

МЕТОД РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЗАЖИГАНИЯ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОГО МАТЕРИАЛА ПРИ МАЛЫХ ФУРЬЕ

Ключевые слова: критерий Фурье, теория зажигания, плоское тело, цилиндр, шар, температура среды, теплопроводность, коэффициент теплообмена, время, теплоемкость, плотность.

Рассмотрен метод расчета параметров теплового зажигания конденсированного вещества в форме плоского тела, цилиндра и шара при кратковременных тепловых процессах, когда критерий Фурье имеет малые значения. Установлено его критическое значение, при котором температура на поверхности плоского тела, цилиндра и шара определяются из одной формулы. Выполнены численные расчеты.

Keywords: criterion Fourier theory of ignition, a flat body, cylindrical ball ambient temperature, thermal conductivity, heat transfer coefficient, time, heat, density.

The method of calculating the parameters of the thermal ignition of condensed matter in the form of a flat body, cylinder and a ball at short-term thermal processes, where the Fourier has small values. Established its critical value at which the temperature at the surface of a flat body, cylinder and sphere are determined by a formula. Numerical calculations.

Введение

В тепловой теории зажигания энергонасыщенных материалов предполагается, что ответственными за зажигание являются суммарно экзотермические процессы термического разложения, протекающие в конденсированной фазе вещества. Зажигание конденсированного твердого вещества происходит под действием внешнего теплового источника действующего на поверхность исследуемого материала. В результате происходит прогрев поверхностных слоев конденсированного вещества и ускорение экзотермических реакций в прогретых слоях. Тепловая волна с поверхностных слоев распространяется в более глубокие слои вещества теплопроводностью. При быстрых тепловых процессах решение задач теплового зажигания сводится к решению уравнения теплопроводности с внутренними химическими источниками тепла применительно к полуограниченному телу.

Однако, условия при которых исследуемый материал может рассматриваться как полуограниченное тело, в литературе исследованы мало.

Математическая модель рассматриваемой задачи имеет следующий вид:

$$\delta T(r,t)/\delta t = a(\delta^2 T(r,t)/\delta r^2 + n\delta T(r,t)/r\delta r) + Q_v k_0 \exp(-E/RT)/c\rho, \quad (1)$$

граничные условия

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

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

начальное условие

$$T(r,0) = T_0, \quad (4)$$

Здесь T – температура; t – время; a – коэффициент температуропроводности; r – координата; $Q_v k_0$ – мощность тепловыделения на единицу объема; E –

энергия активации; R – газовая постоянная; c – теплоемкость; ρ – плотность; α – коэффициент теплообмена; n – характеризует геометрию образца ($n = 0, 1, 2$ для плоского тела, цилиндра и шара соответственно); T_c – температура среды; λ – коэффициент теплопроводности.

Система уравнений аналитического решения не имеет. Во многих случаях она решается приближенным методом [1–3], где математическая модель для рассматриваемой задачи представляется системой уравнений:

$$\delta T(r,t)/\delta t = a(\delta^2 T(r,t)/\delta r^2 + n\delta T(r,t)/r\delta r), \quad (5)$$

граничные условия

$$\alpha(T_c - T(R_1,t)) = \lambda \delta T(R_1,t)/\delta r, \quad (6)$$

$$\delta T(0,t)/\delta r = 0, \quad (7)$$

начальное условие

$$T(r,0) = T_0, \quad (8)$$

Условие зажигания

$$\alpha(T_c - T(R_1,t)) = (\lambda Q_v k_0 \exp(-E/RT) T(R_1,t)^2 / (E/R))^{1/2}, \quad (9)$$

Значение $T(R_1,t)$, входящее в уравнение (9), определяется из решения системы уравнений (5) – (8). Уравнение для определения температуры в центре образца имеет вид [4]:

$$(T(0,t) - T_0)/(T_c - T_0) = 1 - \sum A_n \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (10)$$

Пусть $y = \sum A_n \exp(-\mu_n^2 Fo)$.

Наши численные расчеты показали, что при $y < 1$ условие полуограниченного тела не

выполняется. При значениях критерия Bi от 1 до 20 значение $y = 1$, если значение критерия Фурье $Fo \leq 0,04$.

Таким образом, при $y=1$ температуру на поверхности плоского тела, цилиндра и шара можно определить из одной и той же формулы

$$T(R_1, t) = T_0 + (T_c - T_0) \exp(-Ti^2) \operatorname{erfc}(Ti),$$

$$\text{где } Ti = Bi(Fo)^{1/2}.$$

При значениях $y < 1$ температурные расчеты для плоского тела, цилиндра и шара проводятся по своим формулам.

Обозначения

T - температура материала, К; T_c - температура среды, К; r - координата, м; α - коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К); Q_v - тепловой эффект реакции на единицу объема, Дж/м³; K_0 - предэкспоненциальный множитель, 1/с; E - энергия активации, Дж/моль; t - время, с; t_z - время задержки зажигания; R - универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T_n - начальная

температура материала, К; $a = \lambda/(c \cdot \rho)$ - коэффициент температуропроводности, м²/с; λ - коэффициент теплопроводности, Вт / (м·К); ρ - плотность материала, кг/м³; c - коэффициент теплоемкости, Дж/(кг·К); $T(R_1, t)$ - температура на поверхности шара, К; $Bi = a R_1 / \lambda$ - критерий Био; Fo — критерий Фурье.

Индексы: С - среда; V - объем; Z - зажигание.

Литература

1. Гайнутдинов Р. Ш. Тепловая теория зажигания энергонасыщенного материала в ферме сферы при граничных условиях третьего рода./Р. Ш. Гайнутдинов// Вестник КГТУ,- 2011 .-№5,- С.40.
2. 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.
3. Аверсон, А. Э. Динамические режимы зажигания / А. Э. Аверсон, В. В. Барзыкин, А. Г. Мержанов // ФГВ . - 1968. - № 4. - С.494-500.
4. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков,- М.: Высшая школа, 1967. - 600 с.