

УДК: 533.6.011.72

Численное исследование сгорания полидисперсной газозвеси угольной пыли в сферическом объеме

А. Ю. Крайнов¹, К. М. Моисеева^{1,а}, Д. Ю. Палеев²

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет,
физико-технический факультет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36

² Институт угля СО РАН,
Россия, 650065, г. Кемерово, пр. Ленинградский, д. 10

E-mail: ^аMoiseeva_KM@t-sk.ru

Получено 3.03.2016.

Принято к публикации 13.04.2016.

Разработана физико-математическая модель горения полидисперсной реагирующей газозвеси. Физико-математическая постановка задачи учитывала выход летучих компонентов из частиц при их нагреве, излучение от частиц в окружающую среду, теплоотдачу от газа в окружающую среду через боковую поверхность сферического объема, зависимость коэффициента теплопроводности газа от температуры. Учитывалась полидисперсность угольной пыли: задавалось число фракций N . Фракции подразделялись на инертные и реагирующие частицы нескольких размеров. В уравнении изменения плотности окислителя учитывался расход окислителя на две реакции: гетерогенную на поверхности частиц и гомогенную в газе. Экзотермические химические реакции в газе определялись по закону Аррениуса с кинетикой второго порядка. Гетерогенная реакция на частицах задавалась реакцией первого порядка. Задача решалась методом Рунге–Кутты–Мерсона с автоматическим выбором шага. Достоверность расчетов проверялась путем решения частных постановок задачи. Было выполнено численное исследование задачи при варьировании процентного содержания летучих и инертных частиц в угольной пыли, а так же суммарной массы частиц. Определено влияние процентного содержания летучих и инертных частиц на характер горения полидисперсной газозвеси угольной пыли в метано-воздушной смеси. Результаты показали, что при малых массах угольной пыли увеличение процентного содержания летучих частиц в смеси приводит к увеличению максимального давления в объеме. При больших массах угольной пыли с увеличением процентного содержания летучих частиц в пыли величина максимального давления уменьшается. Увеличение процентного содержания инертных частиц в смеси приводит к уменьшению максимального давления, достигаемого в системе. Было определено, что существует экстремальное значение радиуса крупных частиц, для которого достигается наибольшее давление в объеме.

Ключевые слова: метано-воздушная смесь, полидисперсная газозвесь, горение, выделение летучих частиц

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-33-60091 мол_а_дк.

UDC: 533.6.011.72

Numerical simulation of combustion of a polydisperse suspension of coal dust in a spherical volume

A. Yu. Krainov¹, K. M. Moiseeva¹, D. Yu. Paleev²

¹ Tomsk State University, Physical-Technical Faculty, TSU, 36 Lenin St., Tomsk, 634050, Russia

² Institute of Coal of the Siberian Branch of the RAS, 10 Lenin grad Pr., Kemerovo, 650065, Russia

Retrieved 3.03.2016.

Accepted for publication 13.04.2016.

The physical and mathematical model of combustion of the polydisperse suspension of coal dust was developed. The formulation of the problem takes into account the evaporation of particle volatile components during the heating, the particle emitting and the gas heat transfer to a surrounding area via the sphere volume side surface, heat transfer coefficient as a function of temperature. The polydisperse of coal-dust is taken into consideration. N — the number of fraction. Fractions are subdivided into inert and reacting particles. The oxidizer mass balance equation takes into consideration the oxidizer consumption per each reaction (heterogeneous on the particle surface and homogenous in the gas). Exothermic chemical reactions in gas are determined by Arrhenius equation with second-order kinetics. The heterogeneous reaction on the particle surface was first-order reaction. The numerical simulation was solved by Runge–Kutta–Merson method. Reliability of the calculations was verified by solving the partial problems. During the numerical calculation the percentage composition of inert and reacting particles in coal-dust and their total mass were changed for each simulation. We have determined the influence of the percentage composition of inert and reacting particles on burning characteristics of polydisperse coal-dust methane-air mixture. The results showed that the percent increase of volatile components in the mixture lead to the increase of total pressure in the volume. The value of total pressure decreases with the increasing of the inert components in the mixture. It has been determined that there is the extremism radius value of coarse particles by which the maximum pressure reaches the highest value.

Keywords: methane-air mixture, polydisperse gas suspension of coal dust, combustion, distillation

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2016, vol. 8, no. 3, pp. 531–539 (Russian).

This research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. №16-33-60091 mol_a_dk).

Введение

Темой настоящей работы является исследование сгорания полидисперсной газозвеси угольной пыли, выделяющей летучие компоненты. Летучие компоненты составляют от 20 % до 70 % массы угля в зависимости от сорта угля. При нагреве угля летучие компоненты интенсивно выделяются и влияют на процесс воспламенения газозвеси угольной пыли. Помимо этого, воспламеняемость газозвеси угольной пыли определяется присутствием флегматизаторов горения, в качестве которых можно рассматривать инертные частицы, не принимающие участия в горении и замедляющие скорость роста температуры и давления газа при возникновении реакции в газе.

В работе [Калякин, Костенко и др., 2012] показано, что смесь реакционноспособного газа и угольной пыли способна к взрыву при малых концентрациях в воздухе. Описанные в работах [Рубцов, Сеплярский и др., 2010; Рубцов, Сеплярский и др., 2011] эксперименты по горению газозвесей, состоящих из природного газа и частиц угольной пыли, показали, что при большом содержании летучих частиц в угле воспламенение порошка было возможно в чистом кислороде, но не происходило в смеси природного газа с кислородом. Серия экспериментов в реакторе со стенками, предварительно покрытыми угольным порошком, показала, что покрытие стенок реактора угольной пыли приводит к ингибированию процесса воспламенения гибридной угольной газозвеси. В работе [Бакланов, Валиулин и др., 2015] указано, что современная техника добычи угля приводит к образованию высокодисперсной угольной пыли. Экспериментальное исследование показало присутствие наноразмерной фракции в образовавшейся пыли. Присутствие аэрозоля в смеси в экспериментах приводило к росту максимального давления и увеличению скорости роста давления в бомбе по сравнению со смесью без примеси угольной пыли. Из перечисленных результатов экспериментальных исследований следует вывод о существенном влиянии частиц угольной пыли на характеристики горения реакционных газовых смесей. Особо стоит отметить, что помимо массового содержания пыли в смеси на характеристики горения существенно влияет размер частиц.

В работе [Крайнов, 2000] показано, что присутствие мелких частиц угля увеличивает скорость распространения пламени метано-воздушной смеси. Присутствие крупных частиц угля приводит к уменьшению скорости распространения пламени. В работе [Дементьев, Крайнов, Моисеева, 2015] получено, 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 тормозят пламя.

Таким образом, из существующих аналитических и численных исследований по горению гибридных газозвесей, как и из экспериментальных исследований, следует вывод о существенном влиянии размеров частиц и состава угольной пыли на характеристики горения газозвесей с реагирующими частицами. Целью работы являлось численное исследование сгорания полидисперсной реагирующей газозвеси угольной пыли в метано-воздушной смеси в зависимости от содержания летучих частиц и их размера.

Математическая модель горения полидисперсной реагирующей угольной пыли

Физико-математическая постановка задачи учитывает выход летучих компонентов из частиц при их нагреве, излучение от частиц в окружающую среду, теплоотдачу от газа в окружающую среду через боковую поверхность сферического объема. Коэффициент массоотдачи частиц соответствует [Франк-Каменецкий, 1987], учитывается зависимость коэффициента теплопроводности газа от температуры [Дементьев, Крайнов, Моисеева, 2015]. Учитывается полидисперсность угольной пыли: задается число фракций N , фракции подразделяются на инертные

и реагирующие частицы нескольких размеров. 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. Для заданных допущений математическая постановка имеет следующий вид:

уравнение энергии для газа:

$$\frac{dT_g}{dt} = \frac{\alpha_s S}{V c_g \rho_g} (T_s - T_g) + \frac{1}{c_g \rho_g} \sum_{i=1}^{N_{ch}} \left[\alpha_{k,i} S_{k,i} n_i (T_{k,i} - T_g) - n_i (c_k T_{k,i} - c_g T_g) \frac{dm_{k,i}}{dt} \right] + \frac{Q_1 \rho_1 \rho_2 k_{01}}{c_g \rho_g} \exp\left(\frac{-E_1}{RT_g}\right); \quad (1)$$

уравнение энергии для частицы i -ой фракции:

$$c_k \rho_{k,i} V_{k,i} \frac{dT_{k,i}}{dt} = [Q_2 S_{k,i} j_{1,i} - Q_3 V_{k,i} j_{2,i}] - \alpha_{k,i} S_{k,i} (T_{k,i} - T_g) + \frac{\alpha_{tz,i} S}{V n_i} (T_s - T_{k,i}), \quad i = 1..N_{ch}; \quad (2)$$

уравнение изменения массы частиц i -ой фракции:

$$\frac{dm_{k,i}}{dt} = 4\pi r_{k,i}^2 \rho_{k,i} \frac{dr_{k,i}}{dt} + \frac{4}{3} \pi r_{k,i}^3 \frac{d\rho_{k,i}}{dt}, \quad i = 1..N_{ch}; \quad (3)$$

уравнение изменения радиуса частиц i -ой фракции:

$$\frac{dr_{k,i}}{dt} = -\frac{j_{1,i}}{\rho_{k,i}}, \quad i = 1..N_{ch}; \quad (4)$$

уравнение изменения плотности частиц i -ой фракции в связи с выходом летучего компонента:

$$\frac{d\rho_{k,i}}{dt} = j_{2,i}, \quad i = 1..N_{ch}; \quad (5)$$

уравнение изменения парциальной плотности окислителя:

$$\frac{d\rho_1}{dt} = -\alpha_1 \rho_1 \rho_2 k_{01} \exp\left(\frac{-E_1}{RT_g}\right) - \sum_{i=1}^{N_{ch}} \alpha_2 S_{k,i} j_{1,i} n_i; \quad (6)$$

уравнение изменения парциальной плотности горючего:

$$\frac{d\rho_2}{dt} = -\alpha_3 \rho_1 \rho_2 k_{01} \exp\left(\frac{-E_1}{RT_g}\right) - \sum_{i=1}^{N_{ch}} \alpha_4 V_{k,i} j_{2,i} n_i; \quad (7)$$

уравнение сохранения массы газозвеси:

$$\frac{d}{dt} \left(\sum_{i=1}^{N_{ch}} n_i m_{k,i} + \rho_g \right) = 0; \quad (8)$$

уравнение состояния газа:

$$P = \rho_g T_g \frac{R}{\mu_g}. \quad (9)$$

Начальные условия:

$$T_g(0) = T_{g,st}, T_{k,i}(0) = T_{k,st}, \rho_{k,i}(0) = \rho_{k,st}, m_{k,i}(0) = \frac{4}{3} \pi r_{st,i}^3 \rho_{k,st}, \quad (10)$$

$$\rho_g(0) = \rho_{g,st}, r_{k,i}(0) = r_{st,i}, \rho_1(0) = \rho_{1,st}, \rho_2(0) = \rho_{2,st}.$$

В уравнениях (1)–(10) $\alpha_s = \lambda_g(T) Nu / r_s$ — коэффициент теплообмена газа с боковой поверхностью объема; $\alpha_{k,i} = \lambda_g(T) Nu / r_{k,i}$ — коэффициент теплообмена газа с частицами i -ой фракции; $\alpha_{iz,i} = \sigma \varepsilon (T_{k,i}^2 + T_S^2) (T_{k,i} + T_S)$ — коэффициент теплообмена излучением частиц i -ой фракции с окружающей средой; $\beta_{m,i} = (\lambda_g(T) Nu_D) / (c_g \rho_g r_{k,i})$ — коэффициент массоотдачи частиц i -ой фракции [Франк-Каменецкий, 1987]; $j_{1,i} = \rho_1 \frac{\beta_{m,i} k_{02} \exp(-E_2 / (RT_{k,i}))}{\beta_{m,i} + k_{02} \exp(-E_2 / (RT_{k,i}))}$ — скорость гетерогенной реакции частиц i -ой фракции; $j_{2,i} = -(\rho_{k,i} - \rho_T) k_{03} \exp(-E_3 / (RT_{k,i}))$ — скорость гомогенной реакции газификации летучего компонента частиц i -ой фракции; $\lambda_g(T) = \lambda_{g,st} (T_g / T_{g,st})^{2/3}$ — коэффициент теплопроводности газа.

В постановке задачи использованы следующие обозначения: T — температура; c — теплоемкость; m — масса; n — количество частиц в единице объема; R — универсальная газовая постоянная; r — радиус; V — объем и S — площадь поверхности «сферической бомбы»; j_1 — скорость гетерогенной реакции; j_2 — скорость гомогенной реакции газификации летучих компонентов; Q — тепловой эффект реакции; E — энергия активации; k_0 — предэкспонент в законе Аррениуса; ρ_g — плотность газа; ρ_k — плотность частиц i -ой фракции; ρ_1 — парциальная плотность окислителя в смеси; ρ_2 — парциальная плотность горючего в смеси; μ — молярная масса; α_1 – α_4 — стехиометрические коэффициенты гомогенной и гетерогенной реакций; λ — коэффициент теплопроводности; σ — постоянная Стефана–Больцмана; ε — степень черноты в законе Стефана–Больцмана. Индексы: g — параметры газа; k — параметры частиц; i — номер фракции частиц; S — параметры окружающей среды и реактора; iz — излучение; st — начальные параметры.

Метод решения и результаты расчетов

Задача (1)–(10) решалась методом Рунге–Кутты–Мерсона с автоматическим выбором шага. Достоверность расчетов проверялась путем решения частных постановок задачи. Согласно проверке на достоверность погрешность расчета составляет не более 3 %.

Расчеты проводились для следующих параметров [Крайнов, Моисеева, Палеев, 2015]: $Nu = 1$; $E_1 = 132$ кДж/моль; $k_{01} = 2.2 \cdot 10^{10}$ м³/(кг·с); $Q_1 = 50$ МДж/кг; $V = 10^{-2}$ м³; $R = 8.31$ Дж/(кг·К); $\alpha_1 = 4$, $c_g = 1150$ Дж/(кг·К); $\alpha_2 = 1$, $\alpha_3 = 1$, $\alpha_4 = 1$; $c_k = 1464.4$ Дж/(кг·К); $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); $\rho_{k,st} = 1400$ кг/м³; $\rho_{g,st} = 1.187$ кг/м³; $\varepsilon = 0.95$, $T_{g,st} = T_{k,st} = 723$ К. Кинетические параметры реакции для частиц были взяты из [Померанцев, Арефьев, Ахмедов и др., 1986]: $Q_2 = 29$ МДж/кг — тепловой эффект гетерогенной реакции на частицах; $Q_3 = 2$ МДж/кг — тепловой эффект от реакции выделения летучей компоненты из частиц; $E_2 = 135$ кДж/моль, $E_3 = 29.3$ кДж/моль — энергия активации для гетерогенной реакции на частицах и реакции выделения летучей компоненты; $k_{02} = 79 \cdot 10^3$ м/с, $k_{03} = 14.2$ с⁻¹ — предэкспонент для гетерогенной реакции на частицах и реакции выделения летучей компоненты. Общая счетная концентрация частиц взята равной 10^{12} частиц на объем V [Бакланов, Валиулин и др., 2015]. Полагалось, что наноразмерная фракция угольной пыли составляет 90 % всей счетной концентрации частиц. Наноразмерная фракция подразделялась на частицы радиуса 75 нм и 10 нм. Более крупные час-

тицы (кластеры) составляли 10 % счетной концентрации частицы. Радиус кластерных частиц в расчетах варьировался от $r_{kl} = 1$ мкм до $r_{kl} = 11$ мкм. Полагалось, что частицы могут быть как реагирующими, так и инертными. В расчетах было принято, что частицы каждого размера (75 нм, 10 нм, r_{kl}) делятся на реагирующие и инертные в пропорции 9 : 1. Процентное содержание летучих, $N_{let,\%}$, в смеси варьировалось от 10 % до 60 %. Результаты расчетов представлены на рис. 1–3.

На рис. 1 представлена зависимость температуры газа и кластерных частиц от времени для трех случаев расчета: $r_{kl} = 10.1$ мкм, $N_{let,\%} = 60$ % (рис. 1, *a*), $r_{kl} = 8.5$ мкм, $N_{let,\%} = 60$ % (рис. 1, *b*), $r_{kl} = 8.5$ мкм, $N_{let,\%} = 30$ % (рис. 1, *c*). На рис. 1 кривые 1 соответствуют температуре кластерных частиц, кривые 2 соответствуют температуре газа. Согласно рисунку уменьшение радиуса кластерных частиц от 10.1 мкм (рис. 1, *a*) до 8.5 мкм (рис. 1, *b*) приводит к уменьшению времени индукции. В случае $r_{kl} = 10.1$ мкм максимальная температура частиц и газа достигается за время $t = 0.215$ с, в случае $r_{kl} = 8.5$ мкм время достижения максимальной температуры газа и частиц составляет $t = 0.05$ с. Уменьшение процентного содержания летучих в газовозвеси угольной пыли от 60 % (рис. 1, *b*) до 30 % (рис. 1, *c*) приводит к увеличению максимальной температуры, достигаемой частицами, и времени достижения максимальной температуры от $T_k = 3079$ К, $t = 0.05$ с до $T_k = 3352$ К, $t = 0.061$ с. Максимальная температура газа достигается для частиц радиуса $r_{kl} = 8.5$ мкм и смеси с содержанием летучих 30 % (рис. 1*c*).

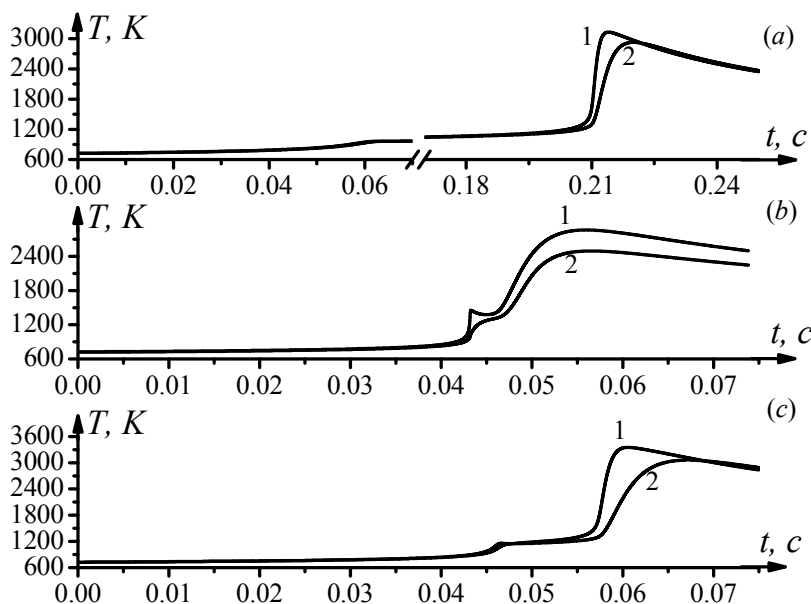


Рис. 1. Изменение температуры кластерных частиц (кривая 1) и газа (кривая 2) во времени. $r_{kl} = 10.1$ мкм, $N_{let,\%} = 60$ % (*a*); $r_{kl} = 8.5$ мкм, $N_{let,\%} = 60$ % (*b*); $r_{kl} = 8.5$ мкм, $N_{let,\%} = 30$ % (*c*)

На рис. 2 представлены графики изменения давления газа во времени для трех вариантов состава газовозвеси (как на рис. 1). Максимальное давление в объеме достигается в случае частиц радиуса $r_{kl} = 8.5$ мкм и содержанием летучих $N_{let,\%} = 30$ % (кривая 3, рис. 2). Кривые давления (рис. 2) и температур газа (кривые 2*a*, 2*b*, 2*c*, рис. 1) имеют по два пика. Первый пик соответствует повышению температуры и давления газа за счет сгорания метана в газовой смеси. Второй пик давления и температуры возникает при сгорании кластерных частиц. Реакция на частицах приводит к выгоранию окислителя, после чего начинается понижение давления и температуры газа и частиц (рис. 1, 2). Давление и температура газа падают за счет теплоотдачи в окружающую среду. Согласно расчетам кластерные частицы сгорают не полностью и ускоряют процесс охлаждения газа. Недогорание частиц объясняется нехваткой окислителя для полного сгорания частиц указанных размеров.

На рис. 3 представлена зависимость максимального давления, достигаемого в объеме, от массы угольных частиц, содержащихся в смеси. Кривые 1–6 соответствуют содержанию лету-

чих частиц в угольной пыли от 10 до 60 % соответственно. Согласно рис. 3 максимальное давление в объеме достигается при сгорании полидисперсной газозвеси угольной пыли с содержанием летучих частиц 20 % и массой пыли $M = 0.386$ кг, где $M = \sum_{i=1}^{N_f} m_{k,i}$. Этот случай соответствует угольной пыли, содержащей 90 % наноразмерных частиц ($r_{st} = 75$ нм и $r_{kl} = 10$ нм) и 10 % кластерных частиц ($r_{kl} = 8.7$ мкм).

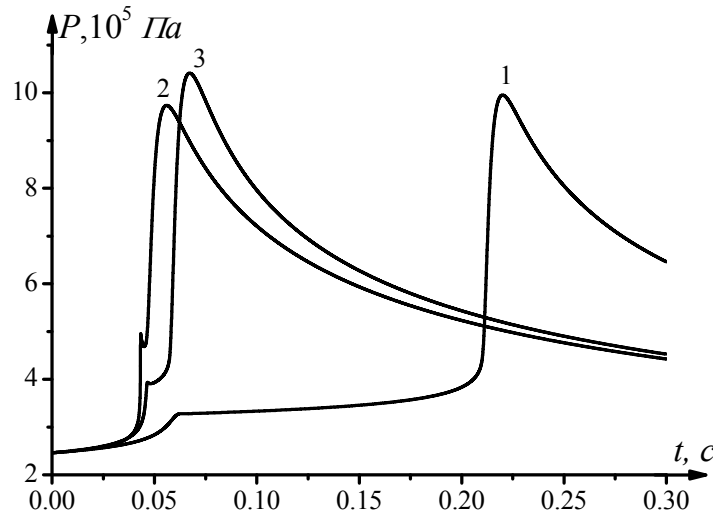


Рис. 2. Изменение давления газа во времени. $r_{kl} = 10.1$ мкм, $N_{let,\%} = 60$ % (кривая 1); $r_{kl} = 8.5$ мкм, $N_{let,\%} = 60$ % (кривая 2); $r_{kl} = 8.5$ мкм, $N_{let,\%} = 30$ % (кривая 3)

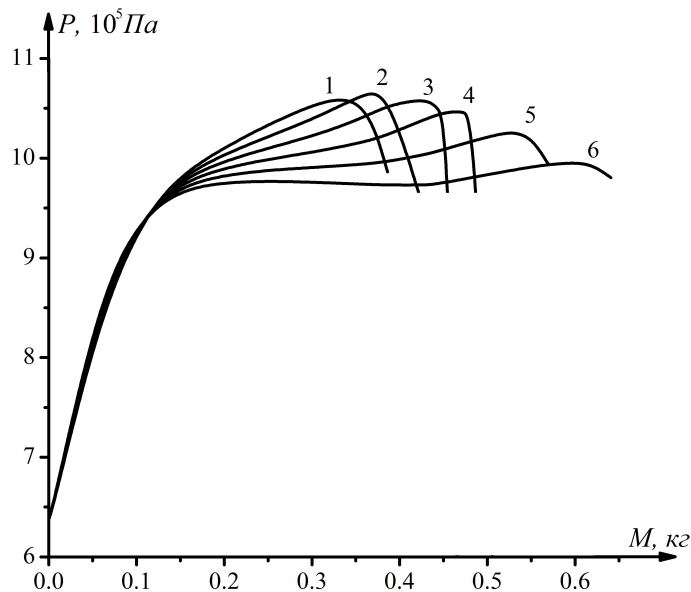


Рис. 3. Максимальное давление в объеме в зависимости от массы угольной пыли. Процентное содержание летучих частиц: 1 — 10 %, 2 — 20 %, 3 — 30 %, 4 — 40 %, 5 — 50 %, 6 — 60 %

Расчеты показали, что при малых массах сжигаемой газозвеси, $M < 0.12$ кг, величина процентного содержания летучих частиц в пыли оказывает малое влияние на величину максимального давления в объеме. Было определено, что для $M < 0.12$ кг с увеличением процентного содержания летучих частиц максимальное давление незначительно повышается. Для $M \geq 0.12$ кг влияние величины процентного содержания летучих становится существеннее, но при этом ка-

чественно меняется зависимость величины максимального давления газа в объеме от содержания летучих в смеси. Увеличение процентного содержания летучих частиц приводит к уменьшению максимального давления и сдвигу момента достижения максимального давления в сторону большей массы угольной пыли.

Выводы

Выполнено численное исследование задачи воспламенения и сгорания полидисперсной газозвеси угольной пыли в метано-воздушной смеси.

Проведено параметрическое исследование влияния состава смеси на величину максимального давления газа в объеме.

Показано, что при малых массах угольной пыли увеличение процентного содержания летучих частиц в смеси приводит к увеличению максимального давления в объеме. При больших массах угольной пыли с увеличением процентного содержания летучих частиц в пыли величина максимального давления уменьшается.

В случае горения крупных частиц имеет место недостаток окислителя, кроме того, выход летучих частиц понижает температуру газа. Это приводит к тому, что при горении крупных частиц с увеличением процентного содержания летучих частиц в пыли уменьшаются максимальная температура и давление газа.

Список литературы (References)

- Бакланов А. М., Валиулин С. В., Дубцов С. Н., Замащиков 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., Korzhavin A. A., Onischuk A. A., Purtov P. A., Klishin V. I., Paleev D. Yu., Kontorovich A. E. 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, Issue 1. — P. 57–60. (Original Russian paper: Baklanov A. M., Valiulin S. V., Dubtsov S. N., Zamashchikov V. V., Korzhavin A. A., Onischuk A. A., Purtov P. A., Klishin V. I., Paleev D. Yu., Kontorovich A. E. Nanoajerozol'naja frakcija v tehnogennoj ugol'noj pyli i ee vlijanie na vzryvoopasnost' pyle-metano-vozdushnyh smesey // Doklady Akademii nauk. — 2015. — Vol. 461, No. 3. — P. 295–299.)
- Дементьев А. А., Крайнов А. Ю., Моисеева К. М. О влиянии концентрации горючего в гибридной газозвеси на скорость распространения фронта горения // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. — 2015. — № 5(37). — С. 55–64.
- Dement'ev A. A., Krainov A. Yu., Moiseeva K. M. O vliyanii koncentracii goryuchego v gibridnoj gazozvesi na skorost' rasprostraneniya fronta goreniya [On the influence of the fuel concentration in a hybrid gas-suspension on the speed of the combustion front propagation] // Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics. — 2015. — Vol. 37, No. 5. — P. 55–64 (in Russian).
- Калякин С., Костенко В., Завьялова Е., Штрох Л. Влияние примесей шахтных горючих газов на взрывоопасность угольных аэрозолей // Aktualne problemy zwalczania zagrożeń górniczych: II konferencja naukowo-techniczna. Brenna. — 2012. — № 7–9. — С. 176–184.
- Kaljakin S., Kostenko V., Zav'jalova E., Shtroh L. Vlijanie primesej shahtnyh gorjuchih gazov na vzryvoopasnost' ugol'nyh ajerozolej [The effect of impurities of the mine combustible gases on the explosion hazard of carbon aerosols] // Aktualne problemy zwalczania zagrożeń górniczych: II konferencja naukowo-techniczna. Brenna. — 2012. — No. 7–9. — P. 176–184 (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, Issue 2. — P. 157–163. (Original Russian paper: Krainov A. Yu. Modelirovanie rasprostraneniya plameni v smesi gorjuchih gazov i chastic // Fizika goreniya i vzryva. — 2000. — Vol. 36, No. 2. — P. 3–9).

- Крайнов А. Ю., Моисеева К. М., Палеев Д. Ю.* Моделирование самовоспламенения взвеси полидисперсной угольной пыли в метановоздушной смеси // *Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред: Сборник материалов Всероссийской научной конференции. Москва, 15–17 декабря 2015 г.* — М.: ИПРИМ РАН, 2015. — С. 438–440.
- Krainov A. Yu., Moiseeva K. M., Paleev D. Yu.* Modelirovanie samovosplameneniya vzvesi polidispersnoj ugol'noj pyli v metanovozdushnoj smesi [The simulation of self-ignition polydisperse suspensions of coal dust in the methane-air mixture] // *Mekhanika kompozicionnyh materialov i konstrukcij, slozhnyh i geterogennyh sred. Sbornik materialov Vserossijskoj nauchnoj konferencii. Moskva, 15–17 dekabrya 2015.* — М.: IPRIM RAN, 2015. — P. 438–440 (in Russian).
- Померанцев В. В., Арефьев К. М., Ахмедов Д. Б. и др.* Основы практической теории горения: Учебное пособие для вузов / Под ред. В. В. Померанцева. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. — 312 с.
- Pomerancev V. V., Arefev K. M., Ahmedov D. B. eds.* Osnovy prakticheskoj teorii goreniya [Fundamentals of the practical the theory of combustion]: Uchebnoe posobie dlya vuzov / Pod red. V. V. Pomeranceva. — Leningrad: Energoatomizdat, 312 p. 1986 (in Russian).
- Рубцов Н. М., Сеплярский Б. С., Цветков Г. И., Черныш В. И.* Влияние состояния поверхности реактора и химически активных добавок на воспламенение газозвеси, состоящей из угольного порошка, природного газа и кислорода // *Химическая физика и мезоскопия.* — 2010. — Т. 12, № 4. — С. 451–457.
- Rubtsov N. M., Seplyarskii B. S., Tsvetkov G. I., Chernysh V. I.* Vliyanie inertnyh i aktivnyh dobavok na zakonmernosti iniciirovaniya i rasprostraneniya laminarnykh sfericheskikh plamen v stekhiometricheskikh smesyah metana, pentana i vodoroda s vozduhom pri atmosfernom davlenii [Influence of inert and active additives on the features of initiation and propagation of laminar spherical flames in stoichiometric mixtures of methane, propane and hydrogen with air at atmospheric pressure] // *Chemical Physics and Mesoscopics.* — 2010. — Vol. 12, No. 4. — P. 451–457 (in Russian).
- Рубцов Н. М., Сеплярский Б. С., Цветков Г. И., Черныш В. И.* Воспламенение угольных порошков в присутствии природного газа, кислорода и химически активных добавок // *Кинетика и катализ.* — 2011. — Т. 52, № 3. — С. 358–362.
- Rubtsov N. M., Seplyarskii B. S., Tsvetkov G. I., Chernysh V. I.* Ignition of coal powders in the presence of natural gas, oxygen, and reactive admixtures // *Kinetics and Catalysis.* — 2011. — Vol. 52, Issue 3. — P. 348–352 (Original Russian paper: *Rubtsov N. M., Seplyarskij B. S., Tsvetkov G. I., Chernysh V. I. Vosplameneniye ugol'nykh poroshkov v prisutstvii prirodnoho gaza, kisloroda i himicheskii aktivnykh dobavok // Kinetika i kataliz.* — 2011. — Vol. 52, No. 3. — S. 358–362).
- 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]. — М.: Nauka, 1987 (in Russian).