

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ СМЕСЕВОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА СОДЕРЖАЩЕГО НАНОРАЗМЕРНУЮ ФРАКЦИЮ ПОРОШКА АЛЮМИНИЯ

В.А. Порязов, А.Ю. Крайнов

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: poryazov@mail.ru

Численное моделирование горения смесового металлизированного твердого ракетного топлива (СТТ) проводится на основе математической модели, сформулированной при следующих предположениях: Скорость горения СТТ определяется в соответствии с моделью Германса [1]. Для определения теплового потока к поверхности конденсированной фазы из зоны двухфазных продуктов реакции, необходимого для определения скорости горения [1], решается система уравнений, записанная при следующих предположениях: В газовой фазе происходит экзотермическая химическая реакция первого порядка по закону Аррениуса, конвекция и диффузия реагента, горение происходит в изобарических условиях. С поверхности горения в газовую фазу выходит полидисперсный поток частиц алюминия, содержащий наноразмерную фракцию. Взаимодействие частиц друг с другом в газовой фазе не учитывается. Горение частиц алюминия описывается согласно экспериментальным данным [2], воспламенение частиц алюминия происходит при достижении температуры частицы равной заданной величине [2]. Теплообмен между частицами и газом происходит по закону Ньютона, движение частиц происходит под действием сил трения со стороны газа. Из-за малой объемной концентрации частиц в газе влиянием движения частиц на движение газа пренебрегается.

Математическая постановка задачи состоит из уравнений сохранения энергии газа и частиц алюминия, сохранения массы газа, массы частиц и числа частиц алюминия, выгорания реагента в газовой фазе, движения частиц в потоке газа, состояния газа, уравнений для определения массовых потоков компонентов топлива, суммарного теплового эффекта в к-фазе [3]:

$$c_2 \rho_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial t} + u \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + Y \rho_2 k_0 Q_2 \exp \left(\frac{-E_2}{R_y T_2} \right) + \sum_i 4\pi \alpha r_k^2 n (T_{3,i} - T_2), \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial Y}{\partial t} + u \frac{\partial Y}{\partial x} \right) = D_2 \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} - Y k_0 \exp \left(\frac{-E_2}{R_y T_2} \right), \quad (2)$$

$$c_3 \rho_3 \left(\frac{\partial T_{3,i}}{\partial t} + w \frac{\partial T_{3,i}}{\partial x} \right) = -4\pi \alpha r_{k,i}^2 n (T_{3,i} - T_2) + G_i Q_{Al} \frac{2\mu_{Al}}{3\mu_O}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_2 u)}{\partial x} = - \sum_i G_i, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho_{3,i}}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_{3,i} w_i)}{\partial x} = G_i, \quad (5)$$

$$\frac{\partial w_i}{\partial t} + w_i \frac{\partial w_i}{\partial x} = -\tau_{fr,i}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{\partial (n_i w_i)}{\partial x} = 0, \quad (7)$$

$$P = \rho_2 R T_2 = const. \quad (8)$$

Обозначения: t - время, x - координата, ρ_2 - плотность газа, ρ_3 - приведенная плотность частиц (масса частиц в единице объема), T - температура, P - давление, u - скорость газа, w - скорость частиц, r_k - размер частицы, n - число частиц в единице объема, c - удельная теплоемкость при постоянном давлении, λ - коэффициент теплопроводности, D - коэффициент диффузии, R - газовая постоянная, R_y - универсальная газовая постоянная, Y - концентрация горючего в газовой фазе, Q_2 - тепловой эффект реакции в газовой фазе, α - коэффициент теплоотдачи, τ_{fr} - сила действия газа на частицы, Q_{Al} - теплота сгорания алюминия, G - скорость изменения массы частиц при их горении, μ_{Al} , μ_O - молярные массы молекул алюминия и кислорода. Индексом 1 обозначены параметры конденсированной фазы, 2 -

газовой фазы, 3 - параметры конденсированной фазы продуктов горения, i - указан номер фракции частиц.

Координата $x=0$ соответствует поверхности горения, T_s - температура поверхности горения. На границе $x=0$ граничные условия выражают законы сохранения массы и энергии:

$$\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \rho_p V_k (c_2 T_2|_{x=0} - Q_s - c_1 T_{1,0}), \quad T_s = T_2|_{x=0}, \quad \rho_1 V_k = \rho_2 u|_{x=0}, \quad \rho_1 V_k Y = D_2 \frac{\partial Y}{\partial x} \Big|_{x=0} + \rho_2 u Y|_{x=0},$$

$$\beta_i \rho_k V_k = \rho_{3,i} w_i|_{x=0}, \quad \rho_2|_{x=0} = \frac{P}{RT_2|_{x=0}}, \quad P = const, \quad n_i|_{x=0} = \frac{\rho_{3,i}|_{x=0}}{(4/3)\pi r_{Al,0,i}^3 \rho_k}, \quad V_k = (v_f m_f + v_{ox} m_{ox}) / \rho_p, \quad (9)$$

$$Q_s = \alpha_{ox} (Q_{gp} - Q_l) - (v_f H_p + v_{Al} H_{Al}) m_f / \rho_p V_k, \quad m_f = (\rho_f + \rho_{Al}) A_f \exp(E_f / RT_s), \quad m_{ox} = \rho_p V_k (\alpha_{ox} / v_{ox})$$

где Q_s - тепловой эффект реакции в конденсированной фазе, m_f , m_{ox} - массовый поток горючего, окислителя, ρ_p - плотность топлива, α_{ox} - массовая доля окислителя, v_{ox} - объемная доля окислителя, ρ_f - плотность связки, Q_{gp} - теплота разложения окислителя, Q_l - скрытая теплота разложения окислителя, Q_{sr} - теплота, выделяемая при реакции на поверхности, H_p - тепловой эффект эндотермической реакции пиролиза связки, H_{Al} - теплоемкость алюминия, v_{mf} - массовый поток связки, β - массовая доля фракции порошка алюминия.

$$\text{На границе } x = \infty \text{ ставятся условия: } \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\infty} = 0, \quad \frac{\partial Y}{\partial x} \Big|_{x=\infty} = 0. \quad (10)$$

Начальные условия:

$$T_2(x, 0) = T_{ign}, \quad T_{3,i}(x, 0) = T_{ign}, \quad \rho_2(x, 0) = P / RT_2(x, 0), \quad Y(x, 0) = \rho_{3,i}(x, 0) = w_i(x, 0) = n_i(x, 0) = 0 \quad (11)$$

В формуле (6) сила взаимодействия частиц алюминия с газом вычисляется по формуле

$$\tau_{fr,i} = F_{fr,i} / 4/3 \pi r_{k,i}^3 \rho_k, \quad F_{fr,i} = C_{R,i} S_{m,i} \rho_2 (w_i - u) |u - w_i| / 2, \quad C_{R,i} = 24(1 + 0,15 \text{Re}_i^{0,682}) / \text{Re}_i. \quad (12)$$

Коэффициент теплоотдачи определяется по формуле:

$$\alpha_i = Nu_i \lambda_2 / 2r_{k,i}, \quad Nu_i = 2 + \sqrt{Nu_{l,i}^2 + Nu_{t,i}^2}, \quad (13)$$

где $Nu_{l,i} = 0,664 \text{Re}_i^{0,5}$, $Nu_{t,i} = 0,037 \text{Re}_i^{0,8}$, $\text{Re}_i = 2r_{3,i} \rho_{3,i} |u - w_i| / \eta$,

$$G_i = 3\mu_O n_i \rho_k 4\pi r_{Al,i}^2 k_{Al} a^{0,9} / 2\mu_{Al} \sqrt{r_{Al,i}}, \quad k_{Al} = 2.22 \cdot 10^{-5} \text{ M}^{1,5} / \text{c}, \quad (14)$$

$$r_{Al,i} = \left[\left(\frac{\mu_{Al} + 3/2\mu_O}{\mu_{Al}} r_{Al,0,i}^3 - \frac{\rho_{3,i}}{(4/3)\pi n_i \rho_k} \right) \frac{2\mu_{Al}}{3\mu_O} \right]^{1/3}, \quad r_{k,i} = \left[r_{Al,i}^3 + \frac{\mu_{Al} + 3/2\mu_O}{\mu_{Al}} (r_{Al,0,i}^3 - r_{Al,i}^3) \right]^{1/3}. \quad (15)$$

Было проведено исследование влияния размера частиц алюминия в составе топлива на скорость его горения. В расчетах размер частиц варьировался в диапазоне 0.3-15 мкм, давление в газовой фазе в диапазоне 20-100 атм, массовая доля наноразмерной фракции порошка алюминия варьировалась в диапазоне 0.2-1 %. Массовое содержание алюминия в расчетах было принято 18 %. Температура воспламенения частиц алюминия была задана равной 1300 К [3].

Получены зависимости скорости горения металлизированного СТТ от массовой доли наноразмерной фракции частиц алюминия в газовой фазе.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-20011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булгаков В.К., Липанов А.М. Теория эрозионного горения твердых ракетных топлив. М.: Наука, 2001. 122 с.
2. Беляев А.Ф., Фролов Ю.В., Коротков А.И. О горении и воспламенении частиц мелкодисперсного алюминия // Физика горения и взрыва. 1968. Т. 4, № 3. С. 323-329.
3. Порязов В.А., Крайнов А.Ю. Математическое моделирование горения смесевых составов, содержащих мелкодисперсный алюминий // Известия вузов. Физика. 2013. т. 56. № 9/3. С. 196-199.