

УДК 536.46

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ИСКРОВОГО ЗАЖИГАНИЯ БИДИСПЕРСНОГО ПОРОШКА АЛЮМИНИЯ В ВОЗДУХЕ

К. М. Моисеева, А. Ю. Крайнов, А. А. Дементьев

Томский государственный университет, 634050 Томск, Moiseeva_KM@t-sk.ru

Представлены физико-математическая модель и результаты численного решения задачи искрового зажигания аэровзвеси бидисперсного порошка алюминия. Численно определены критические условия зажигания аэровзвеси порошка алюминия в зависимости от размера и массовой концентрации частиц, а также от содержания крупных и мелких частиц в аэровзвеси. Показано влияние мелкодисперсной фракции частиц в составе бидисперсного порошка алюминия на критические условия искрового зажигания аэровзвеси алюминия с последующим выходом на устойчивый режим распространения фронта горения.

Ключевые слова: искровое зажигание, минимальная энергия, аэровзвесь порошка алюминия, скорость горения, газовая динамика, численное моделирование.

DOI 10.15372/FGV20190404

ВВЕДЕНИЕ

При горении порошка алюминия в составе топлива важным вопросом является определение скорости горения частиц алюминия в потоке газообразного окислителя, а также критических условий очагового зажигания. Достаточно подробный обзор проведенных экспериментов по горению газозвеси порошкообразного алюминия представлен в [1], где собраны данные по скорости горения порошка алюминия в зависимости от размера и массовой концентрации частиц алюминия, а также при различных условиях проведения экспериментов.

В работе [2] для частиц радиусом $3 \div 20$ мкм при массовой концентрации $0.12 \div 0.21$ кг/м³ показано, что нормальная скорость распространения фронта горения аэровзвеси частиц алюминия растет при увеличении их массовой концентрации в смеси или при уменьшении их размера. В работах [3, 4] установлено, что для взвеси порошка алюминия АСД-1 в окислителе с содержанием кислорода 20 % нормальная скорость пламени падает с увеличением массового содержания порошка алюминия. Для массовой концентрации порошка алюминия $0.25 \div 0.55$ кг/м³ нормальная скорость пламени находится в диапазоне $0.14 \div 0.17$ м/с. В работе [5] пока-

зано, что для частиц алюминия диаметром $4 \div 6$ мкм в диапазоне массовой концентрации порошка алюминия $0.1 \div 0.4$ кг/м³ нормальная скорость распространения фронта горения составила $0.1 \div 0.3$ м/с. При этом увеличение массовой концентрации порошка алюминия в смеси приводило к росту нормальной скорости фронта в заданном диапазоне массовой концентрации порошка алюминия. В работах [6, 7] показано, что видимая скорость пламени смеси порошка алюминия марки АСД-1 и марки АСД-4 с воздухом уменьшается при увеличении коэффициента избытка окислителя.

В современных работах, связанных с численным моделированием горения порошка алюминия, как правило, внимание фокусируется на определении детальной кинетики окисления и горения одиночных частиц алюминия. Другим подходом к моделированию горения порошка алюминия является использование эмпирического закона горения частиц алюминия, например такого, который описан в [8]. Требуемая при этом константа скорости химической реакции может быть определена путем сравнения результатов расчета с экспериментом. Применение эмпирического закона горения позволяет сконцентрировать исследование на определении влияния параметров частиц алюминия на скорость горения порошка алюминия, а также на критические условия инициирования устойчивого горения порошка. В настоящей работе с использованием эмпирического закона го-

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-79-20011).

© Моисеева К. М., Крайнов А. Ю., Дементьев А. А., 2019.

рения частиц алюминия [8] на основе физико-математических постановок [9, 10] численно решена задача искрового зажигания аэровзвеси порошка алюминия. Целью работы является определение критических условий зажигания монодисперсного и бидисперсного порошка алюминия в зависимости от размера и массовой концентрации частиц, а также от отношения между массовыми концентрациями фракций порошка алюминия.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Предполагается, что в воздухе равномерно распределена бидисперсная взвесь порошка алюминия с общей массовой концентрацией частиц m_{dust} , начальным размером частиц $r_{Al,1}^0$ и $r_{Al,2}^0$. Нитевидный мгновенный источник зажигания расположен в центре. Внешняя граница расчетной области полагается бесконечно удаленной от источника зажигания. Потерями тепла на электроды пренебрегается. Коэффициенты диффузии и теплопроводности газа зависят от температуры [9]. Горение частиц алюминия описывается на основе экспериментальных данных [8], воспламенение частицы алюминия происходит при достижении ею температуры зажигания $T_{p,ign}$. Скорость гетерогенной химической реакции на частицах описывается с учетом массоотдачи. Учитывается тепловое и динамическое взаимодействие между частицами и газом. Полагается, что при горении радиус шарика алюминия в частице $r_{Al,i}$ уменьшается, радиус самой частицы $r_{p,i}$ растет за счет нарастания оксидного слоя. Полагается, что в начале процесса частицы представляют собой чистый алюминий без оксидного слоя. Математическая модель основана на двухфазной двухскоростной модели реагирующей газодисперсной среды [11] и определяется системой уравнений сохранения массы, импульса, полной энергии газа (с учетом теплопроводности) и частиц с учетом химической реакции на поверхности, уравнений сохранения массы компонентов газовой смеси с учетом их диффузии и выгорания, уравнения выгорания частиц. Допущения, касающиеся характеристик искрового зажигания, соответствовали [9].

Математическая постановка задачи для сформулированных допущений имеет вид:

$$\frac{\partial r \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_g u_g}{\partial r} = -r \sum_{i=1,2} G_i, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial r(\rho_g u_g)}{\partial t} + \frac{\partial r(\rho_g u_g^2 + p)}{\partial r} &= \\ &= p - r \sum_{i=1,2} [\tau_{fr,i} + G_i u_g], \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial r \rho_g (\varepsilon_g + 0.5 u_g^2)}{\partial t} + \\ + \frac{\partial r [\rho_g u_g (\varepsilon_g + 0.5 u_g^2) + p u_g]}{\partial r} &= \\ = \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_g(T_g) \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) - r \sum_{i=1,2} [G_i (c_{g,v} T_g + \\ + u_g^2/2) + u_{p,i} \tau_{fr,i} - \alpha_{p,i} n_{p,i} S_{p,i} (T_{p,i} - T_g)], \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial r \rho_{O_2}}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_{O_2} u_g}{\partial r} &= \\ = \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_g \rho_g(T_g) \frac{\partial a_{O_2}}{\partial r} \right) - r \sum_{i=1,2} G_i, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial r \rho_{p,i}}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_{p,i} u_{p,i}}{\partial r} = r G_i, \quad i = 1, 2, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial r(\rho_{p,i} u_{p,i})}{\partial t} + \frac{\partial r \rho_{p,i} u_{p,i}^2}{\partial r} &= \\ = r \tau_{fr,i} + r G_i u_g, \quad i = 1, 2, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial r \rho_{p,i} (\varepsilon_{p,i} + 0.5 u_{p,i}^2)}{\partial t} + \\ + \frac{\partial r \rho_{p,i} u_{p,i} (\varepsilon_{p,i} + 0.5 u_{p,i}^2)}{\partial r} &= \\ = -r \alpha_{p,i} S_{p,i} n_{p,i} (T_{p,i} - T_g) + \frac{r Q G_i}{\alpha_1} + \\ + r G_i \left(c_{g,v} T_g + \frac{u_g^2}{2} \right) + r \tau_{fr,i} u_{p,i}, \quad i = 1, 2, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{\partial r n_{p,i}}{\partial t} + \frac{\partial r n_{p,i} u_{p,i}}{\partial r} = 0, \quad i = 1, 2, \quad (8)$$

$$p = \rho_g R_g T_g. \quad (9)$$

Соответствующие начальные и граничные условия для (1)–(9):

$$T_g(r, t_{sp}) = T_0 + \frac{Q_{sp}}{4\pi\lambda_{g,0}t_{sp}} \exp\left(-\frac{r^2}{4\chi_{g,0}t_{sp}}\right),$$

$$T_{p,i}(r, t_{sp}) = T_0,$$

$$\rho_{O_2}(r, t_{sp}) = \rho_{O_2,0}, \quad \rho_{p,i}(r, t_{sp}) = \rho_{p0,i},$$

$$u_g(r, t_{sp}) = u_{p,i}(r, t_{sp}) = 0,$$

$$\rho_g(r, t_{sp}) = \rho_0; \quad n_{p,i}(r, t_{sp}) = n_{p0,i}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \rho(0, t)}{\partial r} = \frac{\partial \rho_{O_2}(0, t)}{\partial r} = \frac{\partial T_g(0, t)}{\partial r} = 0,$$

$$u_g(0, t) = 0; \quad (11)$$

$$\frac{\partial \rho_{p,i}(0, t)}{\partial r} = \frac{\partial n_{p,i}(0, t)}{\partial r} = \frac{\partial T_{p,i}(0, t)}{\partial r} = 0,$$

$$u_{p,i}(0, t) = 0; \quad (12)$$

$$\frac{\partial \rho_{O_2}(\infty, t)}{\partial r} = \frac{\partial T_g(\infty, t)}{\partial r} = 0. \quad (13)$$

В (1)–(13) приняты следующие обозначения: t — время; T — температура; r — координата по радиусу; c — теплоемкость, c_p , c_v — соответственно при постоянных давлении и объеме; ρ_g , ρ_{O_2} , ρ_p — плотность газа, парциальная плотность кислорода, распределенная плотность вещества частиц; u — скорость; r_p — радиус частицы; n_p — количество частиц в единице объема; p — давление; λ_g — коэффициент теплопроводности газа, $\lambda_g = \lambda_{g,0}(T_g/T_0)^{2/3}$; $\chi_g = \lambda_g/(c_{g,v}\rho_g)$ — коэффициент температуропроводности газа; D_g — коэффициент диффузии газа, $D_g(T_g) = \lambda_g(T_g)/(c_{g,p}\rho_g)$, Q — тепловой эффект реакции на поверхности частиц; T — температура; η — коэффициент динамической вязкости газа; $\alpha_p = \text{Nu}_p\lambda_g/(2r_p)$ — коэффициент теплообмена газа с частицами; $\varepsilon_g = p/(\rho_g(\gamma - 1))$ — внутренняя энергия газа; $\gamma = c_{g,p}/c_{g,v}$ — показатель адиабаты; $\varepsilon_p = c_p T_p$ — внутренняя энергия частиц; G — скорость изменения массы частиц при горении; $S_p = 4\pi r_p^2$ — площадь поверхности частицы; $\tau_{fr} = n_p F_{fr}$ — сила трения; $F_{fr} = C_r S_m \rho_g (u_g - u_p)|u_g - u_p|/2$ — сила взаимодействия одиночной частицы с газом; $S_m = \pi r_p^2$ — площадь миделева сечения частицы; $C_{fr} = 24(1 + 0.15\text{Re}^{0.682})/\text{Re}$ — коэффициент

трения; Re — число Рейнольдса; $\text{Nu}_p = 2 + (\text{Nu}_l^2 + \text{Nu}_t^2)^{1/2}$ — число Нуссельта, где $\text{Nu}_l = 0.664\text{Re}^{0.5}$, $\text{Nu}_t = 0.037\text{Re}^{0.8}$ [12]; α_1 — стехиометрический коэффициент реакции кислорода с частицами алюминия. Индексом 0 отмечены начальные значения параметров состояния, p — параметры частиц, g — параметры газа, sp — характеристики параметров искры, Al — параметры алюминия, содержащегося в частице, i — номер фракции частиц (для монодисперсного порошка $i \equiv 1$, для бидисперсного порошка 1 — крупные, 2 — мелкие частицы).

Текущие значения радиуса шарика алюминия в частице и радиуса самой частицы определялись аналогично [10]:

$$r_{Al,i} = \sqrt[3]{\left(\frac{\mu_{Al} + 3/2\mu_O}{\mu_{Al}} r_{p0,i}^3 - \frac{\rho_{p,i}}{(4/3)\pi n_{p,i}\rho_p^0}\right) \frac{2\mu_{Al}}{3\mu_O}}, \quad (14)$$

$$r_{p,i} = \sqrt[3]{\frac{3\rho_{p,i}}{4\pi\rho_p^0 n_{p,i}}}. \quad (15)$$

Здесь μ_O , μ_{Al} — молярная масса кислорода и алюминия соответственно, ρ_p^0 — собственная плотность алюминия, $r_{p0,i}$ — начальный радиус частицы. При выводе (14) предполагалось, что оксид Al_2O_3 , остающийся в частице, имеет форму шарового слоя. Это предположение вводится для определения текущего радиуса шарика алюминия в процессе его горения и никак не влияет на скорость горения частицы алюминия, поскольку она выбрана с учетом экспериментальных данных [8].

С учетом диффузионного торможения реакции скорость изменения массы частиц алюминия записывается в виде

$$G_i = \alpha_1 n_{p,i} \rho_p^0 S_{Al,i} \frac{k(a_{O_2} r_{Al,i}) \beta_{p,i}}{k(a_{O_2} r_{Al,i}) + \beta_{p,i}}, \quad (16)$$

где $k(a_{O_2} r_{Al,i}) = k_0 a_{O_2}^{0.9} / \sqrt{r_{Al,i}}$ — закон горения одиночной частицы при избытке окислителя, $S_{Al,i} = 4\pi r_{Al,i}^2$ — площадь поверхности чистого алюминия в частице, k_0 — константа скорости химической реакции, $\beta_m = \lambda_g(T) \text{Nu}_D / (c_g \rho_g r_p)$ — коэффициент массоотдачи частиц, Nu_D — диффузионный аналог числа Нуссельта.

МЕТОД РЕШЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Задача решалась численно с использованием методов [13, 14]. Метод решения и выбор расчетной сетки описаны в работе [9]. Начальный радиус частиц алюминия и начальная массовая концентрация порошка варьировались. Из расчетов определялась минимальная энергия искры, необходимая для зажигания и дальнейшего распространения фронта горения по аэровзвеси.

Численное решение задачи (1)–(16) выполнено при следующих значениях параметров: $Q = 36.6$ МДж/кг, $k_0 = 1.11 \cdot 10^{-6}$ м^{1.5}/с, $\alpha_1 = 0.889$, $c_{p,g} = 1065$ Дж/(кг·К), $c_{v,g} = 768.2$ Дж/(кг·К), $\lambda_{g,0} = 0.025$ Вт/(м·К), $\mu_{Al} = 27 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $\mu_O = 16 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $c_p = 904$ Дж/(кг·К), $\rho_p^0 = 2380$ кг/м³, $\eta = 2 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $\rho_{O_2,0} = 0.264$ кг/м³, $p_0 = 0.1$ МПа, $T_0 = 300$ К, $\rho_0 = p_0/R_g T_0$, $T_{p,ign} = 1400$ К. В расчетах варьировались начальный радиус частиц алюминия в диапазоне $r_{p0,i} = 2 \cdot 10^{-7} \div 4 \cdot 10^{-6}$ м, общая массовая концентрация частиц в диапазоне $m_{dust} = \sum_{i=1,2} \rho_{p0,i} = 0.1 \div 0.4$ кг/м³ и соотношение между массовыми концентрациями фракций частиц.

При постановке задачи полагалось, что коэффициент теплообмена определяется с физических позиций механики сплошных сред. Для обоснования применимости подхода механики сплошных сред предварительно была выполнена оценка числа Кнудсена: для частиц алюминия выбранных размеров $Kn = 0.037 \div 0.75$. Теплообмен при таких значениях числа Кнудсена соответствует режиму теплообмена при течении со скольжением, который описан в [12]. При $Kn = 0.037$ (соответствует максимальному диаметру частиц) режим теплообмена соответствует переходу от теплообмена при течении со скольжением к режиму, описываемому моделью сплошной среды. При $Kn = 0.75$ (соответствует минимальному диаметру частиц) режим теплообмена соответствует границе между режимом теплообмена при течении со скольжением и переходным режимом. Для крупных частиц число Кнудсена находится близко к границе, когда можно использовать подход механики сплошных сред. Этот подход мы распространяем и на мелкие частицы. В [15] приведены оценки коэффициентов массоотдачи и теплоотдачи, рассчитанные по модели сплошной

среды и модели свободномолекулярного режима, в интервале $Kn = 0.1 \div 1$ значения этих коэффициентов отличаются не более чем на 20 %.

Перед тем как проводить параметрические расчеты по определению критических условий зажигания порошка алюминия, была выполнена серия пробных расчетов по подбору константы скорости химической реакции в законе горения (16). Ее подбирали таким образом, чтобы нормальная скорость горения монодисперсного порошка алюминия соответствовала экспериментальным данным [1] и результатам [5]. Для расчета был взят порошок с частицами радиусом $4 \div 6$ мкм. Согласно данным [1, 5] зависимость нормальной скорости горения от массовой концентрации порошка алюминия для частиц такого же среднего размера $d_p = 4 \div 6$ мкм имеет вид, представленный на рис. 1 толстой линией с символами, наши результаты для подобранного значения $k_0 = 1.11 \cdot 10^{-6}$ м^{1.5}/с представлены тонкой сплошной линией. Из сравнения кривых на рис. 1 видно, что при массовой концентрации порошка алюминия $0.1 \div 0.3$ кг/м³ наблюдается согласование с результатами [1, 5]. Последующие расчеты выполнены с использованием подобранного значения коэффициента k_0 .

Была проведена серия расчетов критиче-

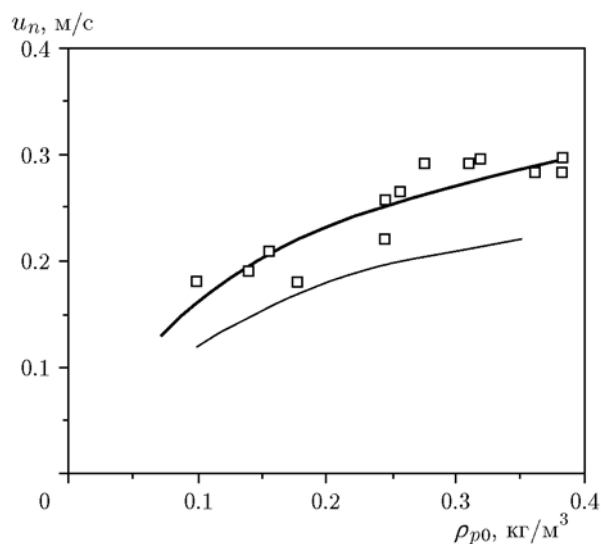


Рис. 1. Зависимость нормальной скорости горения аэровзвеси порошка алюминия от массовой концентрации порошка:

толстая линия с символами — результаты [1, 5], $d_p = 4 \div 6$ мкм, тонкая сплошная линия — результаты расчета по модели (1)–(16), $d_p = 4$ мкм

ских условий искрового зажигания с выходом на устойчивый режим распространения фронта горения аэровзвеси порошка алюминия. Критические условия определялись аналогично работе [9]. Для каждого состава смеси (с заданными радиусами и массовыми концентрациями частиц, а также распределением частиц по фракциям) выполнена серия параметрических расчетов минимальной энергии искры Q_{sp} , при которой возможно зажигание порошка алюминия с последующим выходом на устойчивый режим горения. Минимальная энергия искры, аналогично работе [9], определялась в размерности Дж/м. Для нахождения минимальной энергии в размерности Дж необходимо умножить Q_{sp} на величину межэлектродного расстояния, составляющую 4 ÷ 6 мм [9, 16].

На рис. 2 представлены результаты расчета зажигания и выхода на устойчивый режим горения аэровзвеси порошка алюминия с радиусом частиц $r_{p0,1} = 1$ мкм ($\rho_{p0,1} = 0.5m_{dust}$), $r_{p0,2} = 0.2$ мкм ($\rho_{p0,2} = 0.5m_{dust}$) при общей массовой концентрации порошка $m_{dust} = 0.13$ кг/м³. Профили температуры газа и частиц первой фракции приведены на рис. 2, *a* через интервалы времени $\Delta t = 2 \cdot 10^{-3}$ с. Энергия искры равнялась 15 Дж/м и соответствовала минимальной энергии искрового зажигания для заданного состава смеси. Для выбранных масштабов профили температуры газа и частиц второй фракции совпадают, температура частиц первой фракции незначительно отличается от температуры газа на этапе воспламенения и горения частиц (см. рис. 2, *a*). Распределения радиуса шарика алюминия в частицах первой и второй фракций на рис. 2, *b* соответствуют моментам времени на рис. 2, *a*. Согласно рис. 2, *b* полное сгорание крупных частиц длится дольше полного сгорания мелких частиц. Для бидисперсной аэровзвеси порошка алюминия это приводит к зависимости критических условий искрового зажигания с выходом на устойчивый режим горения от присутствия мелкодисперсной фракции частиц. Соответственно, скорость горения взвеси порошка алюминия также существенно зависит от присутствия мелкодисперсной фракции частиц. Для случая, представленного на рис. 2, рассчитанная нормальная скорость горения взвеси порошка алюминия в воздухе составила $u_n = 0.33$ м/с, видимая скорость горения — $u_f = 3.6$ м/с.

Результаты параметрических расчетов за-

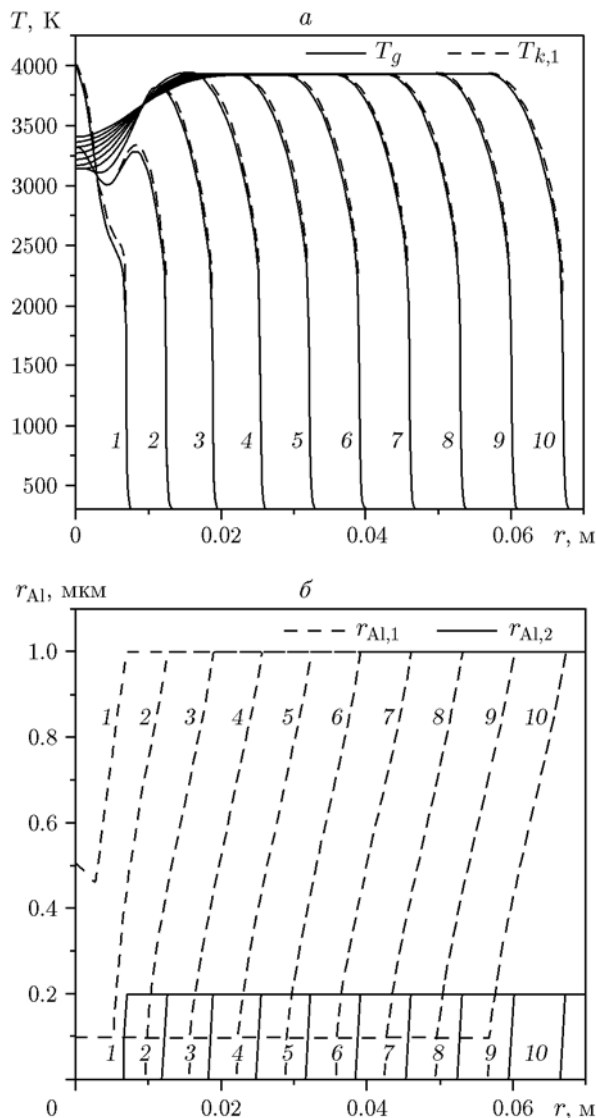


Рис. 2. Распределения температуры газа и частиц первой фракции (*a*) и радиуса алюминия в частицах (*b*) по пространству в различные моменты времени:

1 — 2 мс, 2 — 4 мс, 3 — 6 мс, 4 — 8 мс, 5 — 10 мс, 6 — 12 мс, 7 — 14 мс, 8 — 16 мс, 9 — 18 мс, 10 — 20 мс

дачи (1)–(16) представлены на рис. 3–5. На рис. 3 показана зависимость минимальной энергии искрового зажигания бидисперсной взвеси частиц алюминия радиусов $r_{p0,1} = 1$ мкм ($\rho_{p0,1} = 0.5m_{dust}$) и $r_{p0,2} = 0.5$ мкм ($\rho_{p0,2} = 0.5m_{dust}$) и взвеси частиц алюминия радиусов $r_{p0,1} = 2$ мкм ($\rho_{p0,1} = 0.5m_{dust}$) и $r_{p0,2} = 0.2$ мкм ($\rho_{p0,2} = 0.5m_{dust}$) от общей массы порошка алюминия. Соотношение между массовыми концентрациями фракций ча-

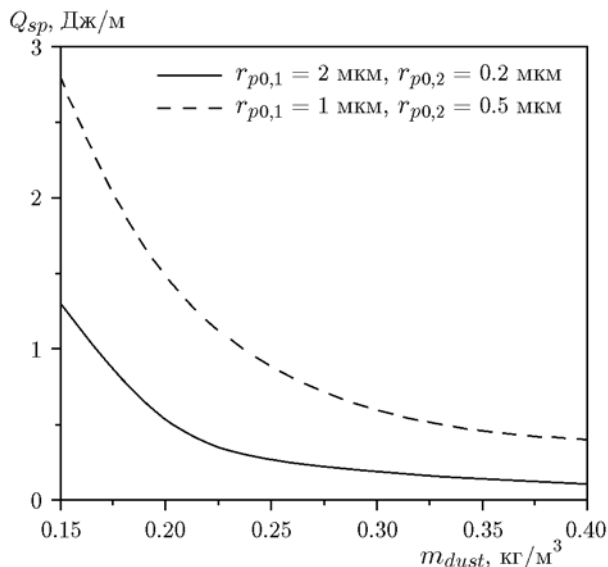


Рис. 3. Зависимость минимальной энергии искрового зажигания бидисперсной аэровзвеси порошка алюминия от общей массовой концентрации порошка. Распределение массовых концентраций частиц алюминия по фракциям: $\rho_{p0,1} = \rho_{p0,2} = 0.5m_{dust}$

стиц задавалось равным 50 : 50 %. Согласно рис. 3 минимальная энергия искрового зажигания смеси с частицами $r_{p0,1} = 1$ мкм, $r_{p0,2} = 0.5$ мкм больше минимальной энергии искрового зажигания смеси с частицами $r_{p0,1} = 2$ мкм и $r_{p0,2} = 0.2$ мкм. Это объясняется тем, что при зажигании бидисперсной взвеси первыми воспламеняются частицы наименьшего радиуса, далее нагреваются крупные частицы. Устойчивый режим распространения пламени также поддерживается за счет воспламенения мелких частиц и последующего нагрева и горения крупных. Таким образом, взвесь с частицами радиусом $r_{p0,2} = 0.2$ мкм зажигается при меньшей энергии искры. Согласно рис. 3, чем больше массовая концентрация порошка, тем больше энергии искры требуется для инициирования зажигания с последующим устойчивым режимом распространения пламени. При этом для смеси с содержанием частиц алюминия выше стехиометрического минимальная энергия искрового зажигания для одного и того же состава порошка слабо зависит от общей массовой концентрации частиц алюминия в смеси.

На рис. 4 приведена зависимость минимальной энергии искрового зажигания от состава порошка алюминия при общей массовой концентрации порошка $m_{dust} = 0.2$ кг/м³

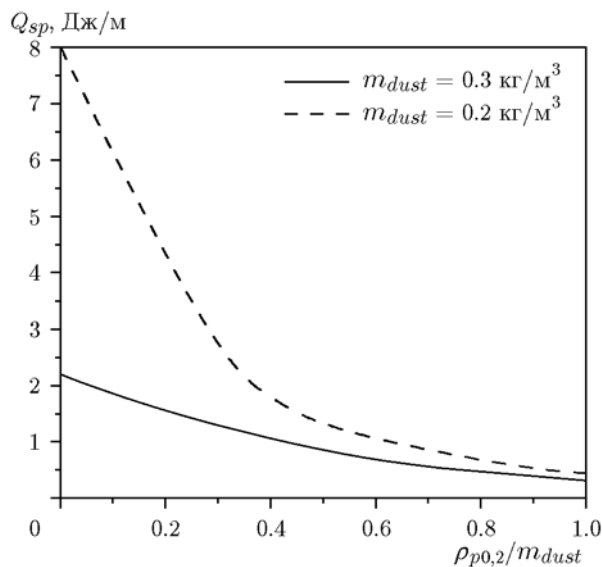


Рис. 4. Зависимость минимальной энергии искрового зажигания бидисперсной аэровзвеси порошка алюминия от относительного содержания мелкодисперсной фракции частиц. $r_{p0,1} = 1$ мкм, $r_{p0,2} = 0.5$ мкм

(штриховая кривая) и 0.3 кг/м³ (сплошная кривая). В расчетах полагалось, что взвесь состоит из частиц радиусов $r_{p0,1} = 1$ мкм и $r_{p0,2} = 0.5$ мкм, при этом соотношение между фракциями частиц менялось. Ось абсцисс на рис. 4 соответствует доле частиц радиусом $r_{p0,2} = 0.5$ мкм в общей массе порошка алюминия. Нуль на оси абсцисс соответствует монодисперсной взвеси, содержащей только частицы радиусом $r_{p0,1} = 1$ мкм. Единица на оси абсцисс соответствует монодисперсному порошку с частицами радиусом $r_{p0,2} = 0.5$ мкм. Результаты расчетов показали, что минимальная энергия искрового зажигания тем меньше, чем больше доля мелкодисперсной фракции частиц в порошке. При этом для аэровзвеси с общей массой порошка $m_{dust} = 0.2$ кг/м³ минимальная энергия искрового зажигания сильнее зависит от содержания мелкодисперсной фракции частиц.

На рис. 5 представлена зависимость минимальной энергии искрового зажигания от размера частиц крупной фракции. В расчетах полагалось, что радиус частиц второй фракции равен $r_{p0,2} = 0.2$ мкм, общая массовая концентрация порошка равнялась 0.2 кг/м³, массовые концентрации фракций частиц задавались равными между собой, $\rho_{p0,1} = \rho_{p0,2} = 0.5m_{dust}$, радиус частиц первой фракции варьировался в диапазоне 0.2 ÷ 2 мкм. Согласно полученным

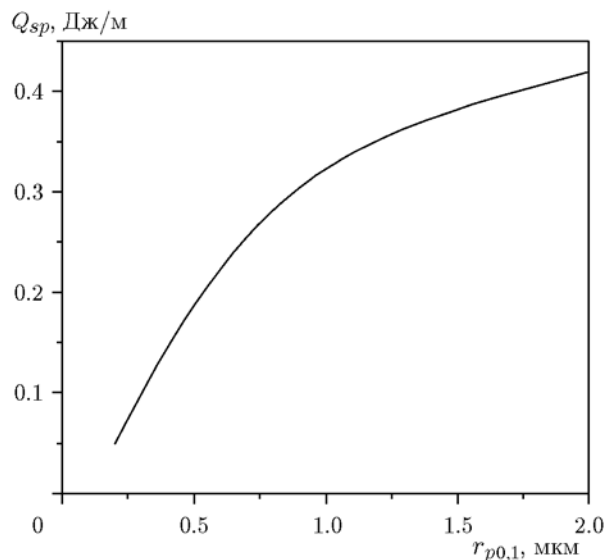


Рис. 5. Зависимость минимальной энергии искрового зажигания бидисперсной аэровзвеси алюминия от радиуса частиц крупнодисперсной фракции ($r_{p0,2} = 0.2$ мкм, $m_{dust} = 0.2$ кг/м³)

результатам разброс в минимальной энергии искрового зажигания составил от 0.05 Дж/м (для монодисперсной смеси с частицами $r_{p0,1} = r_{p0,2} = 0.2$ мкм) до 0.42 Дж/м (для смеси с частицами $r_{p0,1} = 2$ мкм, $r_{p0,2} = 0.2$ мкм).

ВЫВОДЫ

На основе двухфазной двухскоростной модели реагирующей газодисперсной среды разработана физико-математическая модель искрового зажигания бидисперсной аэровзвеси порошка алюминия.

Выполнены параметрические расчеты задачи для определения зависимости минимальной энергии искрового зажигания от размера и массовой концентрации частиц, а также распределения частиц порошка алюминия по фракциям.

Для частиц алюминия в диапазоне размеров $0.2 \div 4$ мкм показано, что при увеличении массовой концентрации порошка алюминия в сторону стехиометрического состава минимальная энергия искрового зажигания стремится к одному и тому же значению. При этом снижается зависимость минимальной энергии искрового зажигания от размера частиц и распределения частиц по фракциям.

Присутствие мелкодисперсной фракции частиц существенным образом отражается на

минимальной энергии искрового зажигания с выходом горения на устойчивый режим. В присутствии мелкодисперсной фракции частиц минимальная энергия искрового зажигания бидисперсной аэровзвеси порошка алюминия значительно уменьшается по сравнению с минимальной энергией искрового зажигания монодисперсной аэровзвеси с крупными частицами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ягодников Д. А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.
2. Cassel H. M., Das Gupta A. K., Guruswamy S. Factors affecting on flame propagation through dust clouds // Symp. on Combustion and Flame and Explosion Phenomena. — 1949. — V. 3, iss. 1. — P. 185–190.
3. Агеев Н. Д., Горошин С. В., Золотко А. Н., Полетаев Н. И. Скорость стационарного пламени в газозвесах алюминия // Горение гетерогенных и газовых систем: материалы IX Всесоюз. симпози. по горению и взрыву, 1989 г. — Черноголовка, 1989. — С. 83–85.
4. Агеев Н. Д., Вовчук Я. И., Горошин С. В., Золотко А. П., Полетаев Н. И. Стационарное горение газозвесей твердых горючих. Ламинарный диффузионный двухфазный факел // Физика горения и взрыва. — 1990. — Т. 26, № 6. — С. 54–62.
5. Бойчук Л. В. Исследование процессов распространения пламени в двухкомпонентных смесях: автореф. дис... канд. физ-мат. наук, 01.04.17. — Одесса: ОГУ, 1993.
6. Кудрявцев В. М., Сухов А. В., Воронцовский А. В., Шпара А. П. Горение газозвесей металлических порошков (трехзонная модель) // Физика горения и взрыва. — 1981. — Т. 17, № 6. — С. 49–55.
7. Кудрявцев В. М., Сухов А. В., Воронцовский А. В., Вяткин А. И. Распространение фронта химической реакции в двухфазном потоке // Высокотемпературные газовые потоки, их получение и диагностика. Вып. 4. — Харьков: ХАИ, 1987. — С. 66–69.
8. Беляев А. Ф., Фролов Ю. В., Коротков А. И. О горении и воспламенении частиц мелкодисперсного алюминия // Физика горения и взрыва. — 1968. — Т. 4, № 3. — С. 323–329.
9. Моисеева К. М., Крайнов А. Ю. Численное моделирование искрового зажигания аэровзвеси угольной пыли // Физика горения и взрыва. 2018. — Т. 54, № 2. — С. 61–70.
10. Порязов В. А., Крайнов А. Ю., Крайнов Д. А. Математическое моделирование горения пороха Н с добавлением порошка алюминия // Инж.-физ. журн. — 2015. — Т. 88, № 1. — С. 93–101.

11. **Нигматулин Р. И.** Динамика многофазных сред. — М.: Наука, 1987.
12. **Исаченко И. П., Осипова В. А., Сукомел А. С.** Теплопередача. — М.: Энергия, 1975.
13. **Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П.** Численное решение многомерных задач газовой динамики. — М.: Наука, 1976.
14. **Крайко А. Н.** О поверхностях разрыва в среде, лишенной «собственного» давления // Прикл. математика и механика. — 1979. — Т. 43, № 3. — С. 500–510.
15. **Сандарам Д., Янг В., Зарко В. Е.** Горение наночастиц алюминия (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 2. — С. 37–63.
16. **Корольченко А. Я.** Пожаровзрывобезопасность промышленной пыли. — М.: Химия, 1986.

Поступила в редакцию 01.10.2018.

После доработки 02.11.2018.

Принята к публикации 20.02.2019.
