

УДК: 533.6.011.72

Влияние состава угольной пыли на скорость распространения фронта горения по аэровзвеси с неоднородным распределением частиц

К. М. Моисеева^а, А. Ю. Крайнов

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

E-mail: ^аMoiseeva_KM@t-sk.ru

Получено 01.02.2018, после доработки — 12.03.2018.

Принято к публикации 15.03.2018.

Задача горения газовой взвеси с неоднородным распределением частиц по пространству возникает, например, при сжигании взвеси угольной пыли в камерах сгорания энергетических установок и горелок. Неоднородное распределение частиц по пространству может существенно повлиять на скорость распространения фронта пламени по аэровзвеси угольной пыли. Представляют интерес исследование закономерности распространения фронта горения в газовой взвеси при неравномерном распределении концентрации реагирующих частиц в воздухе, а также определение зависимости скорости распространения фронта горения от свойств угольной пыли и неоднородности пространственного ее распределения. Целью настоящей работы является численное исследование влияния неоднородного распределения частиц, а также состава аэровзвеси на скорость распространения фронта горения по аэровзвеси угольной пыли.

Разработана физико-математическая модель горения аэровзвеси угольной пыли с неоднородным распределением частиц угольной пыли по пространству. Физико-математическая постановка задачи учитывает выход горючих летучих компонентов из частиц при их нагреве, последующее реагирование летучих компонентов с воздухом, гетерогенную реакцию на поверхности частиц, зависимость коэффициента теплопроводности газа от температуры. Решение задачи проведено численно.

Проведено параметрическое исследование влияния массовой концентрации, содержания летучих компонентов и размера частиц угольной пыли на скорость горения взвеси угольной пыли в воздухе. Показано, что скорость горения больше для частиц с меньшим содержанием летучих компонентов. Сравнение скорости горения для частиц разного радиуса показало, что чем больше радиус частиц, тем меньше скорость горения аэровзвеси. Определено, что частицы с большей массовой концентрацией горят быстрее.

Проведен анализ влияния пространственного распределения частиц на скорость горения аэровзвеси. Показано, что скорость распространения фронта горения по аэровзвеси с неоднородным распределением частиц выше скорости распространения фронта горения по аэровзвеси с однородным распределением частиц. Показано, что неоднородное распределение частиц приводит к искривлению фронта горения. Чем меньше радиус частиц, тем сильнее искривляется фронт горения.

Ключевые слова: аэровзвесь, горение, выделение летучих компонентов, скорость распространения пламени

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 16-33-60091 мол_а_дк.

UDC: 533.6.011.72

The influence of the coal dust composition on the propagation speed of the combustion front of the coal dust with an inhomogeneous particle distribution in the air

K. M. Moiseeva^a, A. Yu. Krainov

Tomsk State University,
36 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia

E-mail: ^aMoiseeva_KM@t-sk.ru@

*Received 01.02.2018, after completion — 12.03.2018.
Accepted for publication 15.03.2018.*

The problem of the combustion of a gas suspension with an inhomogeneous distribution of particles over space occurs exists for the coal dust suspension combustion in combustion chambers and burners. The inhomogeneous distribution of particles in space can significantly affect the combustion velocity of the aerosolve of coal dust. The purpose of the present work is the numerically study the effect of the inhomogeneous distribution of particles and the composition of the coal dust on the combustion velocity of the coal dust in the air.

The physical and mathematical model of combustion of air-coal dust mixture with an inhomogeneous distribution of coal dust particles over space has been developed. The physical and mathematical formulation of the problem took into account the release of combustible volatile components from the particles upon their heating, the subsequent reaction of volatile components with air, a heterogeneous reaction on the surface of the particles, and the dependence of the thermal conductivity of the gas on temperature.

A parametric study was made of the effect of mass concentration, the content of volatile and the particle size of coal dust on the burning speed of a suspension of coal dust in the air. It is shown that the burning rate is greater for particles with a lower content of volatile components. The influence of the spatial distribution of particles on the burning rate of the coal-air mixture is analyzed. It is shown that the propagation velocity of the combustion front with respect to the suspension with an inhomogeneous particle distribution is higher than the propagation speed of the combustion front with respect to the suspension with a homogeneous particle distribution.

Keywords: aerosol of coal dust, combustion, distillation, burning velocity

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2018, vol. 10, no. 2, pp. 221–230 (Russian).

The work was supported by the Russian Science Foundation grant no. 16-33-60091 mol_a_dk.

1. Введение

Настоящая работа посвящена исследованию скорости горения аэрозвеси угольной пыли. Известно, что скорость горения взвесей определяется характеристиками угольной пыли, такими как размер и массовая концентрация частиц в воздухе, содержание горючих летучих компонентов в частицах, содержание инертных и реагирующих примесей в смеси. Например, в работах [Корольченко, 1986; Нецепляев и др., 1992] было показано влияние состава аэрозвеси угольной пыли на характеристики зажигания и горения аэрозвеси. Было экспериментально определено, что минимальная энергия воспламенения аэрозвеси угольной пыли зависит от массовой концентрации пыли и содержания горючих компонентов в газе. В работах [Валиулин и др., 2016; Бакланов и др., 2015] показано, что наноаэрозоль угольной пыли в примеси к бедной метано-воздушной смеси повышает скорость роста давления в сосуде по сравнению с чисто газовой бедной метано-воздушной смесью. Влияние размера частиц на скорость распространения фронта горения проанализировано в работах [Крайнов, 2000; Rockwell, Rangwala, 2013; Дементьев и др., 2016]. Показано, что в случае малых начальных концентраций горючего компонента в газе присутствие в газовой смеси реагирующих частиц увеличивает скорость распространения фронта горения. При значении концентрации горючего компонента в газе, близкой к стехиометрической, частицы уменьшают скорость пламени. В работе [Крайнов и др., 2016] показано влияние состава смеси на скорость роста давления в замкнутом сосуде. Численно определено, что при малых массовых концентрациях угольной пыли увеличение процентного содержания летучих компонентов в смеси приводит к увеличению максимального давления в объеме. При больших массовых концентрациях угольной пыли с увеличением процентного содержания летучих компонентов в пыли величина максимального давления уменьшается.

Задача горения газозвеси с неоднородным распределением частиц по пространству возникает, например, при сжигании взвеси угольной пыли в камерах сгорания энергетических установок и горелок. Неоднородное распределение частиц по пространству может существенно повлиять на скорость распространения фронта пламени по аэрозвеси угольной пыли. Практический интерес решения поставленной задачи заключается в предсказании поведения фронта горения в технологических процессах, таких как горение угольной пыли в топках, определение зависимости скорости распространения фронта горения от свойств угольной пыли и неоднородности пространственного ее распределения.

Целью настоящей работы является численное исследование влияния неоднородного распределения частиц, а также состава аэрозвеси на скорость распространения фронта горения по аэрозвеси угольной пыли.

2. Математическая модель

Решается задача о горении аэрозвеси угольной пыли с неравномерным распределением частиц угольной пыли с размером частиц r_k , содержанием летучей компоненты V_C . Закон распределения частиц по оси y (поперек направления распространения фронта горения) описывается зависимостью $\rho_k(y) = m_{dust}(1 + \sin(\pi y / L_y))$, $0 \leq y \leq L_y$, где m_{dust} соответствует минимальной массовой концентрации частиц вдоль оси y на заданном интервале. Распределение частиц по направлению x однородно. Задача решается в двухмерной плоской постановке. Постановка задачи учитывает выделение летучих компонентов, горение частиц и горение летучих компонентов. Коэффициенты диффузии и теплопроводности зависят от температуры [Дементьев и др., 2016]. Частицы неподвижны. В уравнении изменения плотности окислителя учитывается расход окислителя на две реакции: гетерогенную на поверхности частиц и гомогенную в газе. Выход летучих компонентов из частиц задается реакцией первого порядка по закону Аррениуса. Выделившиеся летучие компоненты переходят в газ и способны к химическому реагированию с окислителем. Скорость гомогенной реакции между газообразными летучими компонентами и кислородом определяется реакцией второго порядка по закону Аррениуса (первой

по кислороду и горючему компоненту). На поверхности частиц протекает гетерогенная реакция первого порядка по кислороду. Скорость гетерогенной химической реакции на частицах описывается с учетом массоотдачи [Франк-Каменецкий, 1987]. При постановке задачи полагается, что температура внутри частицы однородна. Для заданных допущений математическая постановка задачи имеет следующий вид:

уравнение теплопроводности для газа:

$$c_g \rho_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T_g) \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T_g) \frac{\partial T_g}{\partial y} \right) + \alpha_k n_k S_k (T_k - T_g) + c_k T_k (G_2 + G_3) + Q_1 \rho_{O_2} \rho_{gl} k_{01} \exp(E_1 / RT_g); \quad (1)$$

уравнение энергии для частиц:

$$c_k \rho_k \frac{\partial T_k}{\partial t} = -\alpha_k n_k S_k (T_k - T_g) - c_k T_k (G_2 + G_3) + Q_2 G_2 - Q_3 G_3; \quad (2)$$

уравнение парциальной плотности окислителя в газе:

$$\frac{\partial \rho_{O_2}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(T_g) \frac{\partial \rho_{O_2}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D(T_g) \frac{\partial \rho_{O_2}}{\partial y} \right) - \alpha_2 G_2 - \alpha_1 \rho_{O_2} \rho_{gl} k_{01} \exp(E_1 / RT_g); \quad (3)$$

уравнение парциальной плотности летучих компонентов в газе:

$$\frac{\partial \rho_{gl}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(T_g) \frac{\partial \rho_{gl}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D(T_g) \frac{\partial \rho_{gl}}{\partial y} \right) + G_3 - \rho_{O_2} \rho_{gl} k_{01} \exp(E_1 / RT_g); \quad (4)$$

уравнение баланса массы частиц:

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} = -G_2 - G_3; \quad (5)$$

уравнение баланса массы летучих компонентов в частицах:

$$\frac{\partial \rho_{kl}}{\partial t} = -G_3; \quad (6)$$

уравнение баланса массы смеси:

$$\frac{d}{dt} (\rho_g + n_k \rho_k) = 0. \quad (7)$$

Начальные условия:

$$\begin{aligned} T_g(0, x, y) &= T_b + T_{hot} \exp(-x / L_{hot}), \quad T_k(0, x, y) = T_b, \quad \rho_{O_2}(0, x, y) = \rho_{O_2, b}, \quad \rho_{gl}(0, x, y) = 0, \\ \rho_g(0, x, y) &= \rho_{gb}, \quad r_k(0, x, y) = r_{kb}, \quad \rho_k(0, x, y) = m_{dust} (1 + \sin(\pi y / L_y)), \\ \rho_{kl}(0, x, y) &= \rho_k^0 V_k V_c (1 + \sin(\pi y / L_y)), \quad n_k(0, x, y) = \rho_k / (V_k \rho_k^0). \end{aligned} \quad (8)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} x=0: \quad \frac{\partial T_g(t, 0, y)}{\partial x} &= \frac{\partial \rho_{O_2}(t, 0, y)}{\partial x} = \frac{\partial \rho_{gl}(t, 0, y)}{\partial x} = 0, \\ x=L_x: \quad \frac{\partial T_g(t, L_x, y)}{\partial x} &= \frac{\partial \rho_{O_2}(t, L_x, y)}{\partial x} = \frac{\partial \rho_{gl}(t, L_x, y)}{\partial x} = 0, \\ y=0: \quad \frac{\partial T_g(t, x, 0)}{\partial y} &= \frac{\partial \rho_{O_2}(t, x, 0)}{\partial y} = \frac{\partial \rho_{gl}(t, x, 0)}{\partial y} = 0, \\ y=L_y: \quad \frac{\partial T_g(t, x, L_y)}{\partial y} &= \frac{\partial \rho_{O_2}(t, x, L_y)}{\partial y} = \frac{\partial \rho_{gl}(t, x, L_y)}{\partial y} = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Для того чтобы обеспечить начало химического процесса, начальная температура газа в (8) задавалась в виде экспоненциальной функции, для которой максимум $T = T_{hot} + T_b$ соответствовал границе $x = 0$, далее температура газа убывает по экспоненциальному закону. В уравнениях (1)–(9) приняты следующие обозначения: ρ_g — плотность газа; ρ_{kl} — распределенная масса частиц на единицу объема; ρ_l — распределенная масса летучих в частицах; ρ_{O_2} — парциальная плотность кислорода; ρ_{gl} — парциальная плотность летучих в газе; t — время; x, y — продольная и поперечная координаты; $r_k = (3(\rho_k - \rho_{kl})/4\pi n_k \rho_k^0 (1 - V_C))^{1/3}$ — радиус частицы; Q — тепловой эффект реакции; k_0 — константа скорости химической реакции; T — температура; E — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная; c_g — удельная теплоемкость газа при постоянном давлении; c_k — удельная теплоемкость частиц угольной пыли; $\lambda(T_g) = \lambda_{st}(T_g/T_b)^{2/3}$ — коэффициент теплопроводности газа; $D(T_g) = \lambda(T_g)/c_g \rho_g$ — коэффициент диффузии газа; $\alpha_k = Nu_k \lambda(T_g)/2r_k$ — коэффициент теплообмена газа с частицами; S_k, V_k — площадь поверхности и объем частицы; $G_2 = n_k S_k j_2 \rho_{O_2}$ — скорость изменения массы частиц при горении, где $j_2 = \beta_m k_{02} \exp(-E_2/R_u T_k) / [\beta_m + k_{02} \exp(-E_2/R_u T_k)]$ — скорость гетерогенной реакции на частицах, $\beta_m = \lambda_g(T) Nu_D / (c_g \rho_g r_k)$ — коэффициент массоотдачи частиц [Франк-Каменецкий, 1987]; $G_3 = n_k V_k j_3$ — скорость изменения массы частиц при выходе летучих, где $j_3 = \rho_{kl} k_{03} \exp(-E_3/RT_k)$ — скорость гетерогенной реакции газификации летучего компонента частиц, V_C — начальное содержание летучего компонента в частице, $\alpha_1 = \mu_{O_2} V_{O_2} / \mu_{gl} V_{gl}$, $\alpha_2 = \mu_{O_2} V_{O_2} / \mu_C V_C$ — коэффициенты расхода кислорода в реакции с выделившимися летучими компонентами и с частицами угольной пыли соответственно; L_x, L_y — граница области расчета по оси x и y , соответственно; ρ_k^0 — собственная плотность частиц. Индексом b отмечены начальные значения параметров состояния, k — параметры частиц, g — параметры газа, kl — параметры летучих компонентов в частицах, gl — параметры летучих компонентов в газе, 1, 2, 3 — индексы для кинетических параметров гомогенной реакции в газе, гетерогенной реакции на поверхности частиц и гетерогенной реакции газификации летучего компонента частиц соответственно.

3. Метод решения и результаты расчетов

Задача (1)–(9) решалась методом продольно-поперечной прогонки [Самарский, 1991]. Достоверность расчетов проверялась путем решения частных постановок задачи. Согласно проверке на адиабатическую температуру сгорания аэрозвеси частиц погрешность расчета составляет не более 3 %. Шаги по пространству были равны $h_y = 3 \cdot 10^{-5}$ м, $h_x = 3 \cdot 10^{-5}$ м. Шаг по времени определялся из условия устойчивости Куранта, $\Delta t < 0.25 \min[h_x^2, h_y^2] c_g \rho_g \lambda(T_g)$. Расчеты проводились для участка $L_y = 0.02$ м, $L_x = 0.06$ м. Предварительно решение задачи было проверено на других расчетных сетках с большим количеством узлов ($h_x = h_y = 2 \cdot 10^{-5}$ м) и/или большей протяженностью расчетной области ($L_y = 0.03, 0.04$ м, $L_x = 0.06, 0.08, 0.1$ м). Результаты решения одной и той же задачи для заданных сеток сравнивались между собой. Строились изолинии температуры и парциальных плотностей компонентов газовой смеси и сравнивались их локальные значения. Результаты показали удовлетворительное согласие, что позволило проводить параметрическое исследование на оптимальной по времени расчета сетке.

Расчеты проводились для следующих параметров [Бойко, 2011; Моисеева, Крайнов, 2017]: $c_g = 1065$ Дж/(кг·К), $Q_1 = 20$ МДж/кг, $k_{01} = 1214.3$ м³/(кг·с), $E_1 = 55.3$ кДж/моль, $\alpha_1 = 3.5$, $k_{02} = 79 \cdot 10^3$ м/с, $E_2 = 135$ кДж/моль, $\alpha_2 = 2.67$, $Q_2 = 20$ МДж/кг, $k_{03} = 5.83 \cdot 10^{15}$ с⁻¹, $E_3 = 209$ кДж/моль, $Q_3 = 0.18$ МДж/кг, $R = 8.31$ Дж/(моль·К), $\lambda_{st} = 0.025$ Вт/(м·К),

$c_k = 1464.4$ Дж/(кг·К), $T_b = 300$ К, $\rho_k^0 = 1400$ кг/м³, $\rho_{O_2,b} = 0.264$ кг/м³, $T_{hot} = 1500$ К. Начальные значения радиуса частиц и массовой концентрации угольной пыли варьировались в диапазоне $r_k = 10^{-6} \div 5 \cdot 10^{-5}$ м и $m_{dust} = 0.06 \div 0.2$ кг/м³, объемное содержание летучих компонентов в газе варьировалось в диапазоне $V_C = 0.1 \div 0.4$. Результаты расчетов представлены на рис. 1–6. Результаты на рис. 1–4 представлены в моменты времени, когда координата фронта горения вдоль линии $y = L_y/2$ соответствовала координатам $x_f = 0.4 L_x$ (a), $0.6 L_x$ (b), $0.8 L_x$ (c). За координату фронта x_f принималась координата x , в которой парциальная плотность кислорода равна половине от начального значения, $\rho_{O_2}(x, L_y) = 0.5 \rho_{O_2,b}$.

На рис. 1 представлено распределение температуры газа по пространству в моменты времени $t = 0.5$ с (поле a), 0.87 с (поле b), 1.52 с (поле c) для частиц размером $5 \cdot 10^{-6}$ м, распределенных по пространству по закону $\rho_k(y) = 0.075(1 + \sin(\pi y / L_y))$ кг/м³, с содержанием летучих $V_C = 0.3$. Так как частицы распределены по пространству неравномерно, то фронт горения имеет изогнутый вид. Увеличение массовой концентрации части до $m_{dust} = 0.1$ кг/м³ приводит к увеличению скорости распространения пламени по аэровзвеси угольной пыли (рис. 2). Например, координаты $x_f = 0.6 L_x$ (b) фронт горения на рис. 1 достигает к моменту времени $t = 0.87$ с, на рис. 2 — к моменту времени $t = 0.72$ с.

Уменьшение процентного содержания летучих компонентов в частицах от $V_C = 0.3$ до $V_C = 0.1$ приводит к увеличению скорости распространения фронта горения (рис. 1, 3). На рис. 3 представлены результаты расчета скорости распространения фронта горения аэровзвеси угольной пыли с размером частиц $5 \cdot 10^{-6}$ м, содержанием летучих компонентов 0.1 по массе, распределенных по пространству по закону $\rho_k(y) = 0.075(1 + \sin(\pi y / L_y))$.

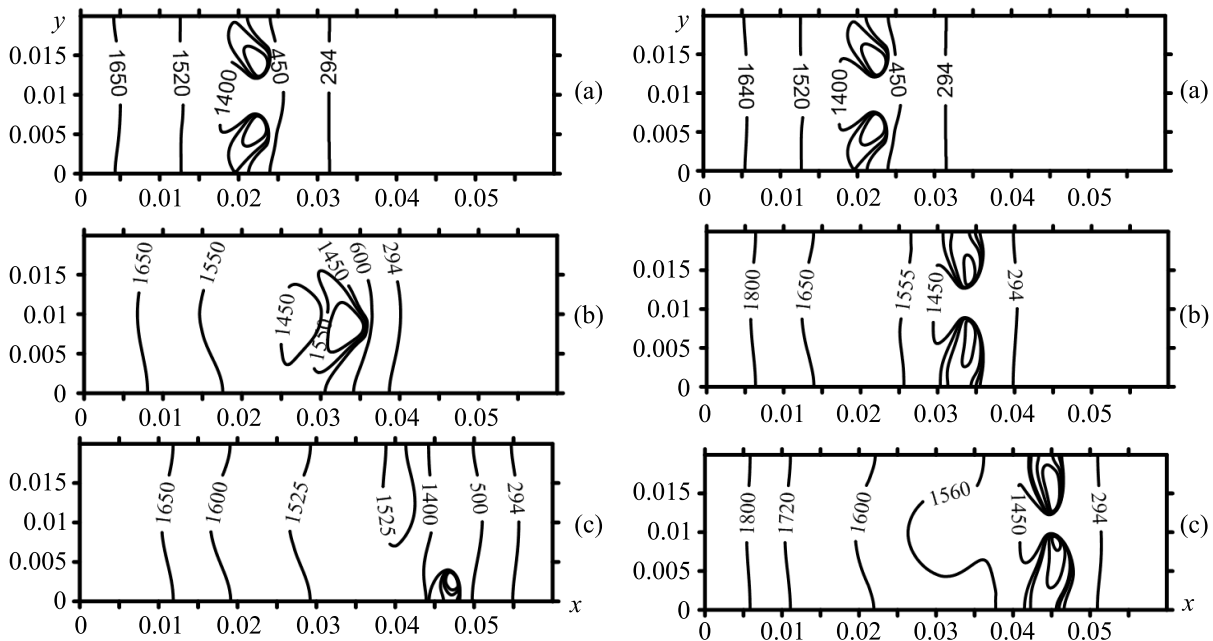


Рис. 1. Распределение температуры газа по пространству для аэровзвеси угольной пыли с массовой концентрацией частиц $m_{dust} = 0.075$ кг/м³, с радиусом частиц $r_k = 5 \cdot 10^{-6}$ м, содержанием летучих компонентов в частицах $V_C = 0.3$. Распределения построены для моментов времени $t = 0.5$ с (поле a), 0.87 с (поле b), 1.52 с (поле c)

Рис. 2. Распределение температуры газа по пространству для аэровзвеси угольной пыли с массовой концентрацией частиц $m_{dust} = 0.1$ кг/м³, с радиусом частиц $r_k = 5 \cdot 10^{-6}$ м, содержанием летучих компонентов в частицах $V_C = 0.3$. Распределения построены для моментов времени $t = 0.38$ с (поле a), 0.72 с (поле b), 1.04 с (поле c)

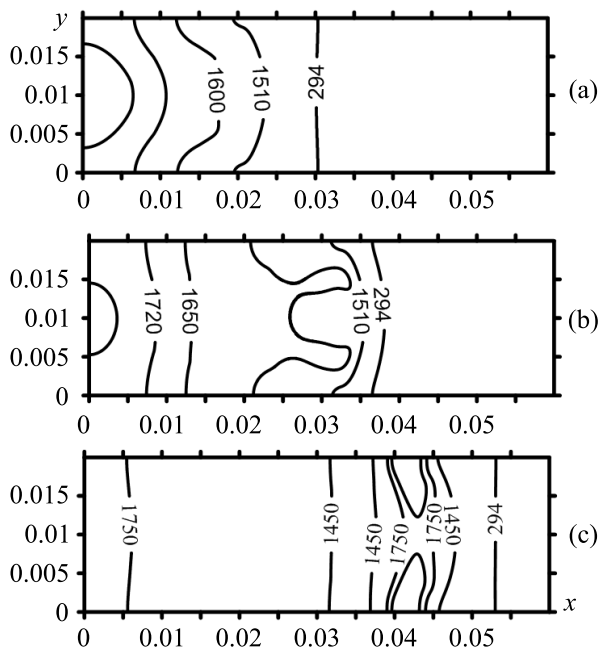


Рис. 3. Распределение температуры газа по пространству для аэрозвеси угольной пыли с массовой концентрацией частиц $m_{dust} = 0.075 \text{ кг/м}^3$, с радиусом частиц $r_k = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, содержанием летучих компонентов в частицах $V_C = 0.1$. Распределения построены для моментов времени $t = 0.22 \text{ с}$ (поле a), 0.38 с (поле b), 0.91 с (поле c)

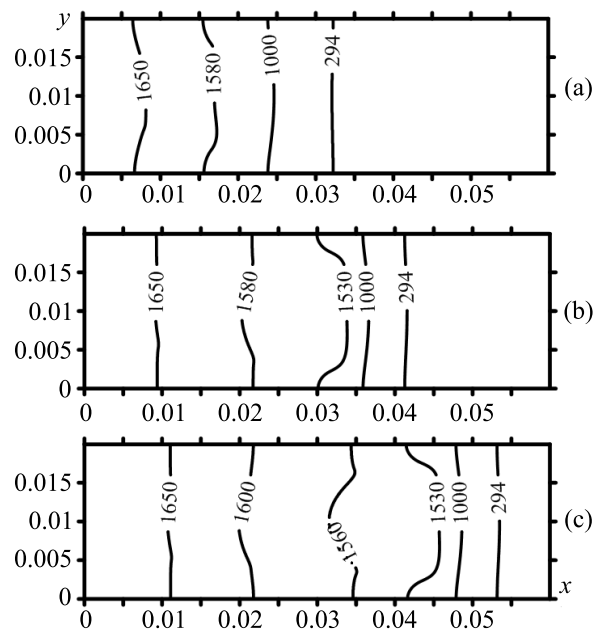


Рис. 4. Распределение температуры газа по пространству для аэрозвеси угольной пыли с массовой концентрацией частиц $m_{dust} = 0.075 \text{ кг/м}^3$, с радиусом частиц $r_k = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, содержанием летучих компонентов в частицах $V_C = 0.1$. Распределения построены для моментов времени $t = 0.66 \text{ с}$ (поле a), 1.08 с (поле b), 1.51 с (поле c)

Увеличение размера частиц от $r_k = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ до $r_k = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ при прочих неизменяемых параметрах приводит к уменьшению скорости распространения фронта горения (рис. 3, 4). Кроме того, увеличение размера частиц для неравномерного распределения массы частиц по пространству приводит к меньшему искривлению фронта горения.

Расчеты возможных составов аэрозвеси в заданных диапазонах изменения m_{dust} , r_k , V_C показали, что распределение температуры по пространству не всегда симметрично относительно линии $y = L_y/2$. Из расчетов было определено, что наиболее сильно несимметричность получаемых результатов проявляется для аэрозвеси с большим содержанием летучих компонентов. На рис. 1 и 2, где содержание летучих в частицах составляло $V_C = 0.3$, видна небольшая несимметричность в распределении температур. На рис. 3, 4 распределение температуры симметрично относительно линии $y = L_y/2$. Для более подробного изучения поведения фронта горения был выполнен расчет двух вариантов горения аэрозвеси угольной пыли с частицами радиусом $r_k = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, распределенными по пространству по закону $\rho_k(y) = 0.1(1 + \sin(\pi y / L_y))$, для двух случаев содержания летучих компонентов в частицах $V_C = 0.1$ (рис. 5) и $V_C = 0.4$ (рис. 6). Поля температуры строились для моментов времени, когда координата фронта горения соответствовала $x_f = 0.4L_x$ (a), $0.5L_x$ (b), $0.6L_x$ (c), $0.7L_x$ (d), $0.8L_x$ (e), $0.9L_x$ (f).

Согласно рис. 5 при малом количестве летучих компонентов в частицах фронт горения все время симметричен. Так как рассматриваемый случай относится к горению в недостатке окислителя, то имеет место недогорание частиц, максимальная температура газа всегда достигается в центре.

Согласно рис. 5, 6 при большом количестве летучих компонентов в частицах имеет место несимметричность в распределении температуры по пространству. Максимальная температура от центра рассматриваемого участка пространства (рис. 6, c) перемещается к одной из боковых

поверхностей (рис. 6, *d*), далее нагревается область в окрестности противоположной боковой поверхности (рис. 6, *e*), после чего в результате слияния двух фронтов максимальная температура локализуется вновь в центре пространства (рис. 6, *f*). Описанный процесс повторяется во времени.

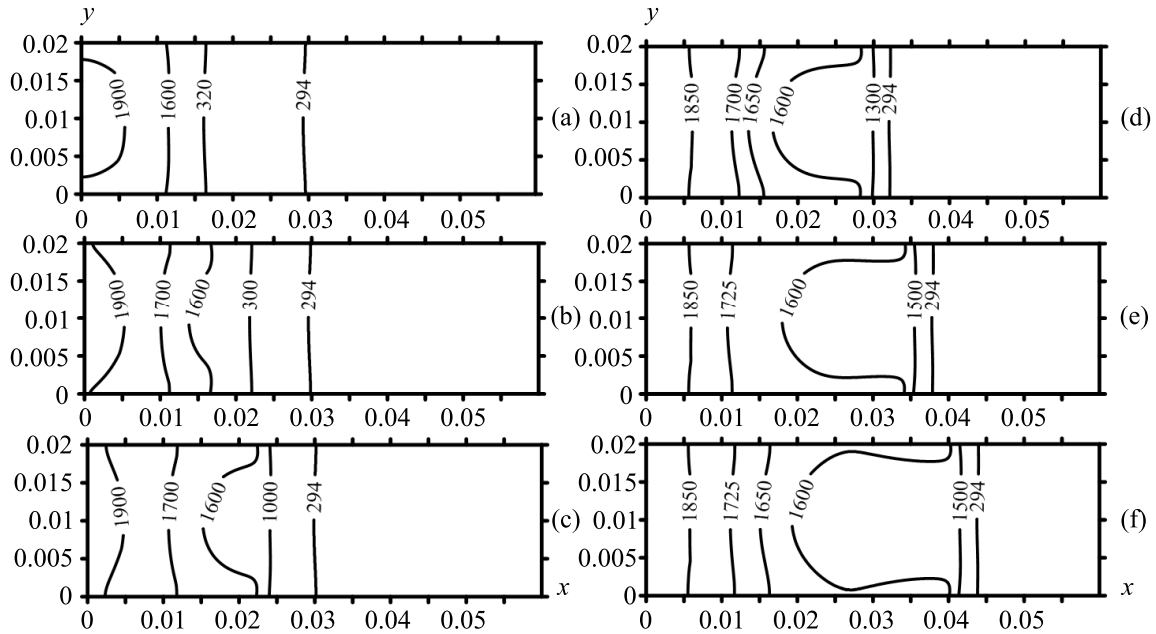


Рис. 5. Распределение температуры газа по пространству для аэровзвеси угольной пыли с массовой концентрацией частиц $m_{dust} = 0.1 \text{ кг/м}^3$, с радиусом частиц $r_k = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, содержанием летучих компонентов в частицах $V_C = 0.1$. Распределения построены для моментов времени $t = 0.07 \text{ с}$ (поле *a*), 0.14 с (поле *b*), 0.21 с (поле *c*), 0.29 с (поле *d*), 0.37 с (поле *e*), 0.45 с (поле *f*)

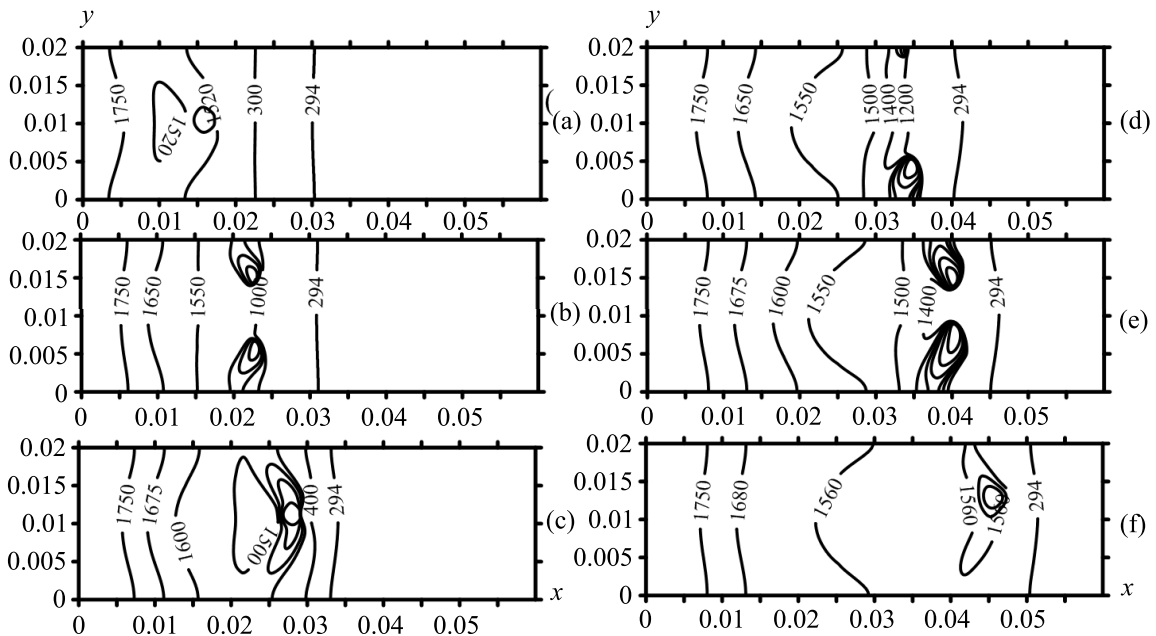


Рис. 6. Распределение температуры газа по пространству для аэровзвеси угольной пыли с массовой концентрацией частиц $m_{dust} = 0.1 \text{ кг/м}^3$, с радиусом частиц $r_k = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, содержанием летучих компонентов в частицах $V_C = 0.4$. Распределения построены для моментов времени $t = 0.25 \text{ с}$ (поле *a*), 0.44 с (поле *b*), 0.59 с (поле *c*), 0.82 с (поле *d*), 0.98 с (поле *e*), 1.14 с (поле *f*)

Дальнейшие расчеты задачи были связаны с определением того, как неоднородность распределения частиц по пространству влияет на скорость распространения фронта горения. Закон равномерного распределения частиц по пространству описывается выражением

$$\bar{\rho}_k = \frac{1}{L_y} \int_0^{L_y} m_{dust} (1 + \sin(\pi y / L_y)) dy = m_{dust} (1 + 2 / \pi).$$

Замена закона распределения частиц на равномерное распределение приводит к выпрямлению фронта горения и уменьшению скорости распространения фронта горения. Прочие закономерности в распространении фронта горения (влияния содержания летучих компонентов в частицах, массы и размера частиц) соответствовали случаю неравномерного распределения фронта горения.

4. Заключение

Выполнено численное исследование задачи распространения фронта горения по монодисперсной взвеси угольной пыли в воздухе с неоднородным распределением частиц.

Проведено параметрическое исследование влияния состава и пространственного распределения взвеси угольной пыли на скорость распространения пламени по аэровзвеси угольной пыли. Определено влияние размера и массовой концентрации частиц, а также содержания летучих компонентов в частицах на скорость распространения фронта горения по аэровзвеси угольной пыли.

Показано, что начальное неоднородное распределение частиц по пространству приводит к искривлению фронта горения. Определено, что скорость распространения фронта горения по смеси с неоднородным начальным распределением частиц выше скорости распространения пламени по смеси с однородным распределением частиц.

Полученные результаты могут быть полезны для решения практических задач сжигания пылеобразных органических топлив в горелочном устройстве.

Список литературы (References)

- Бакланов А. М., Валиулин С. В., Дубцов С. Н., Замашчиков В. В., Клишин В. И., Конторович А. Э., Коржавин А. А., Онищук А. А., Палеев Д. Ю., Пуртов П. А. Наноаэрозольная фракция в техногенной угольной пыли и ее влияние на взрывоопасность пыле-метано-воздушных смесей // Доклады академии наук. — 2015. — Т. 461, № 3. — С. 295–299.
- Baklanov A. M., Valiulin S. V., Dubtsov S. N., Zamashchikov V. V., Klishin V. I., Kontorovich A. E., Korzhavin A. A., Onischuk A. A., Paleev D. Y., Purtov P. A. Nanoaerosol fraction of man-made coal dust and its effect on the explosion hazard of dust-methane-air mixtures // Doklady Physical Chemistry. — 2015. — Vol. 461, Iss. 1. — P. 57–60. (Original Russian paper: Baklanov A. M., Valiulin S. V., Dubtsov S. N., Zamashchikov V. V., Klishin V. I., Kontorovich A. E., Korzhavin A. A., Onischuk A. A., Paleev D. Y., Purtov P. A. Nanoaerorozol'naja frakcija v tehnogennoj ugol'noj pyli i ee vlijanie na vzryvoopasnost' pyle-metano-vozdushnyh smesej // Doklady Akademii nauk. — 2015. — Vol. 461, No. 3. — P. 295–299.)
- Бойко Е. А. Реакционная способность энергетических углей: монография. — Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2011.
- Boyko E. A. Reaktsionnaya sposobnost' energeticheskikh ugley: monografiya [Reactivity of energy coals: monograph]. — Krasnoyarsk: Sibirskiy federal'nyy universitet, 2011 (in Russian).
- Валиулин С. В., Бакланов А. М., Дубцов С. Н., Замашчиков В. В., Клишин В. И., Конторович А. Э., Коржавин А. А., Онищук А. А., Палеев Д. Ю., Пуртов П. А., Куйбида Л. В. Влияние наноаэрозольной фракции техногенной угольной пыли на горение метановоздушных смесей // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 4. — С. 36–50.
- Valiulin S. V., Baklanov A. M., Dubtsov S. N., Zamashchikov V. V., Klishin V. I., Kontorovich A. E., Korzhavin A. A., Onischuk A. A., Paleev D. Yu., Purtov P. A., Kuibida L. V. Influence of the nanoaerosol fraction of industrial coal dust on the combustion of methane-air mixtures // Combustion, Explosion and Shock Waves. — 2016. — Vol. 52, No. 4. — P. 405–417. (Original Russian paper: Valiulin S. V., Baklanov A. M., Dubtsov S. N., Zamashchikov V. V., Klishin V. I., Kontorovich A. E., Korzhavin A. A., Onischuk A. A., Paleev D. Yu., Purtov P. A., Kuibida L. V. Vlijanie nanoaerorozol'noj frakcii tehnogennoj ugol'noj pyli na gorenije metanovozdushnyh smesej // Fizika gorenija i vzryva. — 2016. — Vol. 52, No. 4. — P. 36–50.)

- 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.
Dement'ev A. A., Moiseeva K. M., Krainov A. Yu., Paleev D. Yu. Comparison of the Results of Modeling the Flame Propagation in a Hybrid Gas Suspension with Experimental Data // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. — 2016. — Vol. 89, No. 6. — С. 1514–1521. (Original Russian paper: *Dement'ev A. A., Moiseeva K. M., Krainov A. Yu., Paleev D. Yu.* Sopostavlenie rezul'tatov modelirovaniya rasprostraneniya plameni v gibridnoj gazozvеси s eksperimental'nymi dannymi // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. — 2016. — Vol. 89, No. 6. — P. 1538–1546.)
- Корольченко А. Я.* Пожаровзрывобезопасность промышленной пыли. — М.: Химия, 1986.
Korol'chenko A. Ya. Pozharovzryvobezopasnost' promyshlennoy pyli [Fire and explosion hazard of industrial dust]. — Moscow: Khimiya, 1986 (in Russian).
- Крайнов А. Ю.* Моделирование распространения пламени в смеси горючих газов и частиц // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 2. — С. 3–9.
Krainov A. Yu. Modeling of flame propagation in a mixture of combustible gases and particles // Combustion, Explosion and Shock Waves. — 2000. — Vol. 36, No. 2. — P. 157–163. (Original Russian paper: *Krainov A. Yu.* Modelirovanie rasprostraneniya plameni v smesi gorjuchih gazov i chastic // Fizika gorenija i vzryva. — 2000. — Vol. 36, No. 2. — P. 3–9.)
- Крайнов А. Ю., Моисеева К. М., Палеев Д. Ю.* Численное исследование сгорания полидисперсной газозвеси угольной пыли в сферическом объеме // Компьютерные исследования и моделирование. — 2016. — Т. 8, № 3. — С. 531–539.
Krainov A. Yu., Moiseeva K. M., Paleev D. Yu. Chislennoe issledovanie sgoranija polidispersnoj gazozvеси ugol'noj pyli v sfericheskom objeme [Numerical simulation of combustion of a polydisperse suspension of coal dust in a spherical volume] // Komp'juternye issledovaniya i modelirovanie [Computer Research and Modeling]. — 2016. — Vol. 8, No. 3. — P. 531539 (in Russian).
- Моисеева К. М., Крайнов А. Ю.* Моделирование искрового зажигания газозвеси угольной пыли в воздухе и метановоздушной смеси // V Минский международный коллоквиум по физике ударных волн, горения и детонации, 13–16 ноября 2017 г.: сборник докладов. — Минск: Институт тепло и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Белоруссии. — С. 141–147.
Moiseeva K. M., Krainov A. Yu. Modelirovanie iskrovogo zazhiganiya gazozvеси ugol'noj pyli v vozdukhe i metanovozdushnoy smesi [Simulation of spark ignition of gas suspension of coal dust in air and methane-air mixture] // V Minskiy mezhdunarodnyy kollokvium po fizike udarnykh voln, gorenija i detonatsii, 13–16 noyabrya 2017 g.: sbornik dokladov. — Minsk: Institut teplo i massoobmena imeni A. V. Lykova NAN Belorussii. — P. 141–147 (in Russian).
- Нецепляев М. И., Любимова А. И., Петрухин П. М. и др.* Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах. — М.: Недра, 1992.
Netseplyaev M. I., Lyubimova A. I., Petrukhin P. M. i dr. Bor'ba so vzryvami ugol'noj pyli v shakhtakh [Combating coal dust explosions in mines]. — Moscow: Nedra, 1992 (in Russian).
- Самарский А. А.* Введение в теорию разностных схем. — М.: Наука, 1971.
Samarskiy A. A. Vvedenie v teoriyu raznostnykh skhem [Introduction to the theory of difference schemes]. — Moscow: Nauka, 1971 (in Russian).
- Франк-Каменецкий Д. А.* Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — М.: Наука, 1987.
Frank-Kamenetskiy D. A. Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoy kinetike [Diffusion and Heat Transfer in Chemical Kinetics]. — Moscow: Nauka, 1987 (in Russian).
- Rockwell S. R., Rangwala A. S.* Influence of coal dust on premixed turbulent methane–air flames // Combustion and Flame. — 2013. — Vol. 160. — P. 635–640.