

О ВОСПЛАМЕНЕНИИ ЖЕЛЕЗНОЙ НАСЫПКИ В УСТРОЙСТВЕ БЫСТРОГО СЖАТИЯ

А. В. Фёдоров, А. В. Шульгин

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск
fedorov@itam.nsc.ru, shulgin@itam.nsc.ru

Предложена точечная полуэмпирическая математическая модель, удовлетворительно описывающая экспериментальные данные по зависимости времени задержки воспламенения насыпки частиц железа в устройстве быстрого сжатия от температуры окружающей среды.

Ключевые слова: мелкие частицы металла, насыпка, время задержки воспламенения, математическое моделирование.

Как известно, порошки таких металлов, как алюминий, магний, широко используются в качестве добавок к твердому топливу в ракетно-космической технике. Поэтому встает естественный вопрос о характеристиках взрыво- и пожаробезопасности промышленного производства такого рода мелких частиц. Эта проблема возникает и при использовании материалов, из которых производятся изделия, работающие в условиях высоких температур, — сталь, железо и т. п. В качестве примера можно привести аэродинамические устройства, работающие в условиях сверхзвукового обтекания. Здесь характеристикой долговечности изделий является время до воспламенения материала, из которого изготовлено изделие. Предлагаемая ниже в качестве модельной задача математического описания воспламенения насыпки мелких частиц железа в устройстве быстрого сжатия (УБС) является первым шагом по определению механизмов воспламенения в условиях возможного диспергирования материала поверхности тела.

Рассматриваемая в работе задача опирается на данные экспериментов [1]. Частицы железа размером $20 \div 45$ мкм помещали в небольших керамических чашках в испытательную камеру УБС. Масса насыпки частиц равнялась 0.05 г. Полученные экспериментальные данные при давлении $20 \div 30$ МПа позволили установить зависимость времени задержки воспламенения от температуры кислорода.

Процесс воспламенения насыпки порошка железа, находящейся в керамической чашке УБС, будем моделировать как процесс воспламенения «приведенного» сферического объема — распределенной совокупности частиц,

полученной путем осреднения по массе всех частиц, засыпанных в чашку. Для насыпки массой 0.05 г со средним радиусом частиц 30 мкм оценка радиуса введенной нами совокупности частиц, занимающих область внутри сферы, так называемого радиуса «приведенной частицы», составила $r_p = 1.148 \cdot 10^{-3}$ м. Тепловую историю такой «приведенной частицы» можно описать с помощью распределенной математической модели тепловой истории данного объекта. Однако на первом этапе исследования воспользуемся так называемым точечным приближением данной модели [2], тем более, как показано нами в [3], различие времен задержки воспламенения, определенных по точечной и распределенной моделям, составляет $8 \div 10$ %.

Уравнения математической модели для описания процесса воспламенения «приведенной частицы» в рамках точечного приближения запишем в известном виде [2, 4]:

$$\rho_2 V_2 c_2 \frac{dT_2}{dt} = -S_2 k (T_2 - T_{air}) + S_2 q \rho_3 A \frac{dh}{dt}, \quad (1)$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{K}{h^n} \exp\left(-\frac{E}{RT_2}\right). \quad (2)$$

Здесь t — время, ρ_2 , c_2 — плотность и теплоемкость железа, V_2 , S_2 — объем и площадь поверхности «приведенной частицы», ρ_3 — плотность оксидной пленки, $A = (T_b - T_2)T_0$ — безразмерный параметр, T_2 , T_{air} , T_b — соответственно температуры частицы, воздуха, кипения оксида, T_0 — нормальная температура, $k = \lambda_1 \text{Nu} / 2r_p$ — коэффициент теплопередачи, E — энергия активации, R — универсальная газовая постоянная, λ_1 — теплопроводность воздуха, q — тепловой эффект реакции, отнесенный

к массе оксида, h — толщина оксидной пленки, K — предэкспонент, отражающий повышение плотности кислорода, n — показатель степени, характеризующий зависимость скорости окисления от толщины оксидной пленки.

Введя безразмерные переменные

$$t_0 = \frac{\rho_2 c_2 r_p^2}{\lambda_1}, \quad \bar{t} = \frac{t}{t_0}, \quad \bar{T}_2 = \frac{T_2}{T_0}, \quad \bar{h} = \frac{h}{r_p}$$

и положив $n = 1$, преобразуем уравнения (1), (2) к следующему виду (черта над безразмерными величинами опущена):

$$\frac{d\bar{T}_2}{d\bar{t}} = -\frac{3}{2} \text{Nu}(\bar{T}_2 - T_{air}) + 3 \frac{q\rho_3}{\lambda_1 T_0} \frac{K}{h} (T_b - T_2) \exp\left(-\frac{E}{T_2}\right), \quad (3)$$

$$\frac{d\bar{h}}{d\bar{t}} = \frac{\rho_2 c_2}{\lambda_1} \frac{K}{h} \exp\left(-\frac{E}{T_2}\right). \quad (4)$$

Время задержки воспламенения рассчитывали путем решения задачи Коши для системы уравнений (3), (4) с начальными условиями

$$\bar{T}_2 = 1, \quad \bar{h} = h_0. \quad (5)$$

Энергия активации принята равной $3.1 \cdot 10^6$ Дж/кг. Это значение определено в [1] путем аппроксимации данных эксперимента. Начальная толщина оксидной пленки принята равной 10^{-9} м, тепловой эффект реакции задавался равным $q = 3 \cdot 10^6$ Дж/кг [4]. Вид функции $K(T)$ зависит от температуры окружающей среды T_{air} и отражает зависимость предэкспонента от плотности кислорода окружающей среды. Зависимость $K(T)$ находили путем решения задач по определению времени задержки воспламенения $t_{ign}(T_{air})$ при различных температурах окружающей среды. Соответствующие данные приведены в [1]. В качестве критерия воспламенения использовали время достижения предельной температуры или время достижения некоторого предельного значения скорости нарастания температуры частицы.

В таблице и на рис. 1 приведены экспериментальные [1] и рассчитанные по модели (3), (4) времена задержки воспламенения, а также зависимость $K(T_{air})$. Для определенного таким образом предэкспонента получено удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных времен.

T_{air} , К	t_{ign} , мкс		K , м ² /с
	эксперимент	расчет	
880	118	120	$3.955 \cdot 10^5$
829	514	519	$9.005 \cdot 10^4$
782	2 297	2 321	$1.875 \cdot 10^4$
741	9 626	9 570	$5.1 \cdot 10^3$
709	34 771	34 945	$1.35 \cdot 10^3$
677	133 365	132 903	$3.9 \cdot 10^2$

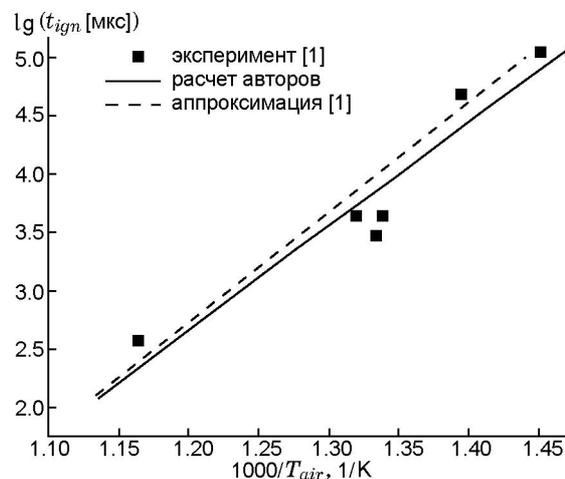


Рис. 1. Зависимость времени задержки воспламенения от температуры

Динамика разогрева частицы представлена на рис. 2 при двух значениях температуры окружающей среды. При других температурах среды поведение качественно аналогично. Отметим, что для железа характерное время прогрева инертной «приведенной частицы» около 40 мс, время задержки воспламенения меняется в пределах $0.1 \div 100$ мс. Это означает, например, что при больших температурах окружающей среды воспламенение происходит за счет окисления приповерхностных слоев «приведенной частицы». Кроме того, в соответствии с теорией теплового взрыва при достижении некоторой температуры срыва численные термограммы процесса меняются очень резко и время процесса в интервале (a, b) изменяется, как и ожидалось, очень слабо. Поведение функции $h = h(t)$ качественно аналогично зависимости, изображенной на рис. 2.

Если продолжить расчет при $t > t_{ign}$, то температура частиц будет оставаться практи-

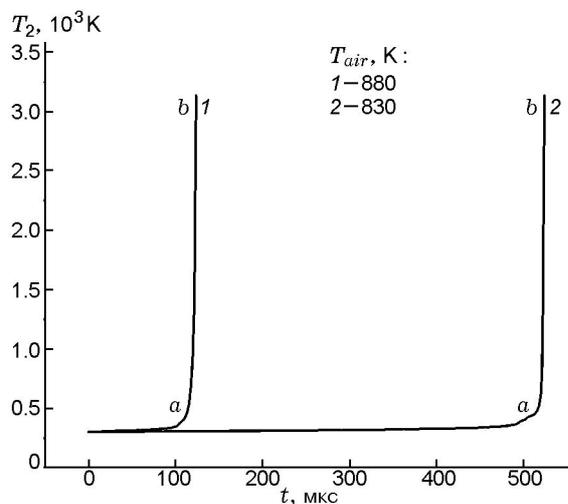
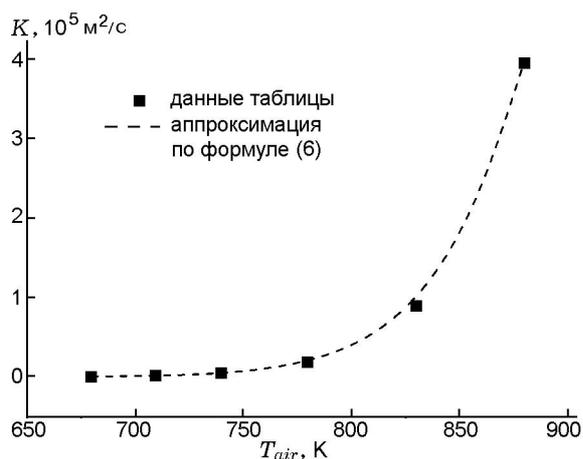


Рис. 2. Динамика температуры частицы

Рис. 3. Аппроксимация зависимости $K = K(T_{air})$

чески постоянной ($T_2 \approx T_b$). Однако при $t > t_{ign}$ толщина оксидной пленки будет продолжаться неограниченно нарастать, что соответствует уравнению (4). Тем самым, модель (3)–(5) справедлива при $t \leq t_{ign}$ и $T_2 \leq T_b + \varepsilon$ (здесь ε — бесконечно малая величина), что обычно для такого рода моделей без лимитирующего фактора на скорость роста оксидной пленки.

Полученная зависимость $K = K(T_{air})$ может быть аппроксимирована функцией

$$K = a \exp\left(-\frac{b}{T_{air}}\right), \quad (6)$$

$$b = 20740.01233, \quad a \approx 0.7 \cdot 10^{16}.$$

Результат аппроксимации приведен на рис. 3. Аппроксимация (6) позволяет экспоненциальный член в уравнении (1) представить в виде

$$a \exp\left[-\left(\frac{b}{T_{air}} + \frac{E}{RT_2}\right)\right],$$

что удобно при численной реализации.

Итак, точечная полуэмпирическая математическая модель, предложенная в работе для описания процесса воспламенения совокупности железных частиц в машине быстрого сжатия, удовлетворительно описывает экспериментальные данные по зависимости времени задержки воспламенения от температуры окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Leschevich V. V., Penyazkov O. G., Rostaing J.-C. Autoignition domains of metal micro particles in oxygen atmosphere // Proc. 8th ISHPMIE, September 5–10, 2010, Yokohama, Japan. — No. ISH-094. — P. 1–6.
2. Федоров А. В., Фомин В. М., Гостеев Ю. А. Динамика и воспламенение газозвезей. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006.
3. Гостеев Ю. А., Федоров А. В. Воспламенение частицы магния (распределенная модель) // Физика горения и взрыва. — 1996. — Т. 32, № 4. — С. 5–12.
4. Болобов В. И., Подлевских Н. А. Расчетный анализ условий воспламенения металлических компактных образцов и фольги в кислороде // Физика горения и взрыва. — 2001. — Т. 37, № 6. — С. 46–55.

Поступила в редакцию 29/XI 2010 г.,
в окончательном варианте — 13/I 2011 г.