

Р. Ш. Гайнутдинов

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЖИГАНИЯ ПОРОХА В ФОРМЕ СПЛОШНОГО ЦИЛИНДРА

Ключевые слова: порох, тепловое зажигание, цилиндр конечных размеров, температура, теплопроводность, коэффициент теплообмена, время, теплоемкость, плотность.

Приближенным методом решена задача зажигания пороха в форме цилиндра конечных размеров конвективным тепловым потоком, когда температура среды является постоянной величиной. Предложены расчетные формулы для определения параметров зажигания реагента.

Keywords: powder, thermal ignition, cylinder of finite size, temperature, thermal conductivity, heat transfer coefficient, time, heat, density.

Approximate method to solve the problem of ignition of gunpowder in the form of a cylinder of finite size convective heat flow, when the ambient temperature is constant. Proposed formulas for calculating the parameters of the ignition agent.

Введение

Тепловое зажигание конденсированных реагирующих веществ в литературе представлено большим числом оригинальных работ и обзоров [1—11]. В большинстве случаев тепловое зажигание изучается в неограниченных пластинах и цилиндрах. Однако на практике применение находят и конденсированные реагирующие вещества, имеющие ограниченные размеры. К таковым в частности относятся пороховые заряды, применяемые в ствольных системах. Тепловое зажигание ограниченных материалов в литературе изучено недостаточно. Поэтому в данной работе исследуется зажигание цилиндра, имеющего конечные размеры, конвективным тепловым потоком.

Постановка задачи. Имеется энергонасыщенный материал в форме ограниченного цилиндра с радиусом R_1 и длиной $2l$. Цилиндр с торца и боковой поверхности нагревается внешним конвективным тепловым потоком, где коэффициент теплообмена α и температура среды T_c являются постоянными величинами. Нагрев цилиндрического тела осуществляется конвекцией по закону Ньютона. Под воздействием внешнего источника тепла в материале развивается экзотермическая химическая реакция нулевого порядка по закону Аррениуса. Математическая модель рассматриваемой задачи представляет собой уравнение теплопроводности с внутренними химическими источниками тепла при соответствующих граничных и начальных условиях. Она точного аналитического решения не имеет. В данной работе она аналитически решается приближенным методом [7], согласно которому она состоит из:

$$\delta T(r, z, t) / \delta t = a(\delta^2 T(r, z, t) / \delta r^2 + \delta T(r, z, t) / r \delta r) + \delta^2 T(r, z, t) / \delta z^2, \quad (1)$$

граничных условий

$$\alpha(T_c - T(R_1, z, t)) = \lambda \delta T(R_1, z, t) / \delta r, \quad (2)$$

$$\delta T(0, z, t) / \delta t = 0, \quad (3)$$

$$\alpha(T_c - T(R_1, l, t)) = \lambda \delta T(R_1, l, t) / \delta r \quad (4)$$

начального условия

$$T(r, z, 0) = T_n, \quad (5)$$

уравнения критерия зажигания

$$\alpha(T_n - T(R_1, l, t)) = 4,2(\lambda Q_0 \exp(-E/RT(R_1, l, t)) RT(R_1, l, t) / E)^{1/2} \quad (6)$$

В приближенном методе [7] уравнение теплопроводности (1) рассматривается без учета влияния химического теплового источника. Для учета влияния химического источника тепла на температурное поле вводится критическое условие зажигания (6). В данной работе требуется определить основные параметры зажигания пороха.

Решение. Значение температуры на поверхности цилиндра $T(R_1, l, t)$, соответствующее зажиганию, определяется из решения (6) методом последовательных приближений. Связь между температурой зажигания и временем задержки зажигания устанавливается из формулы для $T(R_1, l, t)$, полученной из решения системы (1 - 6). Это решение дано в работе [12] и имеет вид:

$$T(R_1, l, t) - T_n = (T_c - T_n)(l - S_1 S_2),$$

где

$$S_1 = \sum A_n \exp(-\mu_n^2 Fo_n) \cdot (J_0(\mu_n^2),$$

$$S_2 = \sum A_m \exp(-\mu_m^2 Fo_m) \cdot \text{Cos}(\mu_m).$$

Для инженерных расчетов значения A_n , A_m , μ_n , μ_m приведены в [12].

В общей постановке уравнение для $T(R_1, l, t)$ представляет определенные трудности для инженерных численных расчетов. В связи с этим, в работе предлагается относительно простой инженерный метод расчета для частного случая. Дело в том, что численные расчеты показали, что зажигание пороха происходит при малых значениях критерия Фурье (Fo). Для малых значений Fo будем иметь относительно простое следующее уравнение [12]:

$$T(R_1, l, t) = T_n + (T_c - T_n)(l - f f_1), \quad (7)$$

где

$$f = l - Bi / (Bi - l/2)(l - \exp(k^2) \text{erfc}(k)),$$

$$k = (Bi - 1/2) Fo^{0.5},$$

$$f_1 = \exp(T_i^2) \operatorname{erfc}(T_i),$$

$$T_i = BiFo^{0.5}.$$

В качестве иллюстрации рассмотрим численный пример по определению времени задержки зажигания пороха для ограниченного и неограниченного цилиндров. Кинетические и теплофизические параметры пороха таковы: $E/R = 24000$ К; $Q_v k_0 = 3,6 \cdot 10^{21}$ кал/(см³·с); $\rho = 1,5$ г/см³; $c = 0,35$ кал/(г·К); $\lambda = 3/10000$ кал/(см·с·К). Коэффициент теплообмена $\alpha = 0,005$ кал/(см²·с·К). $T_c = 2000$ К и $T_n = 300$ К. Расчеты выполнены для трех цилиндров, имеющих $R_1 = 0,1; 1,0; 10$ см. Температура на поверхности неограниченного цилиндра определялась из уравнения:

$$T(R_1, t) = T_n + (T_c - T_n)(1 - f).$$

Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1

	R_1 , см	t_z , с	T_z , К
Ограниченный цилиндр	0.1	0.0344	558
	1.0	0.0352	
	10.0	0.0367	
Неограниченный цилиндр	0.1	0.1359	558
	1.0	0.1463	
	10.0	0.1487	

Из таблицы видно, что ограниченный цилиндр зажигается значительно быстрее по сравнению с неограниченным цилиндром.

Таким образом, решена задача зажигания пороха в виде ограниченного цилиндра.

Обозначения

T - температура пороха, К; T_c - температура среды, К; r - координата, см; α - коэффициент теплообмена, кал/(см²·К); Q_v - тепловой эффект реакции на единицу объема, кал/см³; k_0 — предэкспоненциальный множитель, 1/с; E - энергия активации, кал/моль; t - время, с; R - универсальная газовая постоянная, кал/(моль·К); T_n - начальная температура материала, К; $\alpha = \lambda/(c \rho)$ - коэффициент температуропроводности, см²/с; λ - коэффициент теплопроводности, кал/(см·К); ρ - плотность материала, г/см³; c - коэффициент теплоемкости, кал/(г·К); $T(R_1, t)$ -

температура на поверхности цилиндра, К; $Bi = \alpha R_1 / \lambda$ - критерий Био; $Fo = at/R_1^2$ - критерий Фурье. Индексы: c - среда; v - объем; z - зажигание.

Литература

1. 104. Зельдович, Я. Б. К теории зажигания / Я. Б. Зельдович // Докл. АН СССР - 1968. - Т. 150, №2. - С. 283-285.
2. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике/ Д. А. Франк-Каменецкий. - М.: Наука, 1967. - 491 с.
3. Thomas P. H., P. C. Bowes Thermal ignition in a slab with one face a constant high temperature / P. H. Thomas, P. C. Bowes // Trans. Far. Soc. - 1961. - V.57 № 11. - P.2000—2007.
4. Cook G. B. The initiation of explosion in solid secondary explosives / G. B. Cook // Proc. Roy. Soc.- 1958.-A246. P. 154-160.
5. Enig J. W. Critical condition in time- dependent thermal explosion theory / J. W. Enig // J. Chem. Phys.- 1964.-V.41 -№ 12. -P. 4012-4013.
6. Аверсон, А. Э. К тепловой теории зажигания конденсированных веществ / А. Э. Аверсон, В. В. Барзыкин, А. Г. Мержанов // Докл. АН СССР. - 1966.-Т. 169,-№ 1.-С. 158-161.
7. Аверсон, А. Э. Приближенный метод решения задач тепловой теории зажигания / А. Э. Аверсон, В. В. Барзыкин, А. Г. Мержанов // Докл. АН СССР. - 1968. - Т. 178. - № 1. - С. 131-134.
8. Вилунов, В. Н. Теория зажигания конденсированных веществ / В. Н. Вилунов. - Новосибирск: Наука, 1984. - 188 с.
9. Аверсон, А. Э. Приближенные методы расчета критических условий зажигания / А. Э. Аверсон, В. И. Розенбанд // Физика горения и взрыва. - 1968. -№ 4. - С. 519-525.
10. Любченко, И. С. Тепловая теория зажигания реагирующих конденсированных веществ / И.С. Любченко, Г. Н. Марченко // Успехи химии. - 1987. - Т. LV1. - Вып. - № 2. - С. 216-240.
11. Ейнутдинов Р. Ш. Тепловая теория зажигания энергонасыщенного материала в форме сферы при граничных условиях третьего рода /Р.Ш. Гайнутдинов// Вестник КГТУ- 2011—№5 — С.40.
12. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков.- М.: Высшая школа, 1967. - 600 с.