

УДК 536.46
DOI 10.17223/19988621/41/7

А.Ю. Крайнов, К.М. Монсеева

ГОРЕНИЕ УГЛЕ-МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ГОРЕЛКЕ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ТЕПЛА¹

Сформулирована математическая постановка задачи горения угле-метано-воздушной смеси в щелевой горелке с инертной внутренней вставкой. Определена граница устойчивого горения угле-метано-воздушной смеси с содержанием метана 2 % по объему в щелевой горелке с инертной внутренней вставкой в зависимости от скорости подачи смеси. Определено влияние размеров частиц на границу устойчивости горения.

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

Проблема сжигания бедных (с низким содержанием горючего) газовых смесей в горелочных устройствах находится в зоне внимания современной физики горения и взрыва и актуальна для задач современной энергетики. В частности, задача эффективного сжигания бедных метановоздушных смесей возникает в процессах дегазации угольных пластов и проветривания шахт. Исследования по проблеме расширения концентрационных пределов воспламеняемости газов, эффективному сжиганию бедных газовых смесей и полезной утилизации шахтного метана привлекают внимание крупных специалистов из научных институтов России и зарубежья. Так, в работе [1] предложено поддерживать горение бедных смесей за счет теплообмена газа с пористым фильтрующим слоем. В [2] проанализирована устойчивость горения газовых смесей в противоточной горелке и показано, что при горении смеси во встречных потоках расширяются концентрационные пределы существования пламени. Авторами [3, 4] проведены исследования особенностей горения газовых смесей в U-образных горелках с рекуперацией тепла. Для случая горения газовой смеси в U-образной трубке определены верхнее и нижнее значения скорости подачи смеси, при которых становится невозможно поддерживать устойчивое горение. В работе [5] представлены результаты исследования горения бедных метановоздушных смесей в щелевой горелке с внутренней вставкой. Показано, что за счет тепловой рекуперации возможно организовать и поддерживать горение метано-воздушной смеси с содержанием метана не ниже 2.3 %, в то время как в обычных условиях для поддержания горения требуется не менее 5.2 % метана в смеси [6].

Метановоздушная смесь, являющаяся продуктом шахтного производства, содержит в себе частицы угольной пыли, которые могут существенно повлиять на характеристики горения смеси. В работе [7] экспериментально и аналитически показано, что горение газозвеси воздух – уголь при нормальных условиях невозможно без добавления небольшого количества метана либо без предварительного подогрева стенок реакционного сосуда. Добавка метана в смесь воздух – уголь

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 16-38-00188 мол_a.

приводит к стабилизации фронта пламени. Авторами [8] проведено моделирование зажигания и распространения пламени в гибридной газозвеси, являющейся аналогом взвеси частиц угольной пыли в метановоздушной смеси. Получены закономерности распространения фронта горения в зависимости от свойств дисперсной фазы и концентрации газового горючего в газовой смеси. В [7, 8] упор сделан на определение критических условий возникновения опасных ситуаций в угольных шахтах. Однако присутствие реагирующих частиц может оказаться полезным для поддержания горения бедных метановоздушных смесей.

В настоящей работе выполнено численное исследование задачи горения метановоздушной смеси со взвешенной угольной пылью в щелевой горелке с инертной внутренней вставкой. Постановка задачи основана на физико-математических постановках [5, 8]: учитывается влияние теплового расширения, зависимость коэффициентов диффузии и теплопроводности от температуры, расход кислорода на две параллельные реакции: в газовой фазе и на поверхности частиц. Целью работы является определение условий устойчивого горения угле-метано-воздушной смеси с содержанием метана 2 % по объему.

Модель горелки соответствует работе [5] и представляет собой щелевую горелку с внутренней вставкой. Холодная угле-метано-воздушная смесь с массовым содержанием метана $a_{\text{CH}_4, \text{v}}$, массой частиц угля $\rho_{k, \text{v}}$ и температурой газовой фазы $T_{g, \text{v}}$ подается со скоростью u_v в предварительно разогретую щелевую горелку со стороны $x = 0$. Смесь проходит через верхнюю часть горелки и на границе $x = L$ меняет направление движения, на границе $x = 2L$ газ вытекает. Протекая через устройство, реакционная смесь обменивается теплом с внутренней вставкой по закону Ньютона с коэффициентом теплообмена α . Предполагается, что внешние стенки горелки теплоизолированы.

При постановке задачи приняты следующие допущения: расход реакционной смеси через входное сечение щелевой горелки постоянен; учитывается распределение температуры смеси и выгорание только вдоль направления движения смеси; температура в поперечном направлении внутренней вставки считается однородной; давление в горелке постоянно. В уравнении изменения плотности окислителя учитывается расход окислителя на две реакции: гетерогенную на поверхности частиц и гомогенную в газе. Экзотермические химические реакции в газе определяются по закону Аррениуса с кинетикой второго порядка. Гетерогенная реакция на частицах задается реакцией первого порядка.

С учетом сделанных допущений математическая постановка задачи имеет следующий вид:

Уравнение энергии для газовой фазы:

$$c_g \rho_g \frac{\partial T_g}{\partial t} + c_g \rho_g u \frac{\partial T_g}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T_g) \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) + \frac{\alpha_s}{h} (T_{1, s} - T_g)_k + G c_k T + \alpha_k n_k S_k (T_k - T_g) + Q_1 \rho_g^2 a_{\text{CH}_4} a_{\text{O}_2} k_{01} \exp \left(-\frac{E_1}{R_u T_g} \right),$$

$$T_{1, s}(x, t) = \begin{cases} T_s(x, t), & x < L, \\ T_s(2L - x, t), & x \geq L. \end{cases} \quad (1)$$

Уравнение энергии для внутренней перегородки:

$$c_s \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} - \frac{\alpha_s}{h_s} (T_s - T_g(x, t)) - \frac{\alpha_s}{h_s} (T_s - T_g(2L - x, t)). \quad (2)$$

Уравнение энергии для частиц:

$$c_k \rho_k \frac{\partial T_k}{\partial t} + u c_k \rho_k \frac{\partial T_k}{\partial x} = \alpha_k S_k n_k (T_g - T_k) + Q_2 G - G c_k T_k. \quad (3)$$

Уравнение баланса массы метана в смеси:

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

Уравнение баланса массы окислителя в смеси:

$$\frac{\partial a_{\text{O}_2}}{\partial t} + u \frac{\partial a_{\text{O}_2}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(T_g) \frac{\partial a_{\text{O}_2}}{\partial x} \right) - \frac{\mu_{\text{O}_2} \nu_{\text{O}_2}}{\mu_{\text{CH}_4} \nu_{\text{CH}_4}} k_{01} \rho_g a_{\text{CH}_4} a_{\text{O}_2} \exp \left(-\frac{E_1}{R_u T_g} \right) - \frac{G}{\rho_g}. \quad (5)$$

Уравнение состояния идеального газа:

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

Уравнение неразрывности для газа:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_g u)}{\partial x} = G. \quad (7)$$

Уравнение баланса массы частиц:

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_k u)}{\partial x} = -G. \quad (8)$$

Уравнение счетной концентрации частиц:

$$\frac{\partial n_k}{\partial t} + \frac{\partial n_k u}{\partial r} = 0. \quad (9)$$

Уравнение изменения радиуса частиц:

$$r_k = \sqrt[3]{\frac{3 \rho_k}{4 \pi \rho_k^0 n_k}}. \quad (10)$$

Начальные условия:

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

Граничные условия:

$$\begin{aligned} T_g(0, t) &= T_{g,v}, \quad T_k(0, t) = T_{k,v}, \quad a_{\text{CH}_4}(0, t) = a_{\text{CH}_4,v}, \quad a_{\text{O}_2}(0, t) = a_{\text{O}_2,v}, \\ u(0, t) &= u_v, \quad \rho_k(0, t) = \rho_{k,v}, \quad n_k(0, t) = \frac{\rho_{k,v}}{V_k \rho_k^0}, \quad \frac{\partial T_s(0, t)}{\partial x} = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

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

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

Здесь $\lambda = \lambda_{st} \left(\frac{T}{T_v} \right)^s$ – коэффициент теплопроводности газа, $D = D_{st} \left(\frac{T}{T_v} \right)^s$ – коэффициент диффузии газа, $\alpha_s = \frac{\lambda Nu_s}{h}$ – коэффициент теплообмена газа со стенками внутренней вставки, $\alpha_k = \frac{\lambda Nu_g}{r_k}$ – коэффициент теплообмена газа с частицами, $G = n_k S_k j_1 \rho_{O_2}$, $j_1 = \frac{\beta_m k_{02} \exp(-E_2/R_u T_k)}{\beta_m + k_{02} \exp(-E_2/R_u T_k)}$ – скорость гетерогенной реакции на частицах, $\beta_m = \frac{\lambda_g(T) Nu_D}{c_g \rho_g r_k}$ коэффициент массоотдачи частиц [9]. Коэффициент теплообмена газа с внутренней вставкой вычислялся из значения числа Нуссельта, Nu_s , [5]:

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

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

числа Нуссельта, соответствующее значению $\frac{h Re Pr}{x} = 1000$, Nu_D – диффузионный

аналог числа Нуссельта. 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; u – скорость; h – ширина канала горелки; h_1 – ширина внутренней вставки, v_{CH_4} – количество молей метана в реакции; v_{O_2} – количество молей кислорода 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 $T_g = 300$ K, 1 – параметры реакции в газовой фазе, 2 – параметры реакции на поверхности частиц.

Задача (1) – (14) решалась численно. Уравнения энергии (1), (2) и уравнения баланса массы метана (4) и кислорода (5) решались конечно-разностным методом с использованием преобразования Самарского со вторым порядком точности. Уравнения неразрывности газа (7), энергии (3), счетной концентрации (9) и баланса массы частиц (8) решались явно с использованием конечных разностей про-

тив потока. Шаг по пространству задавался аналогично [5] 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 метановоздушной смеси с частицами радиуса 10^{-7} м при скорости подачи смеси 0.23 м/с и массе пыли в единице объема $\rho_{k,b} = 7 \cdot 10^{-5}$ кг/м³. Начальное условие соответствовало существованию фронта горения в слабо запыленной метановоздушной смеси. В расчетах полагалось, что начальное условие вытесняется более запыленным газом с меньшим содержанием метана. На рис. 1 представлены температурные профили, соответствующие начальному условию.

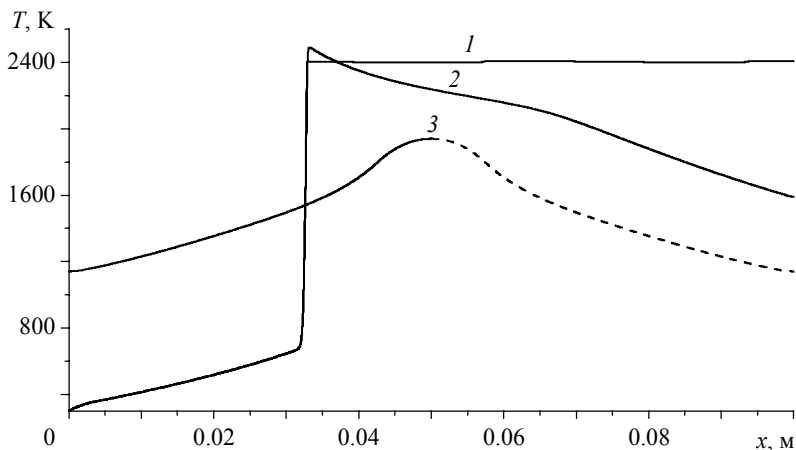


Рис. 1. Распределения температуры частиц (кр. 1), газа (кр. 2) и внутренней стенки (кр. 3) по пространству, соответствующие начальному условию (11)

Fig. 1. Distribution of the temperature of particles (curve 1), gas (curve 2), and inner wall (curve 3) in the space according to the initial condition (11)

Расчеты проводились для параметров [5]:

$$\begin{aligned} Q_1 &= 55.7 \text{ МДж/кг}, Q_2 = 29 \text{ МДж/кг}, E_1 = 239 \text{ кДж/моль}, E_2 = 135 \text{ кДж/моль}, \\ k_{01} &= 1.125 \cdot 10^{12} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}), k_{02} = 7.9 \cdot 10^4 \text{ м/с}, R_u = 8.31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}), \\ R_g &= 296.8 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), c_g = 1065 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), c_k = 1464.4 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \\ c_s &= 687 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \lambda_{g,st} = 0.025 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}), \lambda_s = 30.04 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}), \rho_{g,st} = 1.179 \text{ кг/м}^3, \\ \rho_s &= 7500 \text{ кг/м}^3, \rho_k^0 = 1400 \text{ кг/м}^3, s = 2/3, D_v = 1.992 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}, p = 0.10132 \text{ МПа}, \\ \eta &= 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}, \mu_{\text{CH}_4} = 16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}, \mu_{\text{O}_2} = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}, T_{g,b} = 300 \text{ К}, \\ T_{k,b} &= 300 \text{ К}, a_{\text{O}_2,b} = 0.208, Nu_g = 1, Nu_D = 1. \end{aligned}$$

Массовое содержание метана на входе в горелку $a_{\text{CH}_4,b} = 0.011$ (соответствует объемному содержанию метана $a_{\text{CH}_4,\text{vol}} = 2\%$). Геометрические характеристики щелевой горелки: размер щели $h = 6 \cdot 10^{-3}$ м, толщина вставки $h_1 = 2 \cdot 10^{-4}$ м, общая протяженность канала $2L = 0.1$ м. Масса угольной пыли на единицу объема задавалась равной $\rho_{k,b} = 0.054$ кг/м³, при такой массе частиц адиабатическая температура горения смеси не превышает 2000 К:

$$T_{g,\text{ad}} = T_{g,b} + \frac{Q_1 \rho_{g,st} a_{\text{CH}_4,\text{vol}} + Q_2 \rho_{k,b}}{c_g \rho_{g,st} + c_k \rho_{k,b}} < 2000 \text{ К}.$$

Размер частиц варьировался в диапазоне от 0.1 до 10 мкм, $r_k = 10^{-7} - 10^{-5}$ м. Скорость подачи газа на входе в горелку варьировалась в диапазоне $u_{g,b} = 0.1 - 0.5$ м/с. Результаты расчетов представлены на рис. 2 – 4.

На рис. 2 показано изменение положения фронта горения x_f во времени при различных скоростях подачи газа u_b и радиусах частиц r_k . Координата фронта горения определялась как значение координаты x , где концентрация метана равна половине концентрации на входе в горелку. На рис. 3 представлены распределения температуры газа в горелке после установления. Кривые на рис. 3 соответствуют

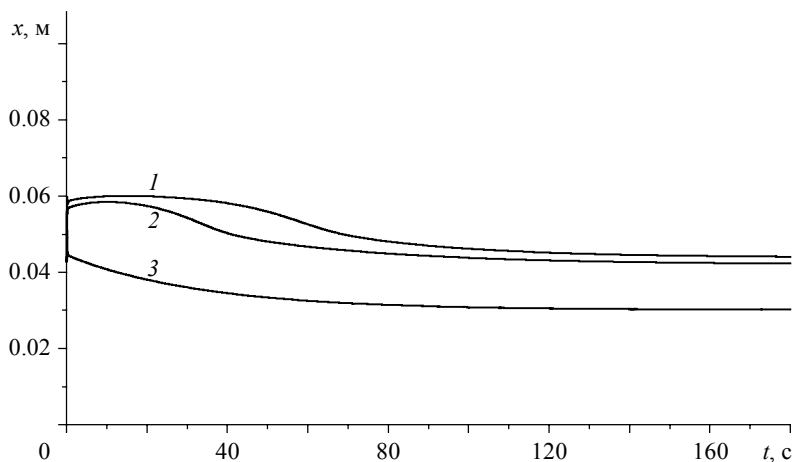


Рис. 2. Зависимость положения фронта горения от времени: 1 – $u_b = 0.35$ м/с, $r_k = 2 \cdot 10^{-7}$ м; 2 – $u_b = 0.24$ м/с, $r_k = 2 \cdot 10^{-6}$ м; 3 – $u_b = 0.25$ м/с, $r_k = 10^{-6}$ м

Fig. 2. Dependence of the flame front position on time: 1 – $u_b = 0.35$ м/с, $r_k = 2 \cdot 10^{-7}$ м; 2 – $u_b = 0.24$ м/с, $r_k = 2 \cdot 10^{-6}$ м; 3 – $u_b = 0.25$ м/с, $r_k = 10^{-6}$ м

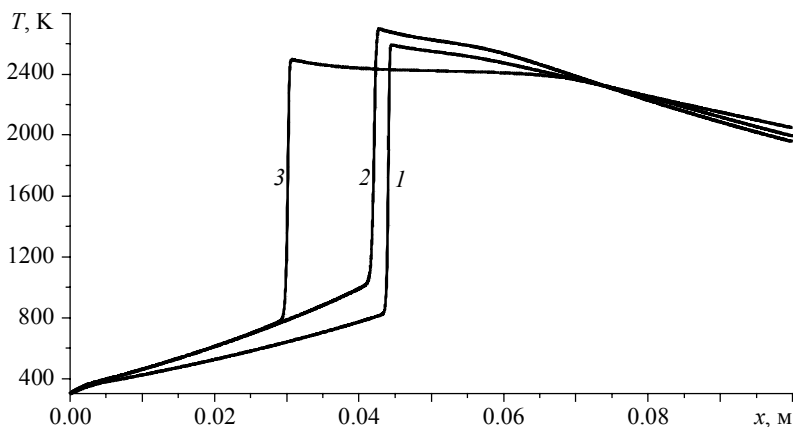


Рис. 3. Распределения температуры газа по траектории течения газа: 1 – $u_b = 0.35$ м/с, $r_k = 2 \cdot 10^{-7}$ м; 2 – $u_b = 0.24$ м/с, $r_k = 2 \cdot 10^{-6}$ м; 3 – $u_b = 0.25$ м/с, $r_k = 10^{-6}$ м

Fig. 3. Distributions of the gas temperature along the trajectory of the gas flow: 1 – $u_b = 0.35$ м/с, $r_k = 2 \cdot 10^{-7}$ м; 2 – $u_b = 0.24$ м/с, $r_k = 2 \cdot 10^{-6}$ м; 3 – $u_b = 0.25$ м/с, $r_k = 10^{-6}$ м

кривым рис. 2. Максимальная температура газа на рис. 3 превышает адиабатическое значение, это объясняется тепловой рекуперацией. За счет подогрева через внутреннюю вставку газ на входе в горелку повышает начальную температуру, что приводит к увеличению адиабатической температуры.

Кривые 1, 2 на рис. 2 соответствуют предельным случаям устойчивого горения смеси по скорости подачи. Это значит, что малое увеличение скорости подачи газа u_b для выбранных размеров частиц r_k приводит к вытеснению фронта горения за пределы горелки. Из расчетов, путем варьирования параметров r_k и u_b , была определена граница устойчивого горения угле-метано-воздушной смеси в координатах $(r_k, u_{g,b})$. Граница устойчивого горения представлена на рис. 4. Область выше кривой на рис. 4 соответствует области затухания горения, область под кривой – режиму распространения пламени. Точки 1, 2, 3 на рис. 4 соответствуют кривым рис. 3. Точка 3 на рис. 4 находится в области устойчивого горения, точки 1 и 2 – вблизи кривой, определяющей границу устойчивого горения.

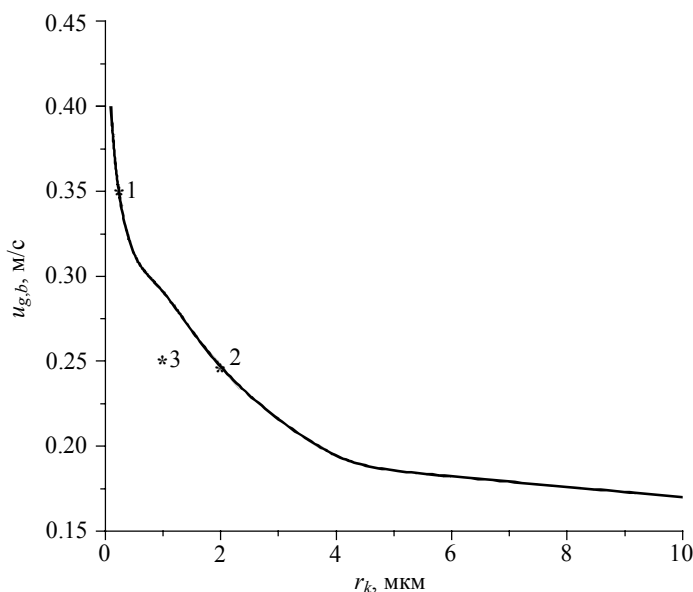


Рис. 4. Граница устойчивого режима горения угле-метано-воздушной смеси

Fig. 4. Boundary of the stable mode of coal-methane-air mixture combustion

Согласно рис. 4, с увеличением радиуса частиц уменьшается максимальное значение скорости подачи газа на входе в горелку, для которого возможно установление устойчивого режима горения. Это объясняется тем, что с увеличением размеров частиц увеличивается время, необходимое для прогрева частицы до температуры начала химической реакции. И при одной и той же скорости подачи смеси на входе в горелку мелкие частицы успевают прогреться и вступают в реакцию, более крупные частицы не успевают нагреться до температуры реакции, и свежая смесь вытесняет существующий фронт горения (определенный начальным условием (11)) за пределы горелки.

Выводы

Выполнено численное исследование горения угле-метано-воздушной смеси в горелке с рекуперацией тепла. Показано, что за счет тепловой рекуперации и за счет присутствия реагирующих частиц возможно поддержание устойчивого горения смеси с объемным содержанием метана 2 %. Полученный результат демонстрирует возможность расширения пределов воспламеняемости и горения метано-воздушных смесей по сравнению с известными литературными данными о горении метана в обычных условиях. Показано влияние размеров частиц на характер горения угле-метано-воздушной смеси. Согласно полученным результатам, для крупных частиц характерно существенное влияние недостаточного содержания метана в смеси. И наоборот, мелкие частицы компенсируют недостаток метана в газе и позволяют поддержать устойчивое горение угле-метано-воздушной смеси в широком диапазоне скорости подачи газа на входе в горелку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Какуткина Н.А., Коржавин А.А., Манжос Е.В., Рычков А.Д., Вьюн А.В. Иницирование горения газа в пористой среде внешним источником // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. № 2(5). С. 189–196.
2. Фурсенко Р.В., Минаев С.С. Устойчивость пламени в системе с противоточным теплообменом // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41. № 2. С. 17–25.
3. Ronney P.D. Analysis of non-adiabatic heatrecirculating combustors // Combust. Flame. 2003. V. 135. No. 4. P. 421–439.
4. Крайнов А.Ю., Моисеева К.М. Влияние скорости подачи газа на устойчивость горения метановоздушной смеси в щелевой горелке с внутренней вставкой // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2015. № 1(33). С. 63–71
5. Крайнов А.Ю., Моисеева К.М. Горение бедных метановоздушных смесей в щелевой горелке с адиабатическими внешними стенками // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52. № 1. С. 45 – 52.
6. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. М.: Мир, 1968.
7. Bradley D., Lawes M., Scott M. J., Usta N. The Structure of coal-air-CH₄ laminar Flames in a low-Pressure burner: CARS measurements and modeling studies // Combust. Flame. 2001. V. 124. No. 1-2. P. 82–105.
8. Крайнов А.Ю. Моделирование распространения пламени в смеси горючих газов и частиц // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36. № 2. С. 3–9.
9. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987.

Статья поступила 05.03.16 г.

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

In this article, the research of the combustion of methane-air mixture with coal dust particles in the heat recovery burner is performed. The burner consists of two parallel plates with a thin internal partition (U-shaped burner). The mixture which flows into the inlet is warmed up via the thin internal partition by heat reaction products from the outlet.

The mathematical statement of the problem includes the equations of energy conversation for gas, coal particles, and internal partition, mass balance equations of methane, oxygen and coal particles, continuity equation, particle number concentration equation, particle size equation, and gas equation. The numerical simulation is carried out using an implicit difference scheme with a four-point template.

The coal dust particle size and the gas flow rate at the inlet varied for each calculation. The stability boundary of the coal-methane-air mixture combustion is determined as a function of the inlet rate of gas depending on coal-dust particle size. The obtained results demonstrate that the heat recovery and coal dust particles burning can support the combustion of full lean methane-air mixtures.

Keywords: coal-methane-air mixture, monodisperse coal dust, slot burner, lean methane-air mixture, stable combustion.

KRAINOV Aleksey Yurevich (Doctor of Physics and Mathematics, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)

E-mail: akrainov@ftf.tsu.ru

MOISEEVA Ksenia Mikhaylovna (Candidate of Physics and Mathematics, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)

E-mail: Moiseeva_KM@t-sk.ru

REFERENCES

1. Kakutkina N.A., Korzhavin A.A., Manzhos E.V., et al. (2013) Initsirovanie goreniya gaza v poristoy srede vneshnim istochnikom [Initiation of gas combustion in a porous medium with an external source]. *Interesko Geo-Sibir'*. 2(5). pp. 189–196.
2. Fursenko R.V. and Minaev S.S. (2005) Flame stability in a system with counter flow heat exchange. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 41(2). pp. 133–139. DOI 10.1007/s10573-005-0015-1.
3. Ronney P.D. (2003) Analysis of non-adiabatic heatrecirculating combustors. *Combust. Flame*. 135(4). pp. 421–439.
4. Krainov A.Yu., Moiseeva K.M. (2015) Rezhimy goreniya bednoy metanovozdushnoy smesi v U-obraznoy gorelke [The influence of gas flow rate on the methane-air mixture burning in a flat burner with an inert body]. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2(28). pp. 69–76.
5. Krainov A.Yu., Moiseeva K.M. (2016) Combustion of lean methane-air mixtures in a slot burner with adiabatic outer walls. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 52(1). pp. 45–52. DOI 10.1134/S0010508216010068.
6. Lewis B. and Von Elbe G. (1987) *Combustion, Flames and Explosions of Gases*. Academic Press, Harcourt Brace Jovanovich Publ.
7. Bradley D., Lawes M., Scott M.J., Usta N. (2001) The Structure of coal-air-CH₄ laminar Flames in a low-Pressure burner: CARS measurements and modeling studies. *Combust. Flame*. 124(1-2). pp. 82–105.
8. Krainov A.Yu. (2000) Modeling of flame propagation in a mixture of combustible gases and particles. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 36(2). pp. 157–163. DOI 10.1007/BF02699353.
9. Frank-Kamenetskiy D.A. (1987) *Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoy kinetike* [Diffusion and Heat Transfer in Chemical Kinetics]. Moscow: Nauka.