

**ВЛИЯНИЕ ЛУЧИСТОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА НА МИНИМАЛЬНУЮ ЭНЕРГИЮ ИСКРОВОГО ЗАЖИГАНИЯ ВЗВЕСИ НАНОРАЗМЕРНОЙ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ**

К.М. Моисеева, А.Ю. Крайнов

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: Moiseeva\_KM@t-sk.ru

Задача об искровом зажигании взвеси угольной пыли в воздухе - одна из классических задач физики горения и взрыва. Для численного моделирования искрового зажигания формулируется математическая постановка, учитывающая процессы теплового, химического и динамического взаимодействия между газом и частицами, а также динамику течения двухфазной среды.

В настоящей работе представлены результаты численного исследования искрового зажигания взвеси наноразмерной угольной пыли в воздухе. В работе учитываются потери тепла на излучение от частиц. Полагается, что вся взвесь состоит из наноразмерной фракции угольной пыли с размером частиц  $r_k = 2 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 10^{-8}$  м. Математическая модель основана на двухфазной двухскоростной модели реагирующей газодисперсной среды [1], а также постановках задач из работ [2 – 3] и определяется системой уравнений:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_g u_g}{\partial r} = r \sum_i G_i; \quad (1)$$

$$\frac{\partial r(\rho_g u_g)}{\partial t} + \frac{\partial r(\rho_g u_g^2 + p)}{\partial r} = p - r \sum_i \tau_{fr,i} + r \sum_i G_i u_{k,i}; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial r \rho_g (\varepsilon_g + 0.5 u_g^2)}{\partial t} + \frac{\partial r [\rho_g u_g (\varepsilon_g + 0.5 u_g^2) + p u_g]}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_g (T_g) \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) + \\ + r \sum_i \left( G_i c_k T_{k,i} - u_{k,i} \tau_{fr,i} + G_i \frac{u_{k,i}^2}{2} + \alpha_{k,i} n_{k,i} S_{k,i} (T_{k,i} - T_g) \right); \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial r \rho_{O_2}}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_{O_2} u_g}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left( r D_g (T_g) \frac{\partial \rho_{O_2}}{\partial r} \right) - r \alpha_1 \sum_i G_i; \quad (4)$$

$$\frac{\partial r \rho_{k,i}}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_{k,i} u_{k,i}}{\partial r} = -r G_i; \quad (5)$$

$$\frac{\partial r(\rho_{k,i} u_{k,i})}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_{k,i} u_{k,i}^2}{\partial r} = r \tau_{fr,i} - r G_i u_{k,i}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial r \rho_{k,i} (\varepsilon_{k,i} + 0.5 u_{k,i}^2)}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_{k,i} u_{k,i} (\varepsilon_{k,i} + 0.5 u_{k,i}^2)}{\partial r} = -r \alpha_{k,i} S_{k,i} n_{k,i} (T_{k,i} - T_g) - \pi n_{k,i} r_{k,i}^2 (4 \sigma \varepsilon T_{k,i}^4 - Q_{iz} c) + \\ + r Q G_i - r G_i c_k T_{k,i} - 0.5 r G_i u_{k,i}^2 + r \tau_{fr,i} u_{k,i}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{\partial r n_{k,i}}{\partial t} + \frac{\partial r n_{k,i} u_{k,i}}{\partial r} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{r}{3 \pi n_{k,i} r_{k,i}^2} \frac{\partial Q_{iz} c}{\partial r} \right) = -\pi n_{k,i} r_{k,i}^2 (4 \sigma \varepsilon T_{k,i}^4 - Q_{iz} c), \quad (9)$$

$$p = \rho_g R_g T_g; \quad (10)$$

$$r_{k,i} = \sqrt[3]{3 \rho_{k,i} / 4 \pi \rho_k^0 n_{k,i}}; \quad (11)$$

$$T_g(r, t_z) = T_b + \frac{Q_z}{4 \pi \lambda_b t_z} \exp(-r^2 / 4 \chi_b t_z), T_{k,i}(r, t_z) = T_b, \rho_{O_2}(r, t_z) = \rho_{O_2,b}, \quad (12)$$

$$\rho_{k,i}(r, t_z) = \rho_{kb,i}, u_g(r, t_z) = u_{k,i}(r, t_z) = 0, \rho_g(r, t_z) = \rho_b, n_{k,i}(r, t_z) = n_{kb,i};$$

$$\frac{\partial \rho_{O_2}(0,t)}{\partial r} = \frac{\partial T_g(0,t)}{\partial r} = \frac{\partial \rho(0,t)}{\partial r} = \frac{\partial \rho_{k,i}(0,t)}{\partial r} = \frac{\partial Q_{iz,c}(0,t)}{\partial r} = 0,$$

$$\frac{\partial n_{k,i}(0,t)}{\partial r} = \frac{\partial T_{k,i}(0,t)}{\partial r} = 0, u_{k,i}(0,t) = u_g(0,t) = 0, \quad (13)$$

$$Q_{iz,c}(\infty,t) = 4\sigma\epsilon T_b^4, \frac{\partial \rho_{O_2}(\infty,t)}{\partial r} = \frac{\partial T_g(\infty,t)}{\partial r} = 0.$$

В (1) – (13)  $\epsilon_{k,i} = c_k T_{k,i}$  – внутренняя энергия частиц  $i$ -ой фракции,  $\epsilon_g = p/\rho_g(\gamma-1)$  – внутренняя энергия газа,  $G_i = n_{k,i} S_{k,i} j_{1,i} \rho_{O_2}$  – скорость изменения массы частиц,  $j_{1,i} = \beta_i k_0 \exp(-E_a/R_u T_{k,i}) / [\beta_i + k_0 \exp(-E_a/R_u T_{k,i})]$  – скорость гетерогенной реакции на частицах,  $\beta_i = \lambda_g(T_g) Nu_D / (c_g \rho_g r_{k,i})$  – коэффициент массоотдачи частиц,  $\alpha_1 = \mu_{O_2} v_{O_2} / \mu_c v_c$  – коэффициент расхода кислорода в реакции с частицами угольной пыли,  $\lambda_g = \lambda_{st}(T_g/T_v)^{2/3}$  – коэффициент теплопроводности газа,  $D_g = D_{st}(T_g/T_v)^{2/3}$  – коэффициент диффузии газа,  $\gamma = c_p/c_v$  – показатель адиабаты,  $Q_{iz}$  – объемная плотность излучения,  $c$  – скорость света,  $\epsilon$  – степень черноты,  $\sigma$  – коэффициент Стефана-Больцмана,  $\tau_{fr,i} = n_{k,i} F_{fr,i}$ , – сила трения,  $F_{fr,i} = C_{r,i} S_{m,i} \rho_g (u_g - u_{k,i}) |u_g - u_{k,i}|/2$  – сила взаимодействия одиночной частицы с газом,  $C_{r,i} = 24(1 + 0,15 Re_i^{0,682})/Re_i$  – коэффициент трения,  $Re_i = 2\rho_g r_{k,i} |u_g - u_{k,i}|/\eta$  – число Рейнольдса,  $Nu_{k,i} = 2 + (Nu_{l,i}^2 + Nu_{t,i}^2)^{1/2}$  – число Нуссельта, где  $Nu_{l,i} = 0,664 Re_i^{0,5}$ ,  $Nu_{t,i} = 0,037 Re_i^{0,8}$ ,  $\alpha_{k,i} = Nu_{k,i} \lambda_g / 2r_{k,i}$  – коэффициент теплообмена газа с частицами. Для остальных параметров использованы общепринятые обозначения. Индекс  $i$  изменяется от 1 до  $Nk$ , 1 – соответствует наиболее крупным частицам,  $Nk$  – наиболее мелким.

Расчеты проводились для наноразмерной фракции угольной пыли с размером частиц  $r_k = 2 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 10^{-8}$  м. Степень черноты задавалась равной  $\epsilon = 0,3 - 0,7$ . В расчетах варьировался состав аэрозвеси, была решена задача для монодисперсной, бидисперсной и полидисперсной взвеси с частицами, размер которых не превышал  $r_k = 2 \cdot 10^{-8}$  м. Массовая концентрация угольной пыли задавалась равной  $m_{dust} = \sum_{i=1}^{Nk} \rho_{kb,i} = 0,4$  кг/м<sup>3</sup>. Решение задачи выполнено при теплофизических и кинетических параметрах:  $\alpha_1 = 2,67$ ,  $k_0 = 79 \cdot 10^3$  м/с,  $E_a = 135$  кДж/моль,  $Q = 20$  МДж/кг,  $\eta = 2 \cdot 10^5$  Па·с,  $\rho_k^0 = 1400$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_k = 1464,4$  Дж/(кг·К),  $c_{p,g} = 1065$  Дж/(кг·К),  $c_{v,g} = 768,2$  Дж/(кг·К),  $D_{st} = 1,992 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с,  $\rho_{O_2,b} = 0,264$  кг/м<sup>3</sup>,  $p_b = 0,1$  МПа,  $\lambda_{st} = 0,025$  Вт/(м·К),  $R_u = 8,31$  Дж/(моль·К),  $\gamma = 1,39$ ,  $T_b = 300$  К. Из результатов численного решения определено влияние размера частиц на минимальную энергию искрового зажигания аэрозвеси угольной пыли. Показано влияние лучистого теплопереноса на минимальную энергию искры.

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987.
2. Krainov A. Yu., Moiseeva K. M. Mathematical modelling of sparkplug ignition of a coal-dust monodisperse suspension in a methane-air mixture // MATEC Web of Conferences. – 2017 – V. 115, 03017.
3. Крайнов А.Ю. Влияние лучистого теплопереноса на минимальную энергию искрового зажигания газозвесей // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37, – № 3. – С. 16-24.