \quad (6)$$

Здесь $\Omega_m = \frac{v_m M_m}{v_o M_o}$ – массовый коэффициент; d_b , h_b – начальные диаметр

частицы и толщина окисла.

Концентрация окислителя на поверхности частицы C_s определяется плотностью массового потока окислителя на поверхности частицы. Стефановский поток в данном случае уменьшает диффузионное сопротивление. Влияние естественной и вынужденной конвекции на тепловые и массовые потоки в системе учитывается приведенной пленкой, толщина которой уменьшается с ростом относительной скорости движения

$$r_f = r_s (1 - 2/Nu)^{-1},$$

где критерий Нуссельта Nu является функцией от чисел Прандтля Pr и Рейнольдса Re :

$$Nu = 2 + 0.6 Re^{1/2} Pr^{1/3},$$

$$Re = \frac{\omega d}{v_g}, \quad v_g = \frac{\lambda_g}{c_g \rho_g} Pr, \quad c_g = c_{g0} + 0.18(T_* - T_0),$$

$$\rho_g = \rho_{g0} \frac{T_0}{T_*}, \quad \lambda_g = \lambda_{g0} \left(\frac{T_*}{T} \right)^n, \quad D_g = \frac{\lambda_g}{c_g \rho_g}, \quad T_* = \frac{T_{gs} + T_{g\infty}}{2},$$

ω – относительная скорость движения, м/с; ν_g – кинематическая вязкость окружающей среды, м²/с; c_g – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К), ρ_g , λ_g , D_g – плотность, коэффициенты теплопроводности газа и диффузии окислителя в газе; ρ_{g0} , λ_{g0} , c_{g0} – соответствующие величины, взятые при температуре T_0 ; T_* – характерная температура, при которой определяются свойства газа.

Для нахождения профилей концентрации окислителя, температуры газа вблизи частицы, плотностей массовых потоков газообразных компонент и плотности теплового потока на поверхности частицы необходимо решить уравнения диффузии и теплопроводности для газовой фазы:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D \rho_g \frac{\partial C_i}{\partial r} \right) = - \frac{\partial}{\partial r} (r^2 C_i U \rho_g), \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_g r^2 \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) = - \frac{\partial}{\partial r} (r^2 U \rho_g c_g T_g), \quad (8)$$

с граничными условиями на поверхности частицы ($r = r_s$) и на границе приведенной пленки ($r = r_f$), где свойства среды такие, как и на бесконечном удалении от частицы:

$$C_i(r = r_s) = C_{is}, \quad C_i(r = r_f) = C_{i\infty}; \\ T_g(r = r_s) = T_{gs}, \quad T_g(r = r_f) = T_{g\infty}.$$

Любой газообразный компонент газа переносится к поверхности частицы за счет концентрационной диффузии и стефановского течения:

$$\vec{j}_{is} = -D_i \rho_{gs} \text{grad} C_i \Big|_s + \rho_{gs} \vec{U}_s C_{is},$$

где j_{is} – массовый поток i – го компонента, кг/(м²с).

Предположим, что окислительной средой является воздух и, следовательно, ее можно рассматривать как смесь двух газов: азота и кислорода, коэффициенты диффузии которых практически равны ($D_{O_2} = D_{N_2} = D_g$).

Исчезновение газовых масс в результате химической реакции на поверхности металлической частицы является причиной возникновения стефановского течения, направленного к поверхности частицы. Скорость стефановского течения такова, что в любой точке газообразной среды общее давление и концентрация остаются постоянными:

$$p = \sum p_i = \text{const} \quad \text{и} \quad \sum C_i = 1. \quad (9)$$

Общая плотность массового потока азота на поверхности частицы равна нулю, т.к на поверхности не образуются азотосодержащие соединения:

$$j_{N_2s} = -D_g \rho_{gs} \frac{\partial C_{N_2}}{\partial r} \Big|_s - \rho_{gs} U_s C_{N_2s} = 0. \quad (10)$$

Поверхностная концентрация кислорода определяется дополнительно кинетической химической реакции и поток окислителя к поверхности частицы равен массовой скорости его потребления в химической реакции:

$$j_{O_2s} = D_g \rho_{gs} \left. \frac{\partial C_{O_2}}{\partial r} \right|_s + \rho_{gs} U_s C_{O_2s} = \frac{D_v}{h} \rho_{gs} C_{O_2s} = W_o, \quad (11)$$

Используя (9) поочередно к уравнению диффузии (7) и выражениям (10), (11) нетрудно получить, уравнение неразрывности для газовой фазы:

$$\frac{\partial}{\partial r} (r^2 U \rho_g) = 0 \quad \text{или} \quad r^2 U \rho_g = r_s^2 U_s \rho_{gs}$$

и выражение для скорости стефановского течения на поверхности частицы:

$$U_s = \frac{D_v}{h} C_{O_2s}. \quad (12)$$

Для решения уравнений диффузии и теплопроводности для газовой фазы (7) и (8) введем следующие безразмерные величины

$$\xi = \frac{U_s r_s \rho_{gs}}{D_g \rho_g} \left(1 - \frac{r_s}{r} \right), \quad \theta = \frac{T_g - T_{gs}}{T_{g\infty} - T_{gs}}, \quad \tilde{C}_i = \frac{C_i - C_{is}}{C_{i\infty} - C_{is}}.$$

Тогда $\xi_f = \xi(r = r_f) = \frac{U_s \rho_{gs}}{\beta \rho_g}$ есть не что иное, как безразмерная скорость стефановского течения. Здесь коэффициент массообмена $\beta = \frac{D_g Nu}{2r_s}$.

При замене переменных следует обратить внимание на то, что

$$\frac{\partial C_i}{\partial r} = \frac{\partial C_i}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial r} = \xi_f \frac{Nu r_s}{2 r^2} \frac{\partial C_i}{\partial \xi}.$$

Тогда уравнения диффузии (7) и теплопроводности (8) для газовой среды можно представить в виде

$$\frac{\partial^2 T_g}{\partial \xi^2} = \frac{\partial T_g}{\partial \xi} \quad \text{и} \quad \frac{\partial^2 C_i}{\partial \xi^2} = \frac{\partial C_i}{\partial \xi}$$

с граничными условиями

$$C_i(\xi = \xi_s) = C_{is}, \quad C_i(\xi = \xi_f) = C_{i\infty};$$

где $\xi_s = \xi(r = r_s) = 0$.

Решение полученного уравнения диффузии:

$$C_i = a + b \cdot \exp(-\xi),$$

где a и b – постоянные, которые нетрудно определить, применяя граничные условия:

$$a = \frac{C_{i\infty} - C_{is} \exp(-\xi_f)}{1 - \exp(-\xi_f)}, \quad b = \frac{C_{is} - C_{i\infty}}{1 - \exp(-\xi_f)}.$$

В результате концентрация i -го компонента вдоль приведенной пленки определяется выражением

$$\tilde{C}_i = \frac{C_i - C_{is}}{C_{i\infty} - C_{is}} = \frac{1 - \exp(-\xi)}{1 - \exp(-\xi_f)}. \quad (13)$$

Выражение для плотности массового потока азота на поверхности частицы с учетом (13) представится в виде:

$$j_{N_2s} = \beta \rho_g \xi_f \frac{C_{N_2s} \exp(-\xi_f) - C_{N_2\infty}}{1 - \exp(-\xi_f)}. \quad (14)$$

Так, как общая плотность массового потока азота (14) равна нулю, то концентрация азота на поверхности частицы

$$C_{N_2s} = C_{N_2\infty} \exp(\xi_f). \quad (15)$$

Концентрация окислителя (кислорода) на поверхности частицы, применяя (11), найдется из уравнения:

$$\beta \rho_g \xi_f \frac{C_{O_2\infty} - C_{O_2s} \exp(-\xi_f)}{1 - \exp(-\xi_f)} = \frac{D_v}{h} \rho_{gs} C_{O_2s} = U_s \rho_{gs}$$

$$\text{или} \quad C_{O_2\infty} - C_{O_2s} \exp(-\xi_f) = 1 - \exp(-\xi_f), \quad C_{O_2s} = 1 - (1 - C_{O_2\infty}) \exp(\xi_f) \quad (16)$$

Для $\xi_f \ll 1$ (обычно выполняется) примем, что $\exp(-\xi_f) \approx 1 - \xi_f$. Тогда

$$C_{O_2s} = C_{O_2\infty} \frac{\beta \rho_g}{\beta \rho_g + \left(\frac{D_v}{h} - U_{s,k} \right) \rho_{gs}},$$

где $U_{sk} = \frac{D_v}{h} C_{O_2\infty}$ – скорость стефановского течения на поверхности частицы при кинетическом режиме окисления.

Аналогично с выражением (13) найдем, что температура газа вдоль приведенной пленки изменяется согласно соотношению

$$\theta = \frac{T_g - T_{gs}}{T_{g\infty} - T_{gs}} = \frac{1 - \exp(-\xi)}{1 - \exp(-\xi_f)}.$$

Определим плотность теплового потока на поверхности частицы, который характеризует теплообмен с газом

$$q_{gst} = -\lambda_g \left. \frac{\partial T_g}{\partial r} \right|_s - c_g \rho_{gs} U_s T_{gs},$$

и, используя (14),

$$q_{gst} = \alpha \xi_s \left(\frac{T_{gs} - T_{g\infty}}{1 - e^{-\xi_s}} - T_{gs} \right),$$

где $\alpha = \beta c_g \rho_g = \frac{\lambda_g \text{Nu}}{2r_s}$ – коэффициент теплообмена частицы с газовой средой.

Для случая малости безразмерной скорости стефановского потока $\xi_f \ll 1$, разложим экспоненту в ряд Маклорена $\exp(-\xi_f) = 1 - \xi_f + \frac{\xi_f^2}{2} + \dots$ и подставим в предыдущее выражение. Ограничившись только линейным членом разложения,

тепловой поток на поверхности частицы с учетом стефановского течения приближенно можно описать выражением:

$$q_{g,st} = \alpha \left(T_{gs} - T_{g\infty} - \frac{\xi_f}{2} (T_{gs} + T_{g\infty}) \right).$$

Предполагая, что на поверхности частицы ее температура равна температуре газа ($T = T_{gs}$), дифференциальное уравнение временной зависимости температуры частицы представим в виде:

$$\frac{d}{dt} \left(c_m \rho_m \left(1 - \frac{2h}{d} \right)^3 + c_{ox} \rho_{ox} \left[1 - \left(1 - \frac{2h}{d} \right)^3 \right] \right) \frac{\partial T}{\partial t} = q_{eff}, \quad T(t=0) = T_b, \quad (17)$$

$$q_{eff} = q_{ch} - q_{g,st} - q_w,$$

где T_b – начальная температура частицы, К; q_{ch} – плотность мощности химического тепловыделения, Вт/м², $q_{g,st}$, q_w – плотности потока теплообмена с газом и со стенками излучением, Вт/м²; c_m , c_{ox} – удельные теплоемкости металла и оксида, Дж/(кг·К). Уравнение (17) записано в предположении отсутствия градиента температуры по частице, т. к. коэффициент теплопроводности частицы значительно больше коэффициента теплопроводности воздуха ($Bi \ll 1$).

Теплопотери частицы излучением определяется законами Стефана-Больцмана и Кирхгофа:

$$q_w = \varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4),$$

где ε – коэффициент черноты частицы, покрытой окислом; σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴); T_w – температура стенок реакционной установки, К.

Плотность мощности химического тепловыделения реакции окисления на поверхности частицы, используя (1), определим как:

$$q_{ch} = Q_o W_o = Q_o \frac{D_v}{h} \rho_{gs} C_s,$$

Q_o – тепловой эффект реакции, рассчитанный на единицу массы окислителя, Дж/кгО₂.

Поверхностная концентрация кислорода C_s при протекании реакции в диффузионном режиме зависит от относительной скорости движения частицы. В случае падения в воздухе металлической частицы ее скорость движения относительно окружающей среды может быть найдена из уравнения движения (сила Архимеда пренебрежимо мала):

$$m \frac{d\omega}{dt} = F_g - F_r,$$

или

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = g - \frac{3}{4} \Psi \frac{\rho_g d^2 \omega^2}{\rho_m d_m^3 + \rho_{ox} (d^3 - d_m^3)}, \quad (18)$$

$$\omega(t=0) = \omega_b,$$

где F_g, F_r – соответственно силы тяжести и трения; m – масса частицы; ω_b – начальная скорость частицы; коэффициент лобового сопротивления частицы Ψ зависит от Рейнольдса и в интервале $1 < Re < 400$ определяется по формуле Клячко:

$$\Psi = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re}}.$$

Анализ полученных данных.

Уравнения (4) – (6), (17), (18) позволяют проанализировать влияние стефановского течения на тепломассообмен и кинетику окисления металлической частицы при её падении в холодном воздухе (рис. 2).

В качестве предмета исследования выбраны частицы железа, реагирующие с кислородом воздуха согласно уравнению $2Fe + O_2 \rightarrow 2FeO$. При расчетах использовались следующие данные: $E = 124234$ Дж/моль, $D_{v0} = 0.118$ м²/с, $Q = 16.5 \cdot 10^6$ Дж/кгO₂, $\varepsilon = 0.89$, $c_m = 448$ Дж/кг·К, $\rho_m = 7874$ кг/м³, $c_{ox} = 695$ Дж/кг·К, $\rho_{ox} = 5700$ кг/м³, $\lambda_{g0} = 0.0244$ Вт/(м·К), $\rho_{g0} = 1.293$ кг/м³, $c_{g0} = 1005$ Дж/(кг·К), $T_0 = 273.15$ К, $C_a = 0.23$, $Pr = 0.7$.

При начальной температуре частицы больше критического значения ее температура сначала увеличивается и достигает максимального значения (рис.2а). На этой стадии скорость роста оксидной пленки значительна, что и есть характеристикой стадии горения. Приблизительно окончание этой стадии и начало потухания можно охарактеризовать условием минимума на временной производной температуры частицы:

$$q_{eff} < 0, q'_{eff t} = 0, q''_{eff tt} > 0. \quad (19)$$

Именно при выполнении условия (19) происходит смена темпа окисления с быстрого на медленный, что и является признаком потухания (т. е). На первой стадии (высокотемпературной стадии) скорость роста оксидного слоя на два порядка выше, чем на второй. Толщина оксидного слоя практически линейно растет со временем, и химическая реакция определяется диффузией кислорода и в газовой фазе и в оксидной пленке ($Se \approx 1$). Максимальная температура окисления T_m (т. м) является характерной температурой первой стадии, длительность которой (время горения t_e) рассчитывается до т. е. На второй стадии окисляющаяся частица переходит в квазистационарный режим, окисление протекает в кинетической области и толщина оксидного слоя медленно растет по параболическому закону. Причем этот рост при небольших временах наблюдения настолько мал, что можно считать, что толщина оксидного слоя при потухании h_e есть установившаяся толщина на втором этапе окисления металлической частицы.

При начальной температуре частицы меньше некоторого критического значения ее температура монотонно уменьшается, и частица ведет себя практически как инертная ($dh/dt \rightarrow 0$, $Se \rightarrow 0$).

Проанализируем роль стефановского течения при тепломассообмене металлической частицы с холодным газом. Так, как на поверхности частицы только

кислород расходуется в химической реакции, то стефановское течение направлено к частице. Оно способствует подходу кислорода из газа к поверхности частицы, тем самым поддерживает химическую реакцию и увеличивает тепловыделение. С другой стороны газовые массы, находящиеся недалеко от поверхности частицы и прогреваемые за счет теплообмена с нагретой частицей, стефановским течением относятся назад к поверхности частицы. Тем самым вблизи поверхности частицы в газовой фазе градиент температуры и, соответ-

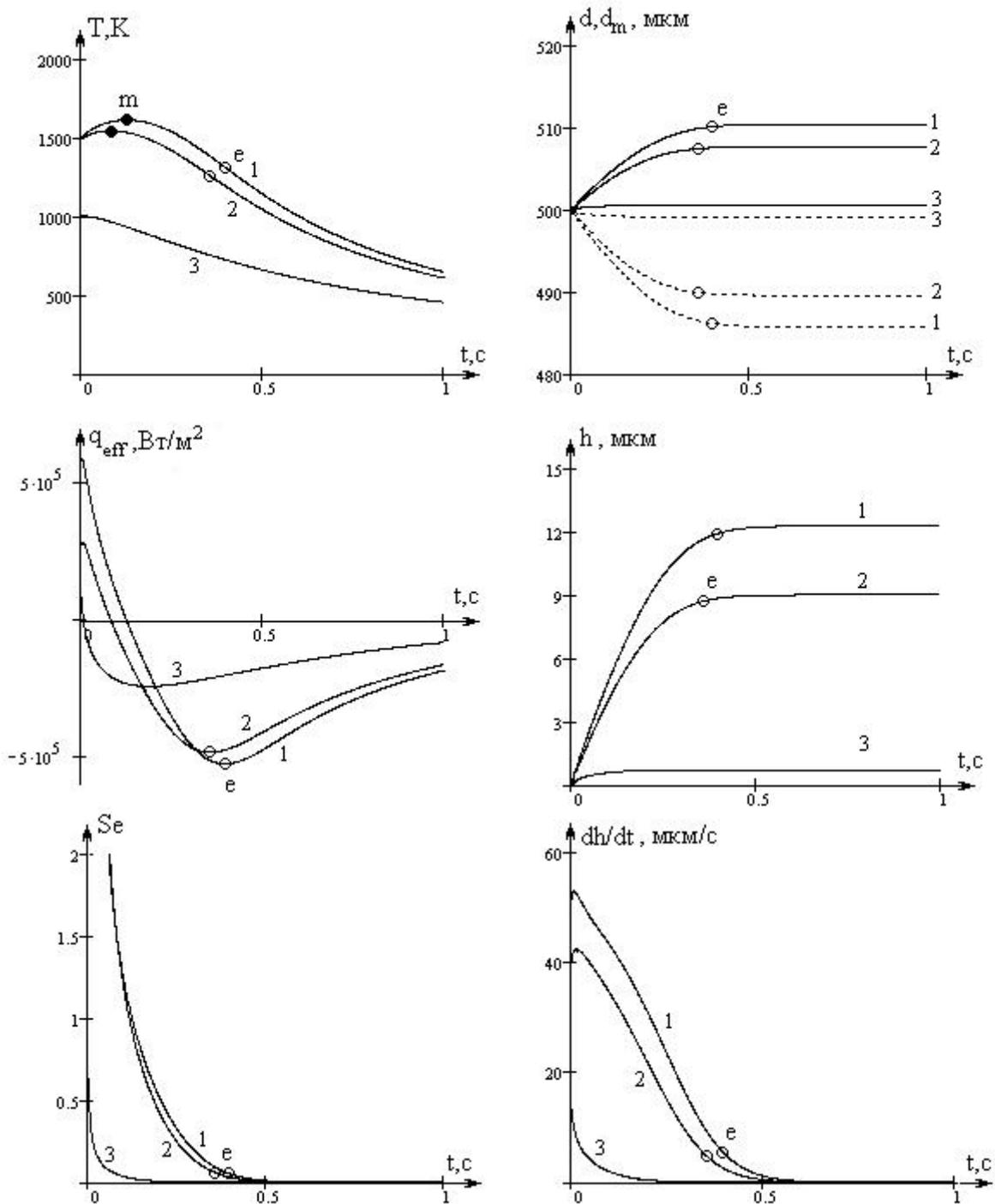


Рис.2 Временные зависимости $T, d, d_m, h, q_{\text{eff}}, Se, dh/dt$ для движущейся частицы железа $d_b = 500 \mu\text{м}$, $h_b = 0.1 \mu\text{м}$, $\omega_b = 0 \text{ м/с}$, $T_g = T_w = 293 \text{ К}$.
 1 – $T_b = 1500 \text{ К}$, $U_{\text{st}} \neq 0$, 2 – $T_b = 1500 \text{ К}$, $U_{\text{st}} = 0$, 3 – $T_b = 1000 \text{ К}$.

ственно, теплообмен частицы с газом становится меньше. Таким образом, стефановское течение способствует увеличению максимальной температуры горения (см. табл.). При этом сравнительное возрастание температуры влечет за собой более интенсивное оксидообразование, тепловыделение. Время горения возрастает, и потухание происходит при большей толщине оксидного слоя h_e . Чем меньше начальная температура частицы, тем меньше стефановское течение оказывает влияние на тепломассообмен частицы с холодным газом. С ростом начального диаметра частицы химическое тепловыделение и теплопотери из-за теплообмена с газом уменьшаются, что и сказывается на понижении температуры горения и скорости окисления dh/dt . Последнее приводит к возрастанию времени горения и понижению толщины оксида после потухания.

Следует обратить внимание на то, что в высокотемпературной стадии на скорость химической реакции оказывает влияние диффузия кислорода в газовой фазе ($Se_m > 0.1$), а после потухания – окисление лимитируется диффузией металла через слой оксида ($Se_e < 0.1$).

Таблица. Влияние стефановского течения на характеристики высокотемпературного тепломассообмена металлической частицы.

$T_g=T_w=293K, T_b=1500K$							
	$d_b, \text{мкм}$	T_m, K	$t_m, \text{с}$	Se_m	$h_e, \text{мкм}$	$t_e, \text{с}$	Se_e
$U_{st} \neq 0$	100	2208	0.039	1.65	15.75	0.085	0.11
	500	1612	0.125	0.98	11.97	0.395	0.05
$U_{st} = 0$	100	1737	0.021	1.12	5.65	0.054	0.08
	500	1542	0.082	1.47	8.74	0.354	0.06
$T_g=T_w=293K, T_b=1200K$							
	$d_b, \text{мкм}$	T_m, K	$t_m, \text{с}$	Se_m	$h_e, \text{мкм}$	$t_e, \text{с}$	Se_e
$U_{st} \neq 0$	100	1246	0.006	0.30	1.01	0.024	0.03
	500	1229	0.046	0.41	2.89	0.253	0.02
$U_{st} = 0$	100	1226	0.004	0.43	0.85	0.022	0.034
	500	1218	0.037	0.59	2.59	0.245	0.025

Значительный вклад стефановское течение оказывает только на высокотемпературной стадии, где $\xi_s > 0.01$. После потухания (t_e) температура частицы невысока так, что $\xi_s \sim \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \approx 0$ и стефановское течение практически не влияет на тепломассообмен частицы с холодным газом.

Из литературных данных [6] известно, что температуры, до которых разогреваются фрикционные искры, предварительно нагретые выше 970 К, с характерными размерами 100 ÷ 500 мкм достигают 1812К, что вполне согласуется с результатами моделирования. Учет стефановского течения приводит к завышенным значениям максимальных температур.

Рассмотрим профили концентраций кислорода и азота вблизи поверхности окисляющейся металлической частицы (13), (15), (16). Вид профиля зависит от двух величин: безразмерной скорости стефановского потока ξ_s и отношения радиусов частицы и приведенной пленки $\frac{r_f}{r_s}$, которые зависят от температуры частицы и относительной скорости движения для данного размера частицы (рис. 3).

Как было показано, концентрация любого газового компонента на поверхности частицы зависит от величины ξ_s , которая является положительной величиной:

$$C_{N_2,s} = C_{N_2,\infty} e^{\xi_s}, \quad C_{O_2,s} = 1 - (1 - C_{O_2,\infty}) e^{\xi_s}.$$

При низких температурах величина ξ_s мала, концентрации компонент газовой среды вблизи поверхности близки к соответствующим значениям на гра-

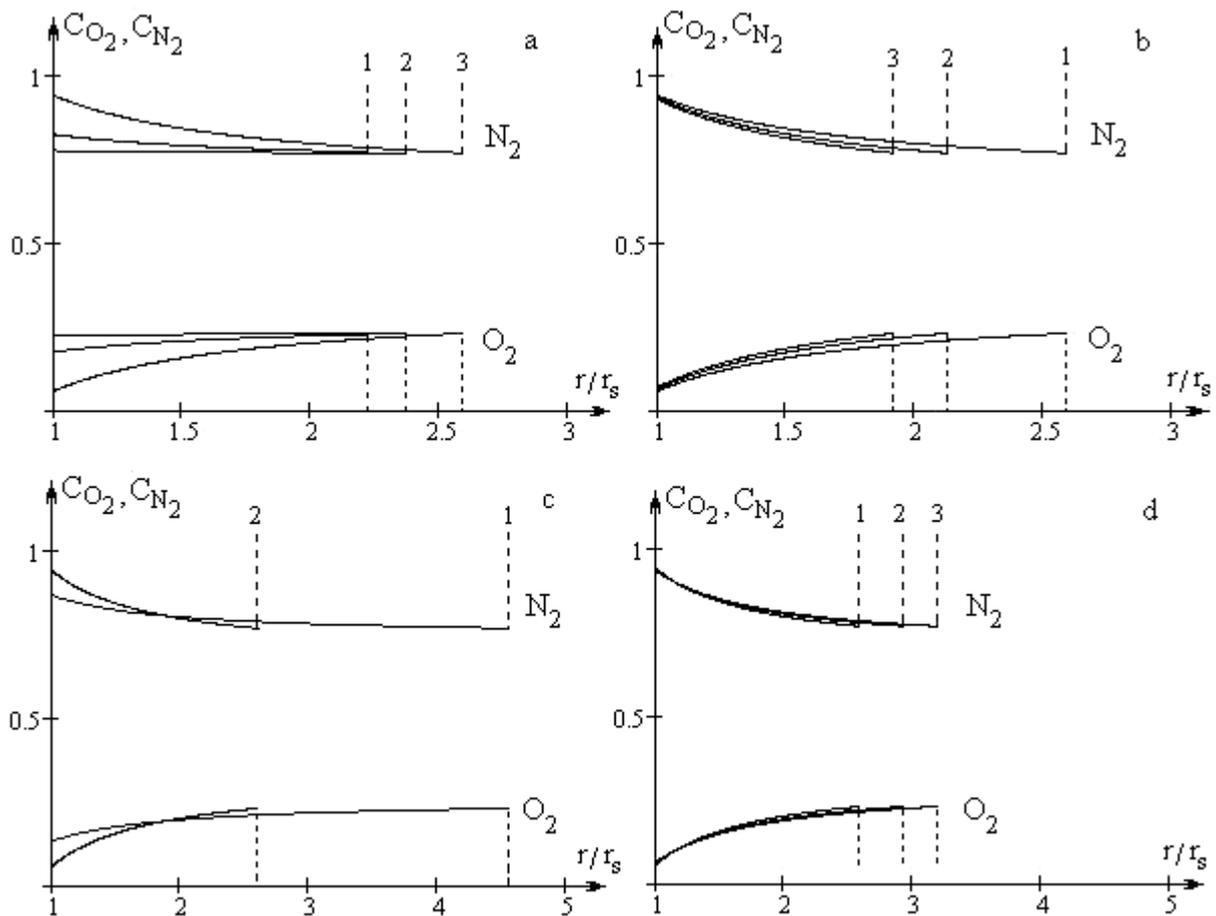


Рис.3. Профили концентрации компонент газовой среды в зависимости от температуры частицы (а), скорости относительного движения частицы (б), диаметра частицы (с), температуры газа (д) при $h_b = 1\text{мкм}$, $C_{O_2} = 0.23$, $C_{N_2} = 0.77$:

а) $d_b = 500\text{мкм}$, $\omega_b = 1\text{ м/с}$, $T_g = T_w = 293\text{ К}$, $T_1 = 1000\text{К}$, $T_2 = 1200\text{К}$, $T_3 = 1500\text{К}$;

б) $d_b = 500\text{мкм}$, $T_g = T_w = 293\text{ К}$, $T = 1500\text{К}$, $\omega_1 = 1\text{ м/с}$, $\omega_2 = 2\text{ м/с}$, $\omega_3 = 3\text{ м/с}$;

с) $\omega_b = 1\text{ м/с}$, $T_g = T_w = 293\text{ К}$, $T = 1500\text{К}$, $d_1 = 100\text{ мкм}$, $d_2 = 500\text{ мкм}$;

д) $d_b = 500\text{мкм}$, $\omega_b = 1\text{ м/с}$, $T = 1500\text{К}$, $T_{\sigma 1} = T_{w1} = 293\text{ К}$, $T_{\sigma 2} = T_{w2} = 800\text{ К}$, $T_{\sigma 3} = T_{w3} = 1200$

нице приведенной пленки, согласно (15) и (16). Следовательно, химическая реакция протекает в кинетической области. С увеличением температуры частицы безразмерная скорость стефановского течения возрастает и концентрация кислорода за счет химической реакции на поверхности уменьшается (рис. 3а). Диффузионно-кинетическое отношение приближается к единице. С увеличением температуры частицы радиус приведенной пленки возрастает практически по линейному закону.

Скорость относительного движения в газовой среде, также как и температура газовой среды, практически не сказывается на значениях концентраций компонент газовой среды на поверхности частицы (рис. 3b, d). С ростом скорости частицы критерий Нуссельта возрастает и радиус приведенной пленки, естественно, уменьшается. При большей температуре газа увеличивается интенсивность теплообмена, задействуя большую область газа вокруг частицы. И, следовательно, радиус приведенной пленки с ростом температуры газа возрастает.

Рост начального диаметра частицы увеличивает разность между концентрациями компонент на поверхности и вдали от частицы и химическая реакция все более начинает лимитироваться диффузией кислорода в газовой среде (рис. 3с).

Таким образом, в результате проделанной работы установлено, что влияние стефановского потока на теплообмен и кинетику окисления металлической частицы в холодном воздухе проявляется при начальных температурах частицы выше критического значения, когда происходит переход на высокотемпературный режим окисления. Получены и исследованы профили концентраций газовых компонент вблизи частицы.

Литература

1. Блошенко В.Н., Хайкин Б.И. О стефановском потоке при гетерогенных химических реакциях // Журнал физической химии. – 1967. – Т.41, № 12. – С. 3010 – 3016.
2. Франк - Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1987. – 491 с.
3. Калинин В.В., Орловская С.Г., Калинин А.И., Дубинский А.И. Влияние стефановского потока на характеристики гетерогенного горения углеродной частицы в воздухе // Инженерно-физический журнал. – 1997. – Т.70, №1. – С.146 – 152
4. Калинин В.В. влияние стефановского течения и конвекции на кинетику химических реакций и теплообмена углеродных частиц с газами. // Инженерно-физический журнал. – 2001. – Т.74, №2. – С.51-55.
5. 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.

6. Леонова Л.Ю., Курятников В.В., Спиридонов Я.Н. Определение температуры и кинетических характеристик частиц стали диспергированной фрикционным способом.// Физика аэродисперсных систем. – 1981. – Вып.21.– С.80-84.

V.V. Kalinchak, O.S. Chernenko, K.I. Semenov

Високотемпературний тепломасообмін і стефанівська течія на поверхні окислюємої сталеві частинки

Показано, що вплив стефанівської течії на тепломасообмін і кінетику окислення металеві частинки в холодному повітрі проявляється при початкових температурах частинки вищих за критичне значення. Отримані і досліджені профілі концентрацій газових компонент поблизу частинки при різних температурах та розмірах сталеві частинки.

V.V. Kalinchak, A.S. Chernenko, K.I. Semenov

High temperature heat and mass transfer and Stefan flow on the surface of oxidizing metal particle

It was shown that Stefan flow affected heat and mass transfer and metal particle kinetics oxidation at temperatures exceeding some critical value. Gaseous components profiles nearby steel particle were got and analyzed for different diameters and initial temperatures.