

## ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ЗАЖИГАНИЯ, ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ И САМОПРОИЗВОЛЬНОГО ПОГАСАНИЯ ЧАСТИЦЫ ЖЕЛЕЗА В ВОЗДУХЕ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

*Калинчак В.В., Черненко А.С., Шанюк С.А.*

*Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова,*

*Селиванов С.Е.*

*Херсонская государственная морская академия,*

*Калинчак А.И.*

*Одесская государственная академия холода*

*В работе проведен анализ влияния начальной температуры на критические условия зажигания, характеристики горения и самопроизвольного погасания накаливаемой металлической частицы в воздухе комнатной температуры. Впервые получено выражение для массовой скорости стефановского потока вследствие последовательного образования на поверхности частицы плотного и пористого окислов. Выявлена роль стефановского потока, теплопотерь на излучение, диффузионного сопротивления в процессах зажигания, горения и самопроизвольного погасания металлических частиц.*

*Ключевые слова: зажигание, горение, погасание, металлическая частица, стефановский поток.*

**Постановка проблемы.** Актуальной задачей является обеспечение безопасности перевозки лёгковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ) на судах морского и речного транспорта.

Раскаленные металлические частицы, фрикционные искры, движущиеся в смесях воздуха и паров ЛВЖ (химически-реагирующая смесь), представляют собой пожарную опасность. Для оценки пожарной опасности используют критическое условие зажигания Зельдовича и соотношение между временем высокотемпературной жизни металлической частицы и временем зажигания паров ЛВЖ. Зажигание смеси произойдет лишь в том случае, когда время «высокотемпературной жизни» раскаленных частиц превышает время зажигания химически-реагирующей смеси.

**Цель данной работы** – провести анализ влияния начальной температуры частицы на критический диаметр зажигания, характеристики горения и самопроизвольного погасания металлических частиц в воздухе комнатной температуры с учетом стефановского течения и теплопотерь на излучение.

**Степень изученности проблемы.** В литературе ранее учитывалось лишь образование только плотного оксида на поверхности частицы железа [1]. Также следует отметить, что многие авторы пренебрегают теплопотерями на излучение, что приводит к завышенным значениям температур горения и временам высокотемпературной жизни накаливаемых частиц [2].

Малоизученными являются вопросы о механизме одновременного возникновения плотного и пористого окислов, роли теплопотерь на излучение, стефановского течения и диффузионного сопротивления в процессах зажигания, горения и самопроизвольного погасания накаливаемых частиц железа, попадающих в холодную газообразную окислительную среду.

В данной работе, на примере стальной частицы, эти недочёты устраняются.

**Постановка задачи и изложение основного материала.** Допустим, что в случае окисления металлической частицы образуются плотный и пористый оксиды. Формально уравнения химических реакций образования плотного оксида и последующего доокисления до пористого оксида представим в виде:

$$v_{m1}A_m(solid) + v_{o1}A_o(gaz) = \eta_{ox1}B_{ox1}(solid), \quad (I)$$

$$v_{ox1}B_{ox1}(solid) + v_{o2}A_o(gaz) = \eta_{ox2}B_{ox2}(solid), \quad (II)$$

где  $v$  и  $\eta$  – стехиометрические коэффициенты в уравнениях реакций при металле  $A_m$ , окислителе  $A_o$  и оксидах  $B_{ox1}$ ,  $B_{ox2}$ .

В этом случае скорость окисления металлической частицы по окислителю  $W_o$  равна сумме скоростей образования плотного  $W_{o1}$  и пористого оксидов  $W_{o2}$ :

$$W_o = -\frac{1}{S} \frac{\partial m_o}{\partial t} = W_{o1} + W_{o2}. \quad (1)$$

Здесь  $m_o$  – масса окислителя,  $S = 4\pi r_s^2$  – площадь поверхности частицы,  $r_s$  – радиус частицы, м.

Каждая из этих скоростей пропорциональна поверхностной концентрации кислорода:

$$W_{o1} = k_1 \rho_{gs} C_{O_2s}, \quad W_{o2} = k_2 \rho_{gs} C_{O_2s},$$

где

$$k_1 = \frac{D_v}{h_1} = \frac{D_{v0}}{h_1} \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), \quad k_2 = k_{20} \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right),$$

$k_1, k_2$  – константы химических реакций образования окислов, м/с;  $C_{O_2\infty}$  – относительная массовая концентрация кислорода в воздухе;  $E_1, E_2$  – энергии активации последовательных реакций, Дж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $D_v$  – коэффициент внутренней диффузии активного компонента через плотный окисел, м<sup>2</sup>/с;  $\rho_{gs}$  – плотность воздуха вблизи поверхности частицы, кг/м<sup>3</sup>,  $T$  – температура частицы, К.

На основе стехиометрических уравнений (I) и (II) выразим скорость уменьшения объема металлической частицы  $W_m$ :

$$W_m = -\frac{\rho_m}{S} \frac{\partial V_m}{\partial t} = \frac{v_{m1}M_m}{v_{o1}M_o} W_{o1}, \quad V_m = \frac{4\pi r_m^3}{3},$$

где  $V_m$  – объем металлического ядра, м<sup>3</sup>;  $\rho_m$  – плотность металла, кг/м<sup>3</sup>;  $M_m, M_o$  – молярные массы металла и окислителя, кг/моль,  $r_m$  – радиус металлического ядра, м.

Таким образом, исходя из закона сохранения массы, уменьшение размера металлического ядра определяется дифференциальным уравнением:

$$-\frac{\partial r_m}{\partial t} = \frac{v_{m1}M_m}{v_{o1}M_o} \frac{\rho_{gs}}{\rho_m} k_1 C_{O_2s}, \quad r_m(t=0) = r_{mb}, \quad (2)$$

Скорость увеличения объема плотного оксида определяется конкуренцией реакции окисления (I) и реакции окисления (II):

$$W_{ox1} = W_{o1} \frac{\eta_{ox1}M_{ox1}}{v_{o1}M_o} - W_{o2} \frac{v_{ox1}M_{ox1}}{v_{o2}M_o} = \frac{\rho_{ox1}}{S} \frac{\partial V_{ox1}}{\partial t}, \quad V_{ox1} \approx 4\pi r_s^2 h_1.$$

Здесь  $V_{ox1}$ ,  $\rho_{ox1}$ ,  $M_{ox1}$ ,  $h_1$  – объем, плотность, молярная масса и толщина слоя

плотного окисла, соответственно.

Следовательно, толщина плотного окисла увеличивается согласно уравнению

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} = \left( \frac{\eta_{ox1} M_{ox1}}{\nu_{o1} M_o} k_1 - \frac{\nu_{ox1} M_{ox1}}{\nu_{o2} M_o} k_2 \right) \frac{\rho_{gs}}{\rho_{ox1}} C_{O_2s}, \quad h_1(t=0) = h_{b1}, \quad (3)$$

Аналогично, скорость увеличения объема пористого оксида определяется скоростью доокисления плотного окисла:

$$W_{ox2} = W_{o2} \frac{\eta_{ox2} M_{ox2}}{\nu_{o2} M_o} = \frac{\rho_{ox2}}{S} \frac{\partial V_{ox2}}{\partial t}, \quad V_{ox2} \approx 4\pi r_s^2 h_2.$$

Здесь  $V_{ox2}$ ,  $\rho_{ox2}$ ,  $M_{ox2}$ ,  $h_2$  – объем, плотность, молярная масса и толщина слоя пористого окисла, соответственно.

Откуда скорость нарастания пористого магнетита описывается как

$$\frac{\partial h_2}{\partial t} = \frac{\eta_{ox2} M_{ox2}}{\nu_{o2} M_o} \frac{\rho_{gs}}{\rho_{ox2}} k_2 C_{O_2s}, \quad h_2(t=0) = h_{b2} \quad (4)$$

При этом сохраняется связь между текущими значениями радиуса и диаметра металлического ядра, толщин плотного и пористого оксидов

$$r_s = r_m + h_1 + h_2, \quad d = 2r_s, \quad d_m = 2r_m,$$

где  $d$ ,  $d_m$  – диаметр частицы и металлического ядра, мкм.

Концентрация окислителя на поверхности частицы  $C_{O_2s}$  определяется плотностью массового потока окислителя на поверхности частицы и ее окислением. В результате окисления металла при образовании конденсированных оксидов вблизи поверхности частицы возникает стефановское течение, которое направлено к поверхности частицы. Это объясняется тем, что только один газообразный компонент реакций (кислород), расходуется на образование оксидов. При этом массовый поток инертного газообразного вещества равен нулю. Поэтому стефановский поток увеличивает массоперенос кислорода к поверхности частицы и, следовательно, увеличивает скорости образования плотного и пористого оксидов. Применяв метод, описанный в [1], получим выражение для массовой скорости стефановского течения  $U_s$  у поверхности частицы:

$$U_s = (k_1 + k_2) C_{O_2s}.$$

Плотность массового потока кислорода на поверхности частицы совместно со стефановским течением

$$j_{O_2s} = \beta \rho_g (C_{O_2\infty} - C_{O_2s}) + U_s \rho_{gs} C_{O_2s}$$

равна сумме скоростей химических реакций по кислороду  $W_{o1}$  и  $W_{o2}$ .

В результате получим

$$C_{O_2s} = C_{O_2} (1 + Se)^{-1}, \quad Se = d \frac{(k_1 + k_2) \rho_{gs}}{D_g Nu \rho_g} (1 - C_{O_2\infty}),$$

$$D_g = D_{g0} \left( \frac{T_*}{T_0} \right)^{n+1}, \quad \rho_{gs} = \rho_{g0} \frac{T_0}{T_*}, \quad \rho_g = \rho_{g0} \frac{T_0}{T_*}, \quad \lambda_g = \lambda_{g0} \left( \frac{T_*}{T_0} \right)^n, \quad T_* = \frac{T + T_g}{2}.$$

Здесь  $D_g$  – коэффициент диффузии активного компонента в газе, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda_g$  – коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м·К);  $Se$  – диффузионно-кинетическое отношение, число Семенова,  $Nu$  – число Нуссельта;  $U_s$  – скорость стефановского течения у поверхности частицы, м/с;  $\rho_g$  – плотность воздуха вдали от частицы, кг/м<sup>3</sup>.

Для воздуха  $n = 0.75$ .

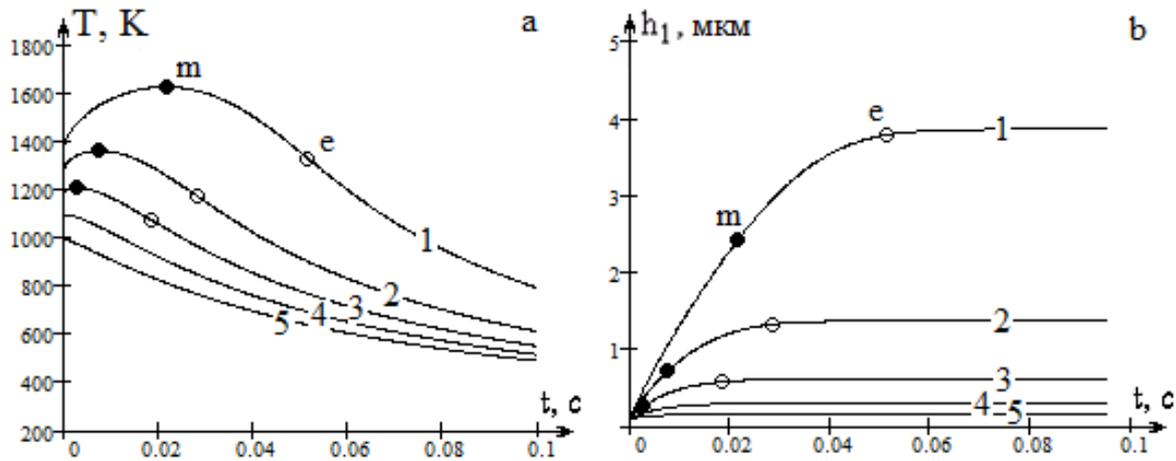


Рисунок 1 – Временные зависимости температуры частицы железа  $d_b=100$  мкм (а), толщины плотного окисла FeO (б) в воздухе комнатной температуры  $T_g = T_w = 293$  К,  $h_{b1} = h_{b2} = 0.1$  мкм,  $C_{O_2\infty} = 0.23$  при различных начальных температурах частицы  $T_b$ :  
 1)1400 К; 2)1300 К; 3)1200 К; 4)1100 К; 5)1000 К.

Зависимость температуры окисляющейся металлической частицы от времени определяется химическим тепловыделением  $q_{ch}$  и теплоотводом  $q_h$ :

$$\frac{1}{6} dc_c \rho_c \frac{\partial T}{\partial t} = q_{ch} - q_h = q_{eff}, \quad T(t=0) = T_b, \quad (5)$$

$$q_h = q_g + q_w, \quad q_{ch} = (Q_{o1}k_1 + Q_{o2}k_2) \rho_{gs} C_{O_2s}, \quad q_w = \varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4),$$

где  $Q_{o1}$ ,  $Q_{o2}$  – тепловые эффекты реакции образования плотного и пористого оксидов, рассчитанные на килограмм окислителя (кислорода), Дж/кгO<sub>2</sub>;  $\rho_{\bar{n}}$  – плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $c_c$ ,  $c_m$  – удельные теплоемкости частицы и металлического ядра, Дж/(кг·К),  $T_g$  – температура воздуха вдали от частицы, К;  $T_w$  – температура стенок, К;  $\sigma$  – коэффициент Стефана-Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $q_{ch}$  – плотность химического тепловыделения, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_h$  – плотность суммарных теплопотерь, Вт/м<sup>2</sup>,  $q_g$  – плотность теплового потока за счет теплообмена с газом молекулярно-конвективным путем, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_w$  – плотность теплового потока теплопотерь на излучение, Вт/м<sup>2</sup>.

Плотность теплового потока на поверхности частицы определим, используя закон Фурье и модель приведенной пленки. В результате получено

$$q_g = \frac{\lambda_g Nu}{d} (T - T_g) - \left( \frac{D_v}{h_1} + k_2 \right) C_{O_2s} \rho_{gs} c_g T_*,$$

где  $c_g$  – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К).

**Определение критических условий зажигания стальной частицы.** Анализ проводился по уравнениям (2) – (5) на примере стальной частицы.

При окислении железа с кислородом выше 843К образуется преимущественно слой вюстита FeO и относительно тонкие пленки магнетита Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и гематита (наиболее тонкий) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [3]. Тогда как увеличение плотного слоя вюстита FeO (критерий Пиллинга-Бедворса равен 1.78) протекает по параболическому закону, утолщение слоев Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> линейно зависит от времени, что объясняет их слабо защитные свойства. Критерии Пиллинга-Бедворса для оксидов-полупроводников Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, соответственно, равны 2.09 и 2.14. Обработка кинетических кривых нарастания окислов [4] позволила получить

значения энергий активации реакций образования пористого окисла  $Fe_3O_4$  (119 кДж/моль) и плотного  $FeO$  (124-130 кДж/моль), что согласовывается со значением энергии активационной диффузии (124 кДж/моль) иона железа через  $FeO$ .

Последовательное образование окислов на примере железа происходит следующим образом. В результате диффузии катионов железа через плотный слой вюстита  $FeO$ , плотно прилегающего к поверхности частицы железа, происходит образование вюстита



При последующем доокислении вюстита образуется магнетит:



Используем следующие параметры:  $Q_{o1} = 16.50 \text{ МДж/кг}O_2$ ,  $Q_{o2} = 20.17 \text{ МДж/кг}O_2$ ,  $E_1 = 130000 \text{ Дж/моль}$ ;  $D_{v0} = 0.118 \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $E_2 = 119000 \text{ Дж/моль}$ ;  $k_{o2} = 300 \text{ м/с}$ ;  $C_{O_{2\infty}} = 0.23$ ,  $\varepsilon = 0.89$ ,  $c_m = 450 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ,  $\rho_m = 7900 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{ox1} = 5700 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{ox2} = 5200 \text{ кг/м}^3$ ,  $\lambda_{g0} = 0.024 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ,  $\rho_{g0} = 1.293 \text{ кг/м}^3$ ,  $c_{g0} = 1005 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ,  $D_{g0} = 0.178 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $T_0 = 273 \text{ К}$ ,  $Nu = 2$ ,  $n = 0.75$ . Начальные толщины окислов взяты 0.1 мкм. Предположим, что толщины окислов незначительны по сравнению с радиусом всей частицы, поэтому  $c_c = c_m$  и  $\rho_c = \rho_m$ .

Взяты различные начальные температуры и диаметры раскалённых частиц.

Обычно предварительно нагретые металлические частицы до невысоких температур, когда они еще не светятся в видимом диапазоне, в воздухе комнатной температуры практически инертно охлаждаются. Естественно, в этом случае в начальный момент времени тепловыделение за счет протекающих химических реакций меньше теплоотвода от частицы. Для зажигания частицы в начальный момент времени необходимо превышения химического тепловыделения над суммарными теплотерями, что возможно только при превышении начальной температуры частицы определенного критического значения. Именно это критическое значение начальной температуры и будем называть температурой зажигания. А соответствующий ей диаметр частицы – диаметром зажигания.

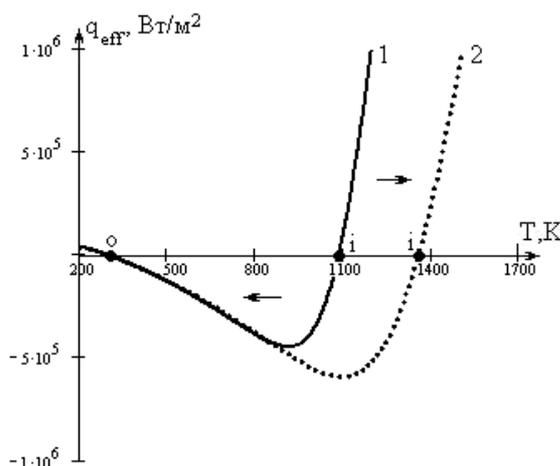


Рисунок 2 – Температурная зависимость эффективной плотности тепловыделения в начальный момент времени частицы 100 мкм в воздухе комнатной температуры: 1 –  $h_b=0.1 \text{ мкм}$ ; 2 –  $h_b = 1 \text{ мкм}$ .

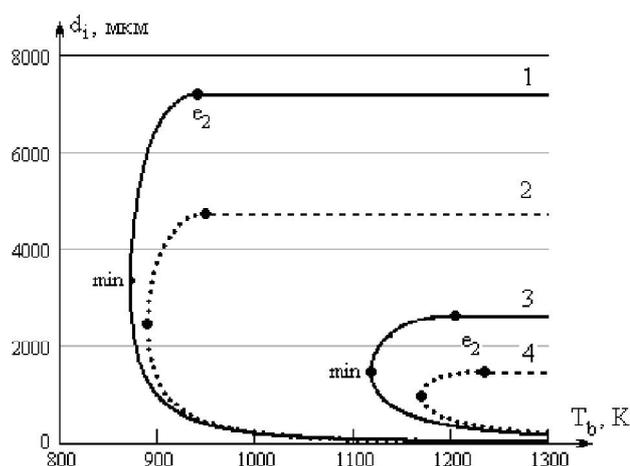


Рисунок 3 – Влияние начальной температуры на критический диаметр зажигания в воздухе комнатной температуры: 1, 3 –  $U_s \neq 0$ ; 2, 4 –  $U_s = 0$ ; 1, 2 –  $h_b = 0.1 \text{ мкм}$ ; 3, 4 –  $h_b = 1 \text{ мкм}$ .

Таким образом, раскалённая частица при начальной температуре, меньшей температуры зажигания будет монотонно остывать (рис.1 а, кривая 5). В этом случае частица ведет себя практически как инертная (скорость нарастания окислов мала

$\partial h / \partial t \rightarrow 0$ , химическая реакция протекают в кинетической области  $Se \ll 1$ ). Условия остывания частицы представляется как:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{t=0} < 0 \quad \text{и} \quad q_{ch} \Big|_{T_b < T_{b,cr}} < q_h \Big|_{T_b < T_{b,cr}},$$

т.е. для остывания частицы необходимо, чтобы химическое тепловыделение было меньше теплоотвода.

Если начальную температуру частицы взять больше температуры зажигания (рис. 1 а, кривые 1-3) то на начальном этапе ее температура с течением времени увеличивается

$$\left( \frac{\partial T}{\partial t} \right)_{t=0} > 0 \quad \text{и} \quad q_{ch} \Big|_{T_b > T_{b,cr}} > q_h \Big|_{T_b > T_{b,cr}},$$

т.е. для зажигания необходимо, чтобы химическое тепловыделение было больше теплоотвода.

Очевидно, что за условие вынужденного зажигания металлической частицы нужно принимать условие равенства временной производной по температуре нулю

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{t=0} = 0 \quad \text{и} \quad q_{ch} \Big|_{T_b = T_{b,cr}} = q_h \Big|_{T_b = T_{b,cr}}, \quad (6)$$

т.е., в начальный момент времени применимо условие неустойчивой стационарности (6), которое на диаграмме Семёнова выглядит в виде пересечения кривой тепловыделения и кривой теплоотвода между точками низкотемпературного окисления и горения.

Анализ стационарных состояний температуры направлен только на приближенное определение тех критических условий (диаметр и температура частицы, толщина окисла, температура газа, концентрация кислорода), при изменении которых в начальный момент времени возможен рост температуры частицы со временем. То есть наблюдается ее зажигание. Говорить, что при критической начальной температуре частицы будет наблюдаться ее устойчивое стационарное состояние, в корне неверно.

Рассмотрим диаграмму Семенова в виде температурной зависимости эффективной плотности тепловыделения (рис. 2). Точка **o** соответствует низкотемпературному устойчивому стационарному состоянию: при любых малых изменениях температуры частицы вблизи этой точки она стремится к своему стационарному значению. Точка **i** является неустойчивым стационарным состоянием и определяет температуру зажигания частицы, то есть критическое значение начальной температуры. При начальных температурах частицы ниже температуры зажигания она убывает до той температуры, пока не наступит низкотемпературный режим окисления (рис. 2, стрелка влево). При начальных температурах частицы выше температуры зажигания  $T_{b,cr}$ , частица переходит на высокотемпературный режим окисления (рис. 2, стрелка вправо). Отметим, влияние начальной толщины окислов на температуру зажигания: для частицы диаметром 100 мкм увеличение начальной толщины окислов в 10 раз приводит к возрастанию температуры зажигания на 400 К.

Применив условие стационарности  $q_{eff}(T) = 0$ , критические значения диаметра зажигания частицы  $d_{e1} < d_i < d_{min}$  от ее начальной температуры определяются выражением

$$d_i = h_{b1} \cdot \frac{D \rho_g Nu/2}{Q_{o1} D_{v0} (1+B) C_{O_2\infty} \rho_{gs}} \cdot \left( \frac{c_g (T_b - T_g)}{A + \sqrt{A^2 - A_g A_w (1 - C_{O_2\infty})}} \right) \exp \left( \frac{E}{RT_b} \right) \quad (7)$$

$$A = \frac{1}{2} \left( 1 - A_g (1 - C_{O_2\infty}) - A_w + A_{st} \right), \quad A_g = \frac{c_g (k_1 + k_2) (T - T_g)}{(Q_{o1} k_1 + Q_{o2} k_2) C_{O_2\infty}},$$

$$A_w = \frac{\varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4)}{(Q_{o1} k_1 + Q_{o2} k_2) C_{O_2\infty} \rho_{gs}}, \quad A_{st} = \frac{c_g T^* (k_1 + k_2)}{(Q_{o1} k_1 + Q_{o2} k_2)}, \quad B = \frac{Q_{o2} k_2 h_{b1}}{Q_{o1} D_v}$$

Здесь  $d_{e1}$  – нижний предел по диаметру области зажигания.

В большей степени благодаря экспоненте, критическое значение начальной температуры увеличивается с уменьшением диаметра, что связано с относительным увеличением теплотер с газом (рис. 2).

Для больших частиц, лежащих в интервале  $d_{\min} < d < d_{e2}$ , основную роль в препятствии зажигания играют теплотери излучением, для которых зависимость критического значения диаметра частицы при вынужденном зажигании от ее начальной температуры имеет вид

$$d_i = \frac{Nu}{2} \cdot \frac{D\rho_g Q_{o1}(1+B)C_{O_2\infty}}{(1+k_2/k_1)(1-C_{O_2\infty})} \cdot \left( \frac{A + \sqrt{A^2 - A_g A_w (1 - C_{O_2\infty})}}{\varepsilon\sigma(T_b^4 - T_w^4)} \right). \quad (8)$$

Для таких частиц увеличение диаметра способствует относительному росту теплотер на излучение по сравнению с теплотерями с газом молекулярно-конвективным путем. В тоже время к единице поверхности частицы приносятся меньше кислорода. Это приводит к уменьшению химического тепловыделения. Поэтому для зажигания частицы большого диаметра ( $d_{\min} < d < d_{e2}$ ) необходимо поднять начальную температуру частицы (рис. 3). Именно учет теплотер на излучение приводит к появлению верхнего предела области зажигания по диаметру (рис. 3).

Анализ роли массопереноса в точках, соответствующих критическим значениям начальной температуры, показал, что величина числа Семенова  $Se$  для частиц размерами 10-1000 мкм с начальной толщиной 0.1 мкм, находится в пределах 0.26-0.36, а для частиц с толщиной окисла 1 мкм – 0.43 – 0.73. Такое увеличение числа Семенова в критических точках с ростом толщины связано с увеличением температуры зажигания частицы. Влиянием стефановского течения на критическое значение начальной температуры в широком диапазоне размеров мелких частиц железа можно пренебречь (рис. 3).

В области больших размеров частиц ( $d_{\min} < d < d_{e2}$ ) влияние стефановского течения на критическое значение начальной температуры значительно. Для этой области размеров диффузионно-кинетическое отношение в критических точках  $Se > 1$ , что говорит о важной роли массопереноса кислорода к поверхности. Стефановское течение способствует дополнительному притоку кислорода к единице поверхности частицы и уменьшению теплоотдачи от частицы. Это приводит к понижению для данного диаметра критического значения начальной температуры, а также к увеличению до 1.5 раз критического диаметра  $d_{e2}$ , определяющего верхний предел по диаметру области вынужденного зажигания металлической частицы в воздухе комнатной температуры.

**Анализ временных зависимостей.** Начальная температура частицы определяет не только условие зажигания частицы данного размера (рис. 1), но и влияет на время «жизни» фрикционной частицы и максимальную температуру горения.

На первой стадии (высокотемпературной стадии) толщины оксидных слоев практически линейно растут со временем (рис. 1 б, кривые 1-3). Средняя скорость нарастания окислов существенна и имеет порядок 10-100 мкм/с. С нарастанием оксидной пленки растет диффузионное сопротивление движению ионов через оксидный слой. Температура частицы достигает максимального значения (т. М) и начинает уменьшаться. Длительность этой стадии (время высокотемпературного окисления) рассчитывается до точки е. Точка е характеризует минимум на зависимости временной производной температуры от времени:

$$\left. \frac{dT}{dt} \right|_{t=t_e} < 0, \quad \left. \frac{d^2T}{dt^2} \right|_{t=t_e} = 0, \quad \left. \frac{d^3T}{dt^3} \right|_{t=t_e} > 0.$$

Скорость роста окислов после точки е резко уменьшается на несколько порядков, что является признаком самопроизвольного погасания. Окисление металла продолжает протекать в кинетической области ( $Se \ll 1$ ) и толщины окислов практически изотермически медленно растут.

Увеличение начальной температуры частицы при  $T_b > T_{b,cr}$  приводит к росту максимальной температуры высокотемпературного окисления, толщин плотного и пористого оксидов и диаметра всей частицы, которое наблюдается в эксперименте [5]. Высокая начальная температура частицы инициирует значительную скорость химической реакции, тепловыделение от которой дольше поддерживает окисление. С ростом начального диаметра частицы химическое тепловыделение уменьшается, что отражается на снижении температуры горения и скорости окисления, а, следовательно, к росту времени горения и снижению толщины окисла после погасания. Анализ проводился для характерных диаметров накаливаемых стальных частиц 50-200 мкм.

Таблица 1 – Влияние начальных температуры и диаметра частицы железа на характеристики ее высокотемпературного окисления и самопроизвольного погасания с учетом теплопотерь на излучение и стефановского течения при  $T_g = T_w = 293K$ ,  $h_{b1} = h_{b2} = 0.1$  мкм

$T_b, K$	$d_b, \mu m$	стефан. течение	точка <i>t</i>			точка <i>e</i>			
			$T_m, K$	$t_m, ms$	$Se_m$	$h_{e1}, \mu m$	$h_{e2}, \mu m$	$t_e, ms$	$Se_e$
1500	50	с учетом	2695	19	1.72	12.8	1.5	44	0.12
		без учета	2060	13	0.81	5.7	0.4	26	0.09
	100	с учетом	2140	47	1.05	11.6	1.4	99	0.10
		без учета	1840	27	0.74	6.2	0.5	64	0.08
	200	с учетом	1760	73	0.80	8.9	1.0	188	0.08
		без учета	16	52	0.77	6.9	0.6	154	0.08
1300	50	с учетом	1340	2	0.28	0.6	0.1	7	0.03
		без учета	1330	1	0.33	0.6	0.1	7	0.03
	100	с учетом	1365	7	0.34	1.3	0.1	28	0.03
		без учета	1350	6	0.35	1.2	0.1	26	0.04
	200	с учетом	1365	23	0.39	2.3	0.2	94	0.04
		без учета	1350	19	0.42	2.1	0.2	86	0.04

За счет образования второго окисла  $Fe_3O_4$  химическое тепловыделение на порядок меньше, чем при образовании вюстита ( $FeO$ ). Это и объясняет изменение характеристик высокотемпературного теплообмена при учете образования двух оксидов. При сравнительно высоких начальных температурах частицы ее температура горения с учетом теплопотерь на излучение может возрасти на 50К и выше, а время горения на 15%. Толщина более толстого слоя  $FeO$ , на порядок превышающая толщину слоя  $Fe_3O_4$ , при погасании частицы возрастает до 20 %. С понижением начальной температуры частицы (уже ниже 1300 К) влияние образования второго оксида на характеристики высокотемпературного окисления и самопроизвольного погасания становится незначительным.

Стефановское течение способствует подходу кислорода с газа до поверхности частицы и уменьшает ее теплообмен с газом. Таким образом, стефановское течение приводит к существенному увеличению максимальной температуры горения, скорости химической реакции, времени высокотемпературного окисления, критических значений толщин окислов после самопроизвольного погасания. Влияние стефановского течения тем больше, чем больше начальная температура и меньше диаметр частицы (см. табл. 1).

Экспериментально наблюдаемые времена высокотемпературной стадии окисления частиц [5] согласуется с расчетными значениями. Так для частицы 50 мкм расчетные времена горения при изменении начальной температуры от 1300 К до 1500 К изменялись от 7 до 50 мс. Частицы получаются черного цвета, именно поэтому в качестве их коэффициента черноты выбран коэффициент излучательной способности оксида  $Fe_2O_3$  равный 0.89. Меньшее значение коэффициента черноты дало бы завышенные значения максимальной температуры и времени высокотемпературного окисления металлической частицы, что рассогласуется с экспериментальными данными.

В тоже время небольшие изменения кинетических параметров, например энергии

активации (до 5%), что характерно для частиц различных сталей, приводит к существенным изменениям температур и времен горения металлических (стальных) частиц.

**Выводы.** Показаны два предела области зажигания по диаметру частицы, верхний предел которой определяется учетом теплотерями на излучение. Стефановское течение расширяет область зажигания. Впервые получено выражение для массовой скорости стефановского потока вследствие последовательного образования на поверхности частицы плотного и пористого окислов. Установлено, что увеличение начальной температуры частицы, большей за температуру зажигания, приводит к возрастанию времени и максимальной температуры высокотемпературного окисления, а также толщин окислов после ее самопроизвольного погасания. Обоснован выбор условия самопроизвольного погасания частицы с практически резким уменьшением скорости нарастания оксидного слоя.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин В. В. Высокотемпературный теплообмен и стефановское течение на поверхности предварительно нагретой металлической частицы в холодном воздухе / В. В. Калинин, А. С. Черненко // Теплофизика высоких температур. – 2009. – Т. 47, № 3. – С. 1-10.
2. Буркина Р. С. Высокотемпературное зажигание реакционноспособного вещества горячей инертной частицей с конечным запасом тепла / Р. С. Буркина, Е. А. Микова // Физика горения и взрыва. – 2009. – Т. 45, № 2. – С. 40-47.
3. Хауффе К. Реакции в твердых телах и на их поверхности / К. Хауффе – М. : Изд-во иностр. лит., 1963. – Ч. 2. – 276 с.
4. Кофстад П. Высокотемпературное окисление металлов / П. Кофстад. – М. : Мир, 1969. – 392 с.
5. Леонова Л. Ю. Определение температуры и кинетических характеристик частиц стали, диспергированной фрикционным способом / Л. Ю. Леонова, В. В. Курятников, Я. Н. Спиридонов // Физика аэродисперсных систем. – 1981. – Т. 21. – С. 80-84.

**Калінчак В.В., Черненко О.С., Шанюк С.О., Селіванов С.Є., Калінчак А.І.** ВПЛИВ ПОЧАТКОВОЇ ТЕМПЕРАТУРИ НА КРИТИЧНІ УМОВИ ЗАПАЛЮВАННЯ, ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРІННЯ, САМОВІЛЬНОГО ПОГАСАННЯ ЧАСТИНКИ ЗАЛІЗА В ПОВІТРІ КІМНАТНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ

*У роботі проведений аналіз впливу початкової температури на критичні умови запалення, характеристики горіння і самовільного згасання розпеченої металевої частинки в повітрі кімнатної температури. Вперше отриманий вираз для масової швидкості стефанівського потоку внаслідок послідовного утворення на поверхні частинки щільного і пористого оксидів. Виявлена роль стефанівського потоку, тепловтрати на випромінювання, дифузійного опору в процесах запалення, горіння і самовільного згасання металевих частинок.*

*Ключові слова:* запалювання, горіння, загасання, металева частка, стефанівський потік.

**Kalinchak V.V., Chernenco A.S., Shanyuk S.A., Selivanov S.E., Kalinchak A.I.** INFLUENCE OF REFERENCE TEMPERATURE ON THE CRITICAL CONDITIONS OF IGNITION, THE CHARACTERISTIC OF BURNING AND SPONTANEOUS CLEARING OF A PARTICLE OF IRON IN AIR TO ROOM TEMPERATURE

*In work the analysis of influence of reference temperature on critical conditions of ignition, the characteristic of burning and spontaneous clearing of the heated metal particle in room temperature air is carried out. For the first time expression for mass speed stephan's stream owing to consecutive formation on a surface of a particle of dense and porous oxides is received. The role of the stephan's stream, thermal losses on radiation, diffusion resistance in processes of ignition, burning and spontaneous clearing metal particles is revealed.*

*Keywords:* ignition, burning, clearing, a metal particle, stephan's stream.