

В.В. Калинин, А.С. Черненко

Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова

Критические условия гетерогенного воспламенения нагретой частицы магния в холодном воздухе

Аналитически получена зависимость критического значения начальной температуры от диаметра частицы магния, которая вынужденно воспламеняется при попадании в холодный воздух. Объяснено существование минимума на этой зависимости и проанализирована относительная роль различных механизмов теплообмена, теплотрат на испарение, а также диффузионно-кинетического отношения в процессе вынужденного воспламенения частицы магния.

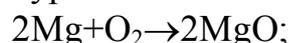
Критические условия теплообмена частицы с окружающими телами прежде всего характеризуются ее диаметром, относительной скоростью и начальной температурой, определяющей вынужденное воспламенение частицы, на поверхности которой протекают экзотермическая химическая реакция с газообразным окислителем.

Воспламенение в нагретом воздухе частиц магния размером 15-55 мкм независимо от их начальной температуры изучалось экспериментально Касселем и Либманом [1]. Установлено, что температура воспламенения с ростом диаметра частицы уменьшалась и принадлежит интервалу 920-1150 К. Воспламенение частиц магния больших размеров (3 мм и 6 мм) в нагретом и холодном воздухе экспериментально исследовалось в работе [2]. Установлено, что для воспламенения частицы в холодном воздухе необходимо предварительно ее нагреть до начальной температуры выше определенного критического значения. На примере частицы углерода ранее аналитически изучалось влияние начальной температуры на критические условия воспламенения [3,4,5]. Аналитическая модель тепломассообмена частицы магния с нагретым воздухом была разработана авторами [1,6].

В данной работе аналитически исследовано влияние начальной температуры предварительно нагретой частицы магния на критические диаметры воспламенения в холодном воздухе, а также определена роль механизмов теплообмена при определении критических условий.

Предположим, что:

1) на поверхности частицы магния протекает экзотермическая химическая реакция первого порядка согласно уравнению



2) поля концентраций и температур подобны в газовой фазе ($Lu = 1$);

3) тепловой и массовые потоки на поверхности частицы со стороны газовой фазы квазистационарны ($a_c \ll a_g$);

4) температура внутри частицы не зависит от координаты ($\lambda_c \gg \lambda_g, Bi \ll 1$);

5) теплообмен с газовой фазой описывается законом Ньютона-Рихмана;

6) теплотери излучением со стенками реакционной установки определяются законами Кирхгофа и Стефана-Больцмана;

7) коэффициент черноты оксида магния не зависит от температуры и толщины оксида.

Здесь Lu и Bi – критерии Льюиса и Био; λ_c, λ_g – коэффициенты теплопроводности частицы магния и воздуха; a_c, a_g – коэффициенты температуропроводности частицы магния и воздуха.

Уравнение нестационарного тепломассообмена частицы магния с учетом химического тепловыделения, испарения магния и теплотери излучением имеет вид:

$$\frac{1}{6} c_c \rho_c d \frac{dT}{dt} = q_{\text{eff}}(T, d), \quad T(t=0) = T_b, \quad (1)$$

$$q_{\text{eff}} = q_{\text{ch}} - q_h, \quad q_h = q_g + q_w + q_L,$$

$$q_{\text{ch}} = Q_o W_o, \quad q_g = \alpha(T - T_g), \quad q_w = \varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4), \quad q_L = L W_{\text{ev}},$$

$$W_o = k \rho_{\text{gs}} C_o (1 + Se)^{-1}, \quad W_{\text{ev}} = \beta \rho_g C_{m,s}, \quad C_{m,s} = \frac{M_m}{M_g} \exp\left(\frac{LM_m}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{boil}}} - \frac{1}{T}\right)\right),$$

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad \alpha = \frac{\lambda_g Nu}{d}, \quad \beta = \frac{D Nu}{d}, \quad Se = \frac{k \rho_{\text{gs}}}{\beta \rho_g}, \quad D = \frac{\lambda_g}{\rho_g c_g}, \quad T_* = \frac{T + T_g}{2}$$

$$\rho_{\text{gs}} = \rho_{g0} \left(\frac{T_0}{T}\right), \quad \rho_g = \rho_{g0} \left(\frac{T_0}{T_*}\right), \quad \lambda_g = \lambda_{g0} \left(\frac{T_*}{T_0}\right)^{0.75}, \quad c_g = c_{g0} + \Omega(T - T_0),$$

где q_{ch}, q_g, q_w – плотности мощности химического тепловыделения, теплового потока за счет теплообмена с газом, теплового потока излучением, Q_o – тепловой эффект химической реакции, рассчитанный на килограмм окислителя, L – удельная теплота испарения, k – константа скорости химической реакции, k_0 – предэкспоненциальный множитель, E – энергия активации, R – универсальная газовая постоянная, C_o – относительная массовая концентрация кислорода на бесконечности в воздухе, $C_{m,s}$ – относительная массовая концентрация насыщенных паров магния на поверхности частицы; M_m, M_g – молярные массы паров магния и воздуха; β – коэффициент массообмена, α – коэффициент теплообмена, ρ_{gs}, ρ_g – плотность газа на поверхности и вдали от частицы, D – коэффициент диффузии кислорода и паров магния в воздухе, λ_g – коэффициент теплопроводности воздуха, c_g – удельная теплоемкость газа в Дж/(кг·К), Ω – температурный коэффициент теплоемкости газа в Дж/(кг·К²), ρ_c – плотность магния, c_c – удельная теплоемкость магния, d – диаметр частицы, ε – коэффициент черноты оксида магния, σ – постоянная Стефана-Больцмана, T_w – тем-

пература стенок, T_g – температура газа, T_0 – температура, про которой рассчитаны ρ_{g0} , λ_{g0} ; T_{boil} – температура кипения магния, Se – диффузионно-кинетическое отношение, Nu – критерий Нуссельта, t – время.

Исследуем стационарные решения уравнение (1). На рис.1 представлены зависимости химического тепловыделения q_{ch} и теплоотвода q_h и эффективного тепловыделения q_{eff} в зависимости от температуры (диаграмма Семенова). Точка стационарности i_* (точка пересечения кривых) характеризует критическое значение начальной температуры частицы (например, размером 3 мм), определяющее ее воспламенение в холодном воздухе. При начальной температуре частицы $T_b < T_{i*}$ частица охлаждается до более низкой температуры, соответствующая точке o (рис.1); при $T_b > T_{i*}$ – частица воспламеняется. На зависимости $q_{eff}(T)$ точка i_* , характеризующая влияние начальной температуры, лежит на оси абсцисс, для которой выполняется дополнительно условие $\frac{\partial q_{eff}}{\partial T} > 0$.

Точка стационарности e_1 (точка e_2) характеризует минимальное (максимальное) предельное значение диаметра частицы, при котором возможна высокотемпературная стадия окисления. Эти точки являются также неустойчивыми: при $T_b < T_e$ частица охлаждается до более низкой температуры, соответствующая

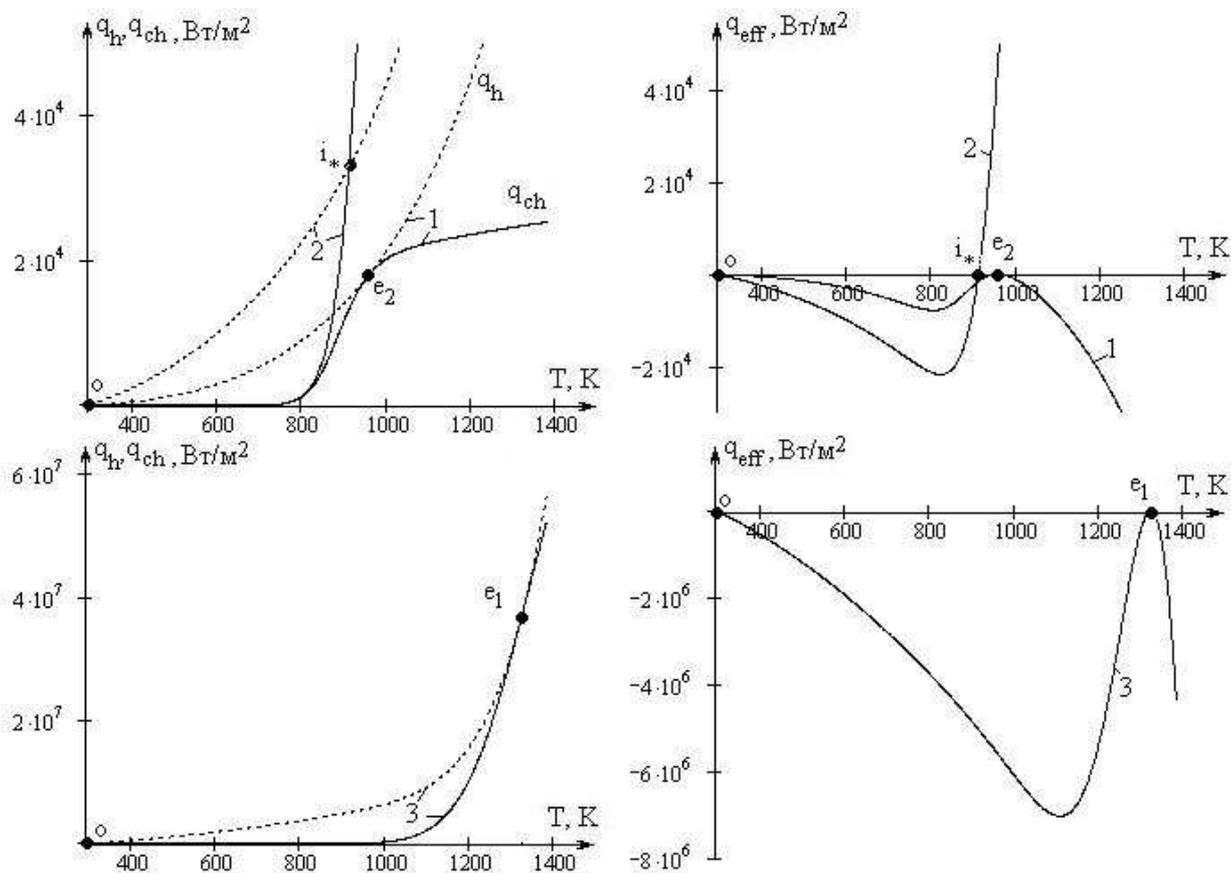


Рис.1 Зависимости а) $q_{ch}(T)$, $q_h(T)$; б) $q_{eff}(T)$ для частицы магния диаметром 1) 40706.1 мкм; 2) 3000 мкм; 3) 11.7 мкм. $T_g = T_w = 293К$, $C_{O_2} = 0.23$.

точке o ; при $T_b > T_e$ – до температуры, соответствующая точке e .

Устойчивые и критические состояния определяемые начальной температурой и диаметром частицы находим из условия стационарности:

$$q_{\text{eff}} = Q_0 k \rho_{\text{gs}} C_o \frac{\beta \rho_g}{\beta \rho_g + k \rho_{\text{gs}}} - \beta \rho_g c_g (T - T_g) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4) - \beta \rho_g LC_{m,s} = 0 \quad (2)$$

Введя безразмерную величину β_* , уравнение (2) несложно свести к квадратному уравнению:

$$(A_g + A_L) \beta_*^2 - 2A \beta_* + A_w = 0,$$

где
$$A = \frac{1}{2} (1 - A_g - A_w - A_L), \quad \beta_* = \frac{\beta \rho_g}{k \rho_{\text{gs}}},$$

$$A_w = \frac{\varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4)}{Q_0 k \rho_{\text{gs}} C_o}, \quad A_g = \frac{c_g (T - T_g)}{Q_0 C_o}, \quad A_L = \frac{LC_{m,s}}{Q_0 C_o},$$

Решение квадратного уравнения позволяет получить устойчивые и критические стационарные состояния в виде зависимости диаметра частицы от ее стационарной температуры:

$$d = \frac{\lambda_g \text{Nu}}{Q_0 C_o \rho_{\text{gs}} k_0} \frac{T - T_g + \frac{LC_{m,s}}{c_g}}{\left(A \pm \sqrt{A^2 - A_w (A_g + A_L)} \right)} \exp\left(\frac{E}{RT} \right). \quad (3)$$

Зависимость (3) позволяет проанализировать влияние начальной температуры частицы магния на критические диаметры, характеризующих воспламенение (рис. 2 а, б).

При низких температурах газовой среды частицы магния не могут самопроизвольно перейти с низкотемпературного режима окисления на высокотемпературный. Для частиц, размеры которых лежат в интервале (d_{e1}, d_{e2}) существуют три стационарных состояния, одно из которых является неустойчивым. Как следует из диаграмм Семенова, именно эти состояния определяют для данной частицы определенного размера критическое значение начальной температуры, выше которой осуществляется переход на устойчивые высокотемпературные стационарные состояния.

Следовательно, воспламенение частицы магния в холодном воздухе возможно только в определенной области изменения начальных температур $(T_{b,m}, T_{b,e1})$ и диаметров частиц (d_{e1}, d_{e2}) , ограниченной кривыми (рис.3а, б):

$$d_{i*} = \frac{\lambda_g \text{Nu}}{Q_0 C_o \rho_{\text{gs}} k(T_b)} \frac{T_b - T_g + \frac{LC_{m,s}(T_b)}{c_g}}{\left(A(T_b) \pm \sqrt{A(T_b)^2 - A_w(T_b) \cdot (A_g(T_b) + A_L(T_b))} \right)} \quad (4).$$

$$d_{i*} = d_{e1}, \quad d_{i*} = d_{e2}.$$

Из рис.2б,3б видно, что без учета теплообмена излучением верхний предел по диаметру исчезает, что указывает на то, что именно теплотери излучением определяют второй предел воспламенения.

На зависимости критической начальной температуры от диаметра частицы (рис.3) наблюдается минимум (*т. т*), который разделяет всю область критических диаметров на две: области малых и больших диаметров.

Для малых диаметров свойственно уменьшение критического значения на-

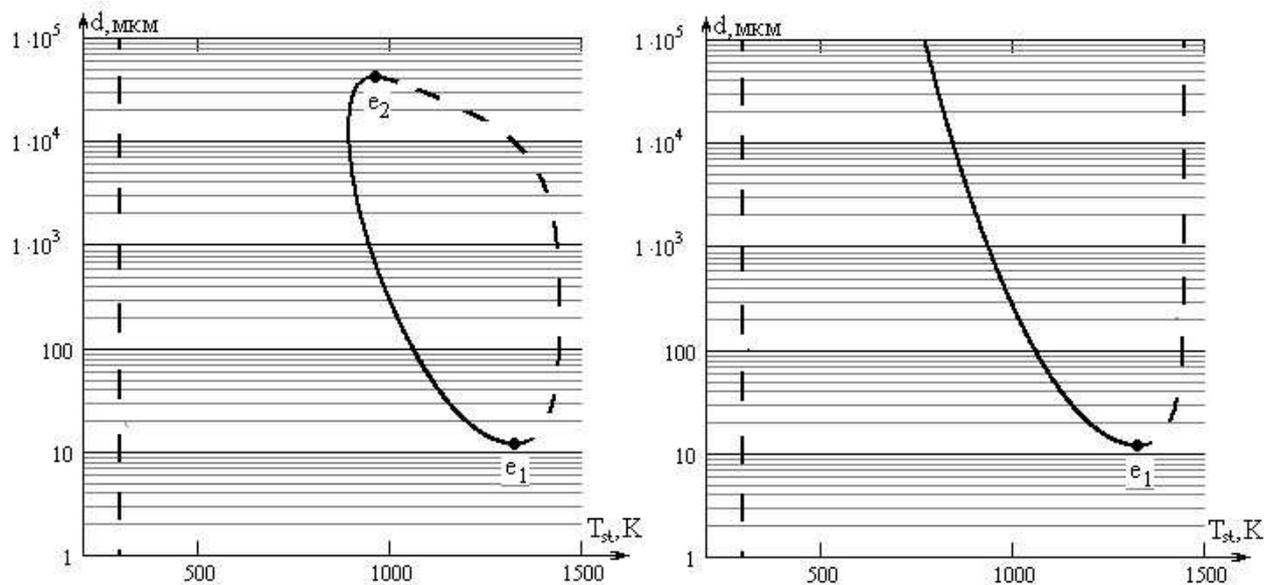


Рис. 2 Зависимость диаметра частицы от ее стационарной температуры а) с учетом и б) без учета теплотерь излучением. Пунктирные кривые – устойчивые низко- и высокотемпературные стационарные состояния; сплошные – неустойчивые стационарные кривые.

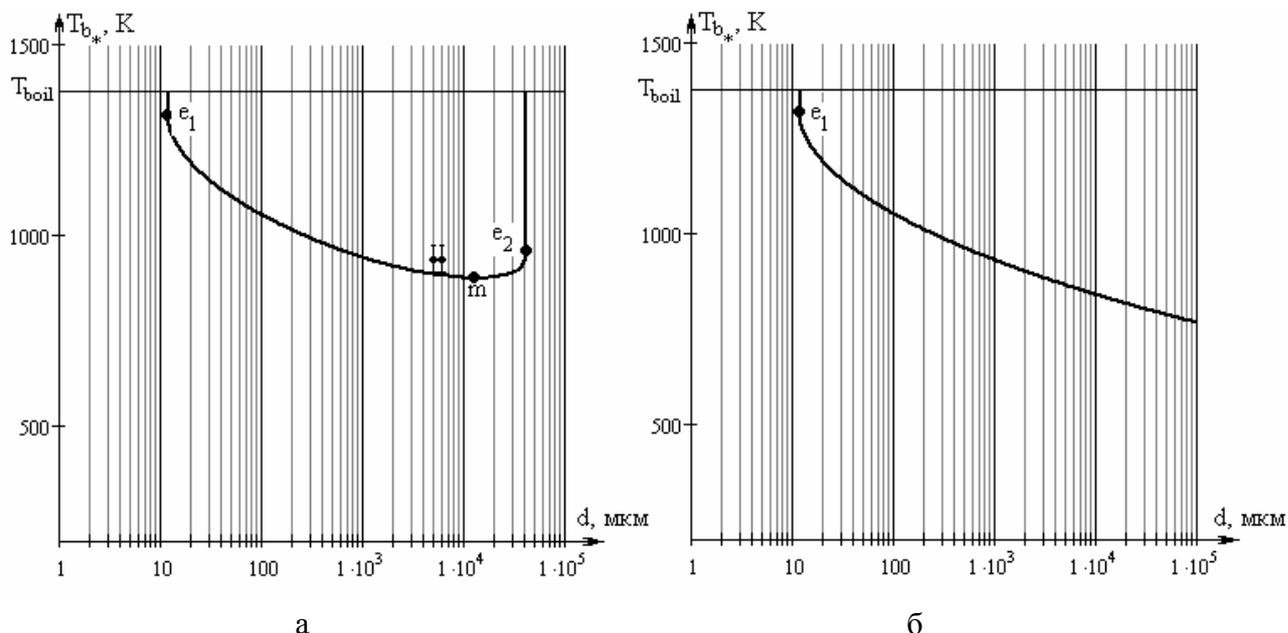


Рис.3 Зависимость критического значения начальной температуры от размера частицы магния при $T_g = T_w = 293\text{K}$ с учетом (а) и без учета (б) теплотерь излучением.

чальной температуры с увеличением диаметра. Это связано, с тем, что с увеличением диаметра уменьшаются теплотери с газом и на испарение магния. При этом химическая реакция определяется кинетикой реакции и практически не зависит от размера частицы.

Для больших размеров частиц роль массопереноса кислорода к поверхности частицы существенна и, с увеличением размера частицы, уменьшается подача кислорода к поверхности за счет диффузии, химическая реакция замедляется. Поэтому для больших диаметров частиц для ее воспламенения необходимо поднять ее начальную температуру.

Расчет проводился при следующих данных: $E = 189500$ Дж/моль, $L = 5.462 \cdot 10^6$ Дж/кг, $k_0 = 0.86 \cdot 10^9$ м/с, $Q_0 = 38.56 \cdot 10^6$ Дж/кгO₂, $\varepsilon = 0.35$, $\rho_{g0} = 0.275$ кг/м³, $c_{g0} = 1105$ Дж/(кг·К), $T_0 = 1273.15$ К, $C_0 = 0.23$, $\lambda_{g0} = 0.082$ Вт/(м·К), $Nu = 2$, $M_m = 24.3 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $M_g = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Для экспериментального определения критических значений начальных температур, частицы магния вводились в пламя пропан-бутан-воздушной смеси. При достижении определенной начальной температуры, фиксируемой хромель-алюмелевой термопарой, частица выводилась в холодный воздух. При начальной температуре частицы выше критического значения, частица по прошествии некоторого времени, воспламенялась. Результаты приведены на рис. 3а, которые удовлетворительно согласуются с представленной теорией.

В таблице приведены значения A_g , A_w , A_L , которые характеризуют относительную роль различных механизмов теплообмена к химическому тепловыделению при определении критических значений начальных температур частицы магния при ее вынужденном воспламенении в холодном воздухе.

Для частиц малых размеров $d_{e1} < d < d_m$ теплотери излучением незначительны, и зависимость критического диаметра, характеризующего воспламенение, от начальной температуры частицы (4):

$$d_{i*} = \frac{\lambda_g Nu}{Q_0 C_0 \rho_{gs} k(T_b) c_g} \frac{c_g (T_b - T_g) + LC_{m,s}(T_b)}{(1 - A_g(T_b) - A_L(T_b))}. \quad (5)$$

Таблица. Роль различных механизмов теплотерь и диффузионно-кинетическое отношение в процессе вынужденного воспламенения частицы магния в холодном воздухе.

| $T_g = T_w = 293$ К, $C_{O_2} = 0.23$ | | | | | |
|---------------------------------------|----------------|-------|-------|-------|------|
| d_i , мкм | $T_{b,cr}$, К | A_g | A_w | A_L | Se |
| 30 | 1147 | 0.097 | 0.006 | 0.049 | 0.17 |
| 100 | 1053 | 0.085 | 0.024 | 0.014 | 0.11 |
| 300 | 989 | 0.078 | 0.072 | 0.005 | 0.09 |
| 1000 | 938 | 0.072 | 0.193 | 0.002 | 0.09 |
| 3000 | 900 | 0.067 | 0.438 | 0.001 | 0.11 |
| 30000 | 904 | 0.068 | 0.400 | 0.001 | 1.18 |

Для частиц магния размерами $d_m < d < d_{e2}$ при вынужденном воспламенении в холодном воздухе можно пренебречь испарением магния с поверхности частицы и критический диаметр зависимости от начальной температуры, определяется как:

$$d_{i*} = \frac{\lambda_g \text{Nu} \frac{Q_o C_o}{c_g}}{\varepsilon \sigma (T_b^4 - T_w^4)} \left(A(T_b) + \sqrt{A(T_b)^2 - A_w(T_b) \cdot A_g(T_b)} \right). \quad (6)$$

Расчеты по (5) и (6) дают хорошее согласование с формулой (4).

Дополнительные исследования влияния диффузионно-кинетического отношения показали, что в холодном воздухе для размеров частиц принадлежащих интервалу (30÷3000) мкм химическая реакция протекает в области близкой к кинетической. Вблизи предельных состояний высокотемпературного тепло-массообмена учет данного отношения необходим.

В точке минимума m сходятся две зависимости критической начальной температуры частицы от ее диаметра. В этом случае подкорневое выражение (4) обращается в ноль (причем, как видно из таблицы для данных диаметров $A_L \ll A_g, A_w$). Это дает возможность получить выражения для определения в точке m критических значений начальной температуры и диаметра из зависимости из зависимости:

$$C_{ai} = \frac{\left(\sqrt{k(T_{bi,m}) c_g \rho_g (T_{bi,m} - T_g)} + \sqrt{\varepsilon \sigma (T_{bi,m}^4 - T_w^4)} \right)^2}{Qk(T_{bi,m}) \rho_{gs}}$$

$$d_{i*,m} = \frac{\lambda_g \text{Nu} \frac{Q_o C_o}{c_g}}{2\varepsilon \sigma (T_{bi,m}^4 - T_w^4)} \left(1 - A_g(T_{bi,m}) - A_w(T_{bi,m}) \right).$$

Используя условие стационарности $q_{\text{eff}} = 0$ и условие минимума $\partial T_b / \partial d = 0$ на зависимости $T_b(d)$, получим для точки m соотношения между тепловыми потоками и диффузионно-кинетического отношения:

$$\frac{q_g}{q_w} = \text{Se} \quad \text{или} \quad \frac{c_g \rho_g \beta (T_{bi} - T_f)}{\varepsilon \sigma (T_{bi}^4 - T_w^4)} = \text{Se}.$$

Таким образом, аналитически получена зависимость критического диаметра, соответствующего вынужденному воспламенению частицы, от начальной температуры частицы. Теплообмен излучением является причиной появления второго предела по диаметру частицы магния, выше которого не происходит вынужденное воспламенение. Получены выражения, позволяющие получить значения начальной температуры и диаметра частицы, соответствующих точке минимума на зависимости критического значения начальной температуры от диаметра, определяющего вынужденное воспламенение.

Литература

1. Хайкин Б.И., Блошенко В.Н., Мержанов А.Г. О воспламенении частиц металлов // Физика горения и взрыва, – 1970, – Т.6, №4. – С.474– 484.
2. М.Е. Деревяга, Л.Н. Стесик, Э.А. Федорин. // Физика горения и взрыва. – 1976, – Т.12, №4. – С. 544.
3. В.В. Калінчак, О.С. Черненко Критичні межі високотемпературного теплома-сообміну частинок з газами // Вісник Одеського національного університету. – 2006. – Т.11, вип.7. Фізика. – С.68-76.
4. Калинин В.В. Влияние излучения на критические режимы тепло- и массообмена при параллельных реакциях на поверхности частицы // Физика горения и взрыва. – 1994. – Т. 30, №4. – С. 63 –74.
5. В.В. Калинин, С.Г. Орловская, А.И. Калинин Влияние начальной температуры на критические параметры гетерогенного воспламенения в газообразном окислителе // Инженерно-физический журнал. – 1990. – Т.58, № 5.– С.868.
6. С.Г. Орловская, В.В. Калинин Динамика теплообмена и движения металлической частицы в нагретом потоке окислителя// Инженерно-физический журнал. – 1986. – Т. 51, №4. – С.681.

В.В. Калінчак, О.С. Черненко

Критичні умови гетерогенного запалювання нагрітої частинки магнію в холодному повітрі

АНОТАЦІЯ

Аналітично отримана залежність критичного значення початкової температури від діаметру частинки магнію, яка вимушено займається при потраплянні в холодне повітря. Пояснено існування мінімуму на цій залежності і проаналізована відносна роль різних механізмів теплообміну, тепловтрата на випаровування, а також дифузійно-кінетичного відношення в процесі вимушеного займання частинки магнію.

V.V. Kalinchak, A.S. Chernenco

Critical terms of heterogeneous ignition of the heated particle of magnesium in cold air

SUMMARY

Dependence of critical value of initial temperature is analytically collected from the diameter of magnesium particle, which forcedly inflames at a hit in cold air. Existence of minimum is explained on this dependence and the relative role of different mechanisms of heat exchange is analysed, and also diffusive-kinetic relation in the process of the forced self-ignition of magnesium particle.