

УДК 536.46
DOI 10.17223/19988621/48/8

К.М. Моисеева, А.Ю. Крайнов, Д.М. Моисеев

УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРЕНИЯ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ УГЛЕ-МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ГОРЕЛКЕ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ТЕПЛА¹

Решена задача об устойчивости горения полидисперсной взвеси угольной пыли в метано-воздушной смеси в горелке с рекуперацией тепла. Определена граница устойчивого горения угле-метано-воздушной смеси в зависимости от состава и скорости подачи смеси на входе в горелку. Показано влияние инертных частиц на устойчивость горения смеси.

Ключевые слова: угле-метано-воздушная смесь, полидисперсная угольная пыль, щелевая горелка, устойчивость горения.

В настоящей работе решается задача об устойчивости горения угле-метано-воздушной смеси (УМВС) в горелке с рекуперацией тепла. Устойчивость горения в рассматриваемом случае определяется составом смеси и процессом рекуперации тепла и зависит от скорости подачи смеси на вход горелки. Угле-метано-воздушная смесь представляет собой полидисперсную взвесь инертных и реагирующих частиц угольной пыли в метано-воздушной смеси с содержанием метана меньше стехиометрического значения. На устойчивость горения влияет процентное соотношение между инертными и реагирующими частицами, массовая концентрация угольной пыли и метана в смеси, а также размер частиц угольной пыли. В частности, исследования влияния размеров, массовой концентрации частиц, состава смеси на возможность горения и особенности распространения пламени реагирующей газовой взвеси выполнены в [1–4].

В работе [1] показано, что смесь реакционноспособного газа с воздухом и угольной пылью способна к взрыву при малых концентрациях угольных частиц в воздухе. При этом аэровзвесь угольной пыли или метано-воздушная смесь по отдельности при взятых концентрациях в воздухе не способны к взрыву. Авторами [2–3] рассмотрено влияние мелкодисперсной фракции угольных частиц на скорость распространения пламени газовой взвеси. Показано, что в случае малых начальных концентраций горючего в газе присутствие в газовой смеси реагирующих частиц увеличивает скорость распространения фронта горения. При значениях концентрации горючего в газе, близких к стехиометрическому значению, частицы уменьшают скорость пламени. Выполнено численное исследование горения монодисперсной взвеси угольной пыли в бедной метано-воздушной смеси в горелке с рекуперацией тепла [4]. Показано, что с увеличением радиуса частиц уменьшается максимальное значение скорости подачи газа на входе в горелку, для которого возможно установление устойчивого режима горения.

В настоящей работе приведено численное исследование задачи горения метано-воздушной смеси со взвешенной полидисперсной угольной пылью в щелевой горелке с инертной внутренней вставкой. Постановка задачи основана на физико-математической постановке [4]. Учитывается полидисперсность угольной пыли,

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 15-03-02578 а.

полагается, что пыль состоит из инертных и реагирующих частиц. Целью работы является определение условий устойчивого горения угле-метано-воздушной смеси в зависимости от состава и скорости подачи.

Холодная угле-метано-воздушная смесь с массовым содержанием метана $a_{\text{CH}_4, \text{v}}$, общей массовой концентрацией частиц $m_{\text{dust}} = \sum_{i=1 \dots N} m_{\text{dust}, i}$ и температурой газовой фазы $T_{g, \text{v}}$ подается со скоростью U_v в предварительно разогретую щелевую горелку со стороны $x = 0$. Полагается, что частицы пыли подразделяются на инертные и реагирующие. Общее количество фракций пыли равно N . Прочие допущения математической постановки соответствуют [4]. Математическая постановка задачи имеет следующей вид:

Уравнение энергии для газовой фазы:

$$c_g \rho_g \frac{\partial T_g}{\partial t} + c_g \rho_g u \frac{\partial T_g}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T_g) \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) + \frac{\alpha_S}{h} (T_{1,S} - T_g) + \sum_{i=1, \dots, N} \left[G c_k T_{k,i} + \alpha_{k,i} n_{k,i} S_{k,i} (T_{k,i} - T_g) \right] + Q_1 \rho_g^2 a_{\text{CH}_4} a_{\text{O}_2} k_{01} \exp \left(-\frac{E_1}{R_u T_g} \right), \quad (1)$$

$$T_{1,S}(x, t) = \begin{cases} T_S(x, t), & x < L, \\ T_S(2L - x, t), & x \geq L, \end{cases} \quad 0 \leq x \leq 2L,$$

Уравнение энергии для внутренней перегородки:

$$c_S \rho_S \frac{\partial T_S}{\partial t} = \lambda_S \frac{\partial^2 T_S}{\partial x^2} - \frac{\alpha_S}{h_S} (T_S - T_g(x, t)) - \frac{\alpha_S}{h_S} (T_S - T_g(2L - x, t)), \quad 0 \leq x \leq L. \quad (2)$$

Уравнение энергии для реагирующих частиц i -й фракции:

$$c_k \rho_{k,i} \frac{\partial T_{k,i}}{\partial t} + u c_k \rho_{k,i} \frac{\partial T_{k,i}}{\partial x} = \alpha_{k,i} S_{k,i} n_{k,i} (T_g - T_{k,i}) + Q_2 G_i - G_i c_k T_{k,i}, \quad i = 1, \dots, N, \quad 0 \leq x \leq 2L. \quad (3)$$

Уравнение баланса массы метана в смеси:

$$\frac{\partial a_{\text{CH}_4}}{\partial t} + u \frac{\partial a_{\text{CH}_4}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(T_g) \frac{\partial a_{\text{CH}_4}}{\partial x} \right) - k_{01} \rho_g a_{\text{CH}_4} a_{\text{O}_2} \exp \left(-\frac{E_1}{R_u T_g} \right), \quad 0 \leq x \leq 2L. \quad (4)$$

Уравнение баланса массы окислителя в смеси:

$$\frac{\partial a_{\text{O}_2}}{\partial t} + u \frac{\partial a_{\text{O}_2}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(T_g) \frac{\partial a_{\text{O}_2}}{\partial x} \right) - \frac{\mu_{\text{O}_2} \nu_{\text{O}_2}}{\mu_{\text{CH}_4} \nu_{\text{CH}_4}} k_{01} \rho_g a_{\text{CH}_4} a_{\text{O}_2} \exp \left(-\frac{E_1}{R_u T_g} \right) - \frac{\mu_{\text{O}_2} \nu_{\text{O}_2}}{\mu_{\text{C}} \nu_{\text{C}}} \sum_{i=1, \dots, N} \frac{G_i}{\rho_g}, \quad 0 \leq x \leq 2L. \quad (5)$$

Уравнение состояния идеального газа:

$$p = \rho_g R_g T_g = \text{const}. \quad (6)$$

Уравнение неразрывности для газа:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_g u)}{\partial x} = \sum_{i=1, \dots, N} G_i. \quad (7)$$

Уравнение баланса массы частиц i -й фракции:

$$\frac{\partial \rho_{k,i}}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_{k,i} u)}{\partial x} = -G_i, \quad i = 1, \dots, N. \quad (8)$$

Уравнение счетной концентрации частиц i -й фракции:

$$\frac{\partial n_{k,i}}{\partial t} + \frac{\partial n_{k,i} u}{\partial r} = 0, \quad i = 1, \dots, N. \quad (9)$$

Уравнение изменения радиуса частиц i -й фракции:

$$r_{k,i} = \sqrt[3]{\frac{3\rho_{k,i}}{4\pi\rho_{k,i}^0 n_{k,i}}}, \quad i = 1, \dots, N. \quad (10)$$

Начальные условия:

$$\begin{aligned} T_g(x, 0) &= T_{g,b}(x), \quad T_S(x, 0) = T_{S,b}(x), \quad T_{k,i}(x, 0) = T_{k,b}(x), \\ \rho_{k,i}(x, 0) &= \rho_{k,b}(x), \quad a_{\text{CH}_4}(x, 0) = a_{\text{CH}_4,b}(x), \quad a_{\text{O}_2}(x, 0) = a_{\text{O}_2,b}(x), \\ u(x, 0) &= u_{g,b}(x), \quad n_{k,i}(x, 0) = n_{k,b}(x). \end{aligned} \quad (11)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} T_g(0, t) &= T_{g,v}, \quad T_{k,i}(0, t) = T_{k,v}, \quad a_{\text{CH}_4}(0, t) = a_{\text{CH}_4,v}, \quad a_{\text{O}_2}(0, t) = a_{\text{O}_2,v}, \\ u(0, t) &= u_v, \quad \rho_{k,i}(0, t) = \rho_{k,v}, \quad n_{k,i}(0, t) = \frac{\rho_{k,v}}{V_{k,i} \rho_k^0}, \quad \frac{\partial T_S(0, t)}{\partial x} = 0; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\frac{\partial T_S(L, t)}{\partial x} = 0; \quad (13)$$

$$\frac{\partial T_g(2L, t)}{\partial x} = \frac{\partial a_{\text{CH}_4}(2L, t)}{\partial x} = \frac{\partial a_{\text{O}_2}(2L, t)}{\partial x} = 0. \quad (14)$$

В постановке задачи использованы следующие обозначения: T – температура; c – теплоемкость; n – количество частиц в единице объема; R_u – универсальная газовая постоянная; R_g – газовая постоянная; r – радиус; S – площадь; Q – тепловой эффект реакции; E – энергия активации; k_0 – предэкспонент в законе Аррениуса; ρ – плотность; ρ_k^0 – плотность угольной частицы; a_{O_2} – массовая концентрация окислителя в смеси; a_{CH_4} – массовая концентрация горючего в смеси; μ_{CH_4} – молярная масса метана; μ_{O_2} – молярная масса кислорода; μ_c – молярная масса углерода; u – скорость; h – ширина канала горелки; h_S – ширина внутренней вставки; ν_{CH_4} – количество молей метана в реакции; ν_{O_2} – количество молей кислорода в реакции; ν_c – количество молей углерода в реакции. Индексы: g – параметры газа; k – параметры частиц; S – параметры внутренней вставки; b – начальные параметры, v – параметры на входе в горелку; st – значения параметров при $T_g = 300 \text{ K}$, 1 – параметры реакции в газовой фазе, 2 – параметры реакции на поверхности частиц, $i = 1, \dots, N$ – номер фракции частиц, где нумерация идет по правилу: сначала реагирующие, затем инертные частицы, при этом для каждого типа частиц нумерация идет от наименьшего размера к наибольшему; $\lambda = \lambda_{st} \left(\frac{T}{T_v} \right)^{2/3}$ – коэффициент

теплопроводности газа; $D \sim \lambda(T)$ – коэффициент диффузии газа; $\alpha_S = \frac{\lambda \text{Nu}_S}{h}$ –

коэффициент теплообмена газа со стенками внутренней вставки; $\alpha_{k,i} = \frac{\lambda \text{Nu}_g}{r_k}$ –

коэффициент теплообмена газа с частицами. Коэффициент теплообмена газа с внутренней вставкой вычисляется из значения числа Нуссельта, Nu_S [6]:

$$\text{Nu}_S = \begin{cases} 0.979 \left(\frac{h \text{Re Pr}}{x} \right)^{0.33}, & \frac{h \text{Re Pr}}{x} > 1000, \\ 3.78 + (\text{Nu}_* - 3.78) \frac{h \text{Re Pr} / x - 100}{900}, & 100 \leq \frac{h \text{Re Pr}}{x} \leq 1000, \\ 3.78, & \frac{h \text{Re Pr}}{x} < 100. \end{cases}$$

Здесь $\text{Pr} = \frac{c \eta}{\lambda}$ – число Прандтля, $\text{Re} = \frac{\rho u h}{\eta}$ – число Рейнольдса, Nu_* – значение

числа Нуссельта, соответствующее значению $\frac{h \text{Re Pr}}{x} = 1000$, Nu_D – диффузионное число Нуссельта.

Скорость изменения массы частиц вычисляется из уравнения: $G = n_k S_k j_1 \rho_{O_2}$, где $j_1 = \beta_m k_{O_2} \exp(-E_2/R_u T_k) / [\beta_m + k_{O_2} \exp(-E_2/R_u T_k)]$ – скорость гетерогенной реакции на частицах, где $\beta_m = \lambda_g(T) \text{Nu}_D / (c_g \rho_g r_k)$ – коэффициент массоотдачи частиц [5]. При расчете принято, что для инертных частиц скорость изменения массы равна нулю, $G_i = 0$, радиус инертных частиц не меняется с повышением температуры.

Задача (1) – (14) решалась численно. Метод решения изложен в [4]. Уравнения энергии (1) – (2) и уравнения баланса массы метана (4) и кислорода (5) решались конечно-разностным методом с использованием преобразования Самарского, обеспечивающего второй порядок точности. Уравнения неразрывности газа (7), энергии (3), счетной концентрации (9) и баланса массы частиц (8) решались явно с использованием конечных разностей против потока. Шаг по пространству задавался аналогично [4] и был равен 10^{-5} м. Шаг по времени вычислялся согласно условию устойчивости Куранта.

В качестве начальных условий (11) задавались установившиеся распределения параметров, соответствующие устойчивому горению 6 %-й метано-воздушной смеси при скорости подачи смеси 0.3 м/с. В расчетах начальное условие вытесняется запыленным газом с меньшим содержанием метана. Задача решается до момента установления фронта горения. Под установлением фронта горения подразумевался выход координаты фронта горения на устойчивое положение. Координатой фронта горения считалась точка пространства, в которой концентрация окислителя равна половине от входной концентрации. Расчеты проводились для параметров [4].

На рис. 1 представлены распределения температуры, соответствующие установившемуся горению угле-метано-воздушной смеси с $a_{\text{CH}_4, \text{vol}} = 2\%$, $m_{\text{dust}} = \sum_{i=1, \dots, N} m_{\text{dust}, i} = 0.03 \text{ кг/м}^3$. Задавалось, что пыль состоит из 4 реагирующих фракций. Размер частиц фракций задавался равным $r_{k,1} = 0.65 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $r_{k,2} = 1.3 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $r_{k,3} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $r_{k,4} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Использовалось распределение масс фракций частиц по размерам: $m_{\text{dust},1} = 0.4 m_{\text{dust}}$, $m_{\text{dust},2} = 0.3 m_{\text{dust}}$, $m_{\text{dust},3} = 0.2 m_{\text{dust}}$, $m_{\text{dust},4} = 0.1 m_{\text{dust}}$. Согласно рисунку, первыми воспламеняются частицы радиуса $r_{k,3} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. За счет теплообмена с горящими частицами фракции воспламеняется газ и затем частицы других фракций.

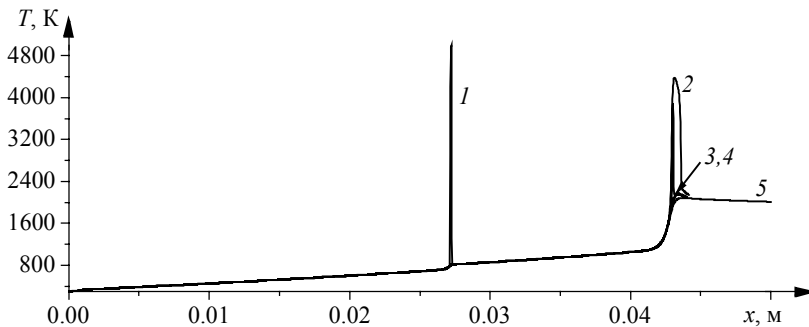


Рис. 1. Распределения температуры газа (кр. 5) и частиц (кр. 1–4). Кривые: 1 – $T_{k,3}$, 2 – $T_{k,4}$, 3 – $T_{k,1}$, 4 – $T_{k,2}$. $r_{k,1} = 0.65 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $r_{k,2} = 1.3 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $r_{k,3} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $r_{k,4} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. $a_{\text{CH}_4, \text{vol}} = 2\%$, $m_{\text{dust}} = 0.03 \text{ кг/м}^3$

Fig. 1. Distribution of the temperature of gas (curve 5) and particles (curves 1–4). Curves: (1) $T_{k,3}$, (2) $T_{k,4}$, (3) $T_{k,1}$, (4) $T_{k,2}$. $r_{k,1} = 0.65 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $r_{k,2} = 1.3 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $r_{k,3} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $r_{k,4} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. $a_{\text{CH}_4, \text{vol}} = 2\%$, $m_{\text{dust}} = 0.03 \text{ кг/м}^3$

Первая серия расчета была выполнена для определения влияния объемного содержания метана в смеси на устойчивость горения УМВС. Массовое содержание метана на входе в горелку соответствовало объемному содержанию метана $a_{\text{CH}_4, \text{vol}} = 2$ и 4%. Количество фракций пыли задавалось равным $N = 4$, полагалось, что все фракции являются реагирующими. Размер частиц и процентное содержание масс фракций соответствовали рис. 1: $r_{k,1} = 0.65 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $r_{k,2} = 1.3 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $r_{k,3} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $r_{k,4} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $m_{\text{dust},1} = 0.4 m_{\text{dust}}$, $m_{\text{dust},2} = 0.3 m_{\text{dust}}$, $m_{\text{dust},3} = 0.2 m_{\text{dust}}$, $m_{\text{dust},4} = 0.1 m_{\text{dust}}$. В расчетах варьировалась величина скорости подачи смеси на входе в горелку U_v и общая массовая концентрация пыли $m_{\text{dust}} = \sum_{i=1, \dots, N} m_{\text{dust}, i}$.

Кривые, определяющие границу устойчивого горения УМВС, представлены на рис. 2. На рис. 2, *a* граница области устойчивого горения определена относительно массы пыли. На рис. 2, *b* выполнен пересчет результатов на величину избытка окислителя в смеси. Избыток окислителя определялся как отношение массы непрореагировавшего кислорода к начальной массе кислорода в смеси, $\phi = \left[a_{\text{O}_2, v} - \left(\frac{\mu_{\text{O}_2} v_{\text{O}_2}}{\mu_{\text{CH}_4} v_{\text{CH}_4}} a_{\text{CH}_4, v} + \frac{\mu_{\text{O}_2} v_{\text{O}_2}}{\mu_{\text{C}} v_{\text{C}}} m_{\text{dust}} \right) \right] / a_{\text{O}_2, v}$. Кривая 1 на рис. 2 соответствует смеси с объемным содержанием метана $a_{\text{CH}_4, \text{vol}} = 4\%$, кривая 2 – смеси с

$a_{\text{CH}_4, \text{vol}} = 2\%$. Согласно полученным результатам, смесь с $a_{\text{CH}_4, \text{vol}} = 4\%$ горит устойчиво в большем диапазоне значений скорости подачи смеси на входе в горелке по сравнению со случаем $a_{\text{CH}_4, \text{vol}} = 2\%$. Пересчет результатов на коэффициент избытка окислителя ϕ дает такой же вывод. Согласно рис. 2, *b*, при одном и том же значении ϕ граница области устойчивого горения смеси с $a_{\text{CH}_4, \text{vol}} = 4\%$ выше, чем смеси с $a_{\text{CH}_4, \text{vol}} = 2\%$.

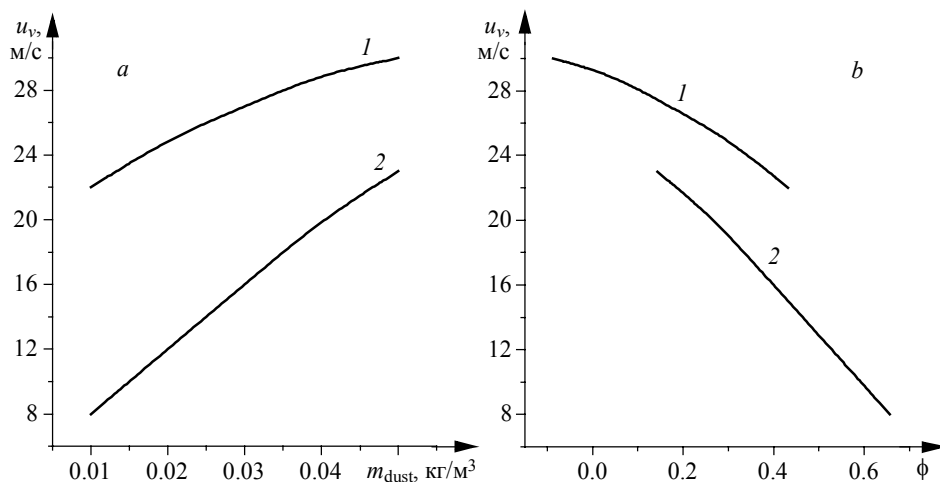


Рис. 2. Граница области устойчивого горения: кр. 1 – $a_{\text{CH}_4, \text{vol}} = 4\%$, кр. 2 – $a_{\text{CH}_4, \text{vol}} = 2\%$. (a) – результаты, представленные относительно массы пыли; (b) – результаты, представленные относительно коэффициента избытка окислителя

Fig. 2. Boundary of the region of stable combustion. (1) $a_{\text{CH}_4, \text{vol}} = 4\%$, (2) $a_{\text{CH}_4, \text{vol}} = 2\%$. The results reported in relation to the (a) mass of coal dust and (b) excess oxidant ratio

Результаты работы [4] показали, что на устойчивость горения монодисперсной взвеси угольных частиц в метано-воздушной смеси сильно влияет размер частиц. Для расчета по определению влияния размера частиц на устойчивость горения полидисперсной взвеси угольных частиц в метано-воздушной смеси были использованы два набора частиц, отличающиеся процентным соотношением между крупными и мелкими частицами. Полагалась, что пыль состоит из четырех фракций. Размер частиц соответствовал предыдущему расчету. Объемное содержание метана в смеси задавалось равным $a_{\text{CH}_4, \text{vol}} = 4\%$ и $a_{\text{CH}_4, \text{vol}} = 3\%$. Для расчета были выбраны наборы с процентным соотношением между массами фракций: ($m_{\text{dust},1} = 0.4m_{\text{dust}}$, $m_{\text{dust},2} = 0.3m_{\text{dust}}$, $m_{\text{dust},3} = 0.2m_{\text{dust}}$, $m_{\text{dust},4} = 0.1m_{\text{dust}}$) и ($m_{\text{dust},1} = 0.77m_{\text{dust}}$, $m_{\text{dust},2} = 0.15m_{\text{dust}}$, $m_{\text{dust},3} = 0.05m_{\text{dust}}$, $m_{\text{dust},4} = 0.03m_{\text{dust}}$). Для второго набора процентное соотношение между фракциями частиц было изменено в сторону увеличения массы мелкодисперсной фракции, процентное соотношение между фракциями для второго набора соответствует наблюдениям [7]. Результаты расчета представлены на рис. 3. На рис. 3, *a* представлены результаты расчета для смесей с объемным содержанием метана $a_{\text{CH}_4, \text{vol}} = 3\%$, на рис. 3, *b* – результаты для $a_{\text{CH}_4, \text{vol}} = 4\%$. Кривые 1 соответствуют пыли с составом фракций ($m_{\text{dust},1} = 0.77m_{\text{dust}}$, $m_{\text{dust},2} = 0.15m_{\text{dust}}$, $m_{\text{dust},3} = 0.05m_{\text{dust}}$, $m_{\text{dust},4} = 0.03m_{\text{dust}}$), кривые 2 соответствуют составу ($m_{\text{dust},1} = 0.4m_{\text{dust}}$, $m_{\text{dust},2} = 0.3m_{\text{dust}}$, $m_{\text{dust},3} = 0.2m_{\text{dust}}$, $m_{\text{dust},4} = 0.1m_{\text{dust}}$).

Согласно полученным результатам, с увеличением доли мелкодисперсной фракции область устойчивого горения УМВС расширяется. При этом для смеси с меньшим содержанием метана, $a_{\text{CH}_4, \text{vol}} = 3\%$, (рис. 3, а) граница области устойчивого горения при увеличении доли мелкодисперсной фракции и с увеличением массового содержания пыли сдвигается сильнее, чем граница области для состава с $a_{\text{CH}_4, \text{vol}} = 4\%$.

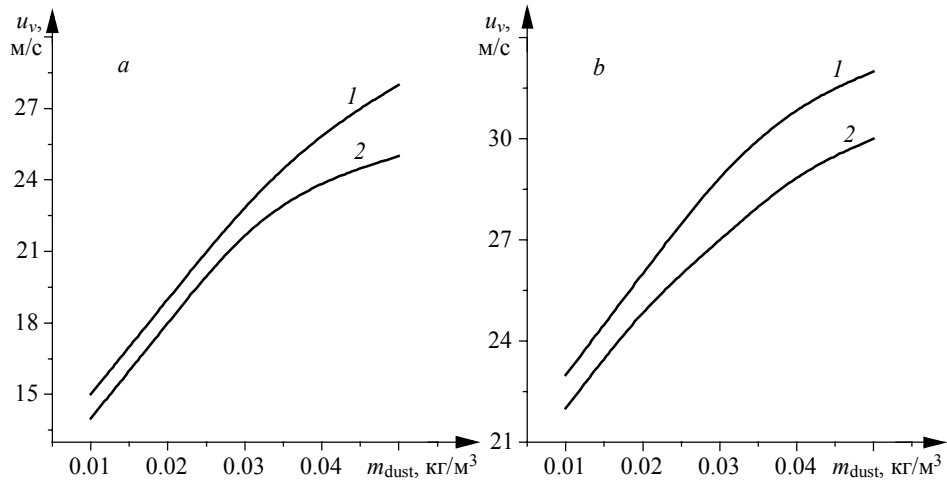


Рис. 3. Граница области устойчивого горения: (а) – $a_{\text{CH}_4, \text{vol}} = 3\%$; (б) – $a_{\text{CH}_4, \text{vol}} = 4\%$. кр. 1 – состав (3% $r_{k,1}$, 5% $r_{k,2}$, 15% $r_{k,3}$, 77% $r_{k,4}$), кр. 2 – состав (10% $r_{k,1}$, 20% $r_{k,2}$, 30% $r_{k,3}$, 40% $r_{k,4}$)
Fig. 3. Boundary of the region of stable combustion. (a) $a_{\text{CH}_4, \text{vol}} = 3\%$ and (b) $a_{\text{CH}_4, \text{vol}} = 4\%$. 1, composition (3% $r_{k,1}$, 5% $r_{k,2}$, 15% $r_{k,3}$, 77% $r_{k,4}$); 2, composition (10% $r_{k,1}$, 20% $r_{k,2}$, 30% $r_{k,3}$, 40% $r_{k,4}$)

Для расчетов по определению влияния инертной фазы на устойчивость горения УМВС была выбрана смесь, состоящая из $N=8$ фракций с размерами $r_{k,1} = r_{k,5} = 0.65 \cdot 10^{-6}$ м, $r_{k,2} = r_{k,6} = 1.3 \cdot 10^{-6}$ м, $r_{k,3} = r_{k,7} = 2 \cdot 10^{-6}$ м, $r_{k,4} = r_{k,8} = 3 \cdot 10^{-6}$ м. Размер частиц соответствует предыдущим расчетам. Первые четыре фракции полагались реагирующими, фракции с 5 по 8 полагались инертными. Процентное массовое содержание инертных частиц в пыли задавалось равным 10% от общей массы пыли. Распределение процентного массового содержания частиц по размерам было следующим: $m_{\text{dust},1} = 0.36m_{\text{dust}}$, $m_{\text{dust},2} = 0.27m_{\text{dust}}$, $m_{\text{dust},3} = 0.18m_{\text{dust}}$, $m_{\text{dust},4} = 0.09m_{\text{dust}}$, $m_{\text{dust},5} = 0.04m_{\text{dust}}$, $m_{\text{dust},6} = 0.03m_{\text{dust}}$, $m_{\text{dust},7} = 0.02m_{\text{dust}}$, $m_{\text{dust},8} = 0.01m_{\text{dust}}$. Объемное содержание метана в смеси составляло 2%. Результаты расчета представлены на рис. 4. Согласно рис. 4, граница области устойчивого горения состава с инертными частицами находится ниже границы области устойчивого горения состава без инертных частиц. Более того, с увеличением массовой концентрации пыли в смеси растет разрыв между границами областей. Это значит, что с увеличением массовой концентрации пыли инертные частицы оттягивают на себя больше тепла. Характер кривой, описывающей границу области устойчивого горения, меняется. Расширение области с увеличением массовой концентрации частиц для смеси с инертными частицами происходит медленнее, чем для смеси без инертных частиц.

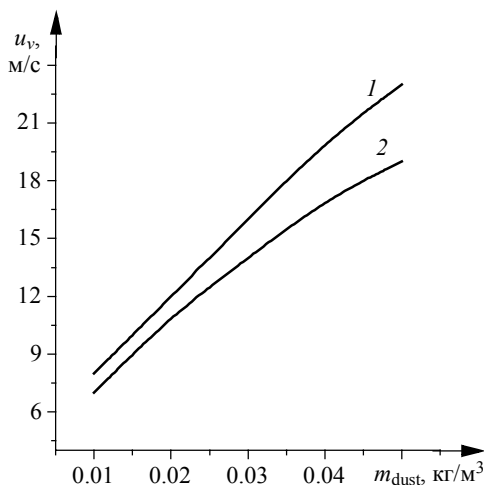


Рис. 4. Граница области устойчивого горения: кр. 1 – состав без инертных частиц, кр. 2 – состав с 10 % инертных частиц
Fig. 4. Boundary of the region of stable combustion. (1) composition without inert particles and (2) composition with 10% of inert particles

Выводы

Решена задача об устойчивости горения полидисперсной взвеси угольной пыли в метано-воздушной смеси в горелке с рекуперацией тепла. На устойчивость горения угле-метано-воздушной смеси влияет набор параметров, таких, как размер частиц, объемное содержание метана в смеси и массовое содержание частиц. При этом в настоящей работе показано, что на устойчивость горения угле-метано-воздушной смеси также оказывает влияние соотношение между массовым содержанием инертных и реагирующих частиц и соотношение между мелкодисперсными и крупнодисперсными фракциями частиц пыли. Смесь с большим процентным содержанием массы мелкодисперсной фракции горит устойчиво в большем диапазоне скоростей подачи смеси на входе в горелку. Присутствие инертных частиц приводит к уменьшению диапазона скорости подачи смеси, в котором возможно устойчивое горение УМВС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калякин С., Костенко В., Завьялова Е., Штрох Л. Влияние примесей шахтных горючих газов на взрывоопасность угольных аэрозолей // Aktualne Problemy Zwalczenia Zagrożeń Górniczych: II Konferencja Naukowo-Techniczna. Brenna, 2012. № 7–9. С. 176–184.
2. Rockwell S.R., Rangwala A.S. Influence of coal dust on premixed turbulent methane-air flames // Combustion and Flame. 2013. V. 160. P. 635–640.
3. Дементьев А.А., Моисеева К.М., Крайнов А.Ю., Палеев Д.Ю. Сопоставление результатов моделирования распространения пламени в гибридной газозвеси с экспериментальными данными // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89. № 6. С. 1538–1546.
4. Крайнов А.Ю., Моисеева К.М. Горение угле-метано-воздушной смеси в горелке с рекуперацией тепла // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2016. № 3(41). С. 65–73.
5. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987.

6. *Справочник по теплообменникам*: в 2 т. Т. 1 / пер. с англ., под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шникова. М.: Энергоатомиздат, 1987.
7. Васильев А.А., Пинаев А.В., Трубицын А.А. и др. Что горит в шахте: метан или угольная пыль? // *Физика горения и взрыва*. 2017. Т. 53. № 1. С. 11–18.

Статья поступила 1.04.2017 г.

Moiseeva K.M., Krainov A.Yu., Moiseev D.M. (2017) STABILITY OF THE COMBUSTION OF POLYDISPERSE COAL-METHANE-AIR MIXTURE IN THE HEAT RECOVERY BURNER. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 48. pp. 82–90

DOI 10.17223/19988621/48/8

The problem of the stability of combustion of a polydisperse suspension of coal dust in a methane-air mixture within the burner with a heat recovery is solved. The boundary of a stable combustion of coal-methane-air mixture is determined in relation to the composition and feed rate of the mixture at the burner inlet. It is shown that the stability of combustion of coal-methane-air mixture is affected by the ratio between the mass content of the inert and reacting particles and the ratio between finely dispersed and coarsely dispersed fractions of dust particles. The mixture containing a high percentage of the mass of finely dispersed fraction burns steadily in a wide range of the feed rates of mixture at the burner inlet. The presence of inert particles leads to the reduction in the mixture feed rate range within which the stable combustion of carbon-methane-air mixture is possible.

Keywords: coal-methane-air mixture, polydisperse coal dust, slot burner, combustion stability.

KRAINOV *Aleksey Yurievich* (Doctor of Physics and Mathematics, Assoc. Prof., Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)

E-mail: akrainov@ftf.tsu.ru

MOISEEVA *Kseniya Mikhaylovna* (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)

E-mail: Moiseeva_KM@t-sk.ru

MOISEEV *Dmitriy Mikhaylovich* (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)

E-mail: dmm1@sibmail.com

REFERENCES

1. Kalyakin S., Kostenko V., Zav'yalova E., Štroch L. (2012) Effect of impurities mine combustible gases on explosion dangerin of coal aerosol. *Aktualne problemy zwalczania zagrożeń górniczych: II konferencja naukowo-techniczna*. Brenna. 7–9. pp. 176–184.
2. Rockwell S.R., Rangwala A.S. (2013) Influence of coal dust on premixed turbulent methane-air flames. *Combustion and Flame*. 160. pp. 635–640. DOI: 10.1016/j.combustflame.2012.10.025.
3. Dement'ev A.A., Moiseeva K.M., Krainov A.Yu., Paleev D.Yu. (2016) Comparison of the results of modeling the flame propagation in a hybrid gas suspension with experimental data. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 89(6). pp. 1514–1521. DOI: 10.1007/s10891-016-1521-6.
4. Krainov A.Yu., Moiseeva K.M. (2016) Combustion of the coal-methane-air mixture in the heat recovery burner. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2(41). pp. 65–73. DOI: 10.17223/19988621/41/7.
5. Frank-Kamenetskiy D.A. (1987) *Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoy kinetike* [Diffusion and Heat Transfer in Chemical Kinetics]. Moscow: Nauka.
6. Isachenko I.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. (1975) *Heat Transmission*. Moscow: Energiya.
7. Vasil'ev A.A., Pinaev A.V., Trubitsyn A.A., et al. (2017) What is burning in coal mines: methane or coal dust? *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 53(1). pp. 8–14. DOI: 10.1134/S0010508217010026.