

Научная статья

УДК 533

doi: 10.17223/19988621/96/7

Исследование скорости горения аэровзвеси порошка алюминия с учетом лучистого теплопереноса

Ксения Михайловна Моисеева¹, Артем Андреевич Митрофанов¹,
Евгения Сергеевна Чура¹

^{1,2,3} *Томский государственный университет, Томск, Россия*

¹ *Moiseeva_KM@t-sk.ru*

² *art_1827@mail.ru*

³ *yulia.chura@mail.ru*

Аннотация. Статья посвящена математическому моделированию процесса горения порошка алюминия в воздухе. Математическая модель основана на модели механики двухфазной реагирующей среды и учитывает лучистый теплоперенос в газ-взвеси. В работе проведено параметрическое исследование, цель которого – определение зависимости видимой и нормальной скорости горения смеси от состава. Показано, что наличие лучистого теплопереноса для мелкодисперсного порошка алюминия снижает видимую скорость распространения пламени по газ-взвеси порошка алюминия.

Ключевые слова: горение, аэровзвесь порошка алюминия, скорость распространения пламени, двухфазные потоки, численное моделирование

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ 24-21-00071.

Для цитирования: Моисеева К.М., Митрофанов А.А., Чура Е.С. Исследование скорости горения аэровзвеси порошка алюминия с учетом лучистого теплопереноса // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2025. № 96. С. 81–91. doi: 10.17223/19988621/96/7

Original article

A study of the burning rate of an air suspension of the aluminum powder with allowance for radiant heat transfer

Kseniya M. Moiseeva¹, Artyom A. Mitrofanov², Evgeniya S. Chura³

^{1,2,3} *Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

¹ *Moiseeva_KM@t-sk.ru*

² *art_1827@mail.ru*

³ *yulia.chura@mail.ru*

Abstract. This paper presents a numerical study of the combustion of an aluminum powder-air suspension in the presence of radiant heat transfer. The physical and mathematical formulation of the problem is based on the approaches of mechanics for two-phase reacting media. The solution method uses an arbitrary discontinuity decay algorithm. A parametric

study of the apparent and normal burning rates of the aluminum powder-air suspension depending on the composition and degree of blackness of the gas suspension is implemented. According to the results obtained, the radiant heat losses can significantly affect the rate of flame propagation in the gas suspension of the fine aluminum powder. It is shown that the presence of the radiant heat transfer reduces the apparent flame propagation velocity through the gas suspension of the aluminum powder.

Keywords: combustion, air suspension of aluminum powder, flame propagation velocity, two-phase flows, numerical modeling

Acknowledgments: This study was financially supported by the Russian Science Foundation (grant No. 24-21-00071).

For citation: Moiseeva, K.M., Mitrofanov, A.A., Chura, E.S. (2025) A study of the burning rate of an air suspension of the aluminum powder with allowance for radiant heat transfer. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 96. pp. 81–91. doi: 10.17223/19988621/96/7

Введение

В [1] предложена модель горения частиц алюминия, основанная на концепции, что воспламенение частицы не происходит до достижения ею температуры плавления оксидной оболочки. При этом гетерогенные процессы, такие как проникновение кислорода внутрь капли и увеличение толщины оксидной оболочки на ее поверхности, оказывают существенное влияние на продолжительность горения. В работе [2] исследовано воспламенение и горение аэровзвеси порошка алюминия в ламинарном потоке воздуха в условиях обедненного топлива. Сделан обзор работ по горению аэровзвеси порошка алюминия и показано, что с увеличением радиуса частиц скорость горения аэровзвеси уменьшается. В работе [3] показано, что с ростом массовой концентрации частиц увеличиваются максимальная температура пламени смеси и температура воспламенения аэровзвеси в целом. Выводы работы [3] удовлетворительно согласуются с результатами [4]. В работе [5] выявлено, что взвесь порошка алюминия горит при атмосферном давлении в диффузионном режиме. Скорость пламени при этом плавно возрастает с увеличением концентрации горючего. Максимальное значение скорости горения аэровзвеси порошка алюминия АСД-4 достигается для стехиометрического состава газозвеси. В [6] указано, что для частиц алюминия диаметром от 4 до 6 мкм при массовых концентрациях порошка алюминия 100–400 г/м³ нормальная скорость распространения фронта горения составляет 10–30 см/с. В [7] показано, что зависимость скорости горения порошка алюминия во взрывной камере постоянного давления от массовой концентрации частиц в аэровзвеси имеет параболический вид. В [8] выполнено математическое моделирование горения одиночной частицы алюминия в смеси 79% Ar и 21% O₂. Основной вывод работы [8] гласит, что по мере сгорания частицы алюминия изменяется тип теплообмена частицы с окружающей средой: на начальных стадиях интенсивен теплообмен излучением, после сгорания частицы и увеличения ее радиуса наибольшая интенсивность теплообмена наблюдается за счет механизмов теплопроводности. Для частиц диаметром 0.2–0.4 мм лучистый теплоперенос составляет от 30 до 50% общей энергии, отдаваемой в окружающую среду. Для порошка алюминия с диаметром частиц менее 50 мкм интенсивность лучистого теплопереноса не превышает 8%.

Настоящая работа основана на модели, предложенной в работе [9] и основанной на подходах из работы [10]. В отличие от [9] в настоящей работе учитывается влияние лучистого теплопереноса в газозвеси. И хотя в работе [8] утверждается, что для одиночных мелкодисперсных частиц алюминия влиянием лучистого теплопереноса можно пренебречь, присутствие лучистого теплообмена и теплопереноса может повлиять на скорость горения аэрозвеси порошка алюминия. В работах [11, 12] указано, что лучистый теплообмен во взвесах пыли достаточно сложен и эффективная степень черноты для газозвесей зависит от материала, размера, концентрации частиц пыли, а также от состава газа и не определяется степенью черноты материала частиц. Из ранее выполненных оценок эффективной степени черноты для аэрозвеси угольной пыли [13] эффективная степень черноты аэрозвеси составила 0.1–0.3. Было показано, что эффективная степень черноты может менять скорость горения аэрозвеси, определенную численным моделированием.

Цель настоящей работы – исследование скорости распространения пламени в смеси порошка алюминия и воздуха и определение влияния интенсивности лучистого теплопереноса на расчетную скорость горения смеси.

Физико-математическая модель

Предполагается, что в воздухе равномерно распределена монодисперсная взвесь порошка алюминия с массовой концентрацией частиц ρ_{kb} , размером частиц $r_{Al,0}$. На левой границе области расположен тонкий очаг зажигания протяженностью x_z . Правая граница области полагается бесконечно удаленной от источника зажигания. Коэффициенты диффузии и теплопроводности газа зависят от температуры [9]. Горение частиц алюминия описывается на основе экспериментальных данных аналогично описаниям из [9], воспламенение частицы алюминия происходит при достижении ею температуры зажигания T_{kz} . Скорость гетерогенной химической реакции на частицах описывается с учетом массоотдачи и массообмена. Учитывается тепловое и динамическое взаимодействие между частицами и газом. Полагается, что при горении частицы алюминия радиус алюминия в частице r_{Al} уменьшается, радиус самой частицы r_p растет за счет нарастания оксидного слоя на поверхности частицы. До начала химических реакций в частице $r_k = r_{Al,0}$. Система уравнений математической постановки записывается в виде:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g u_g}{\partial x} = -G, \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho_g u_g)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_g u_g^2 + p)}{\partial x} = -\tau_{fr} - Gu_g, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho_g (\varepsilon_g + 0.5u_g^2)}{\partial t} + \frac{\partial [\rho_g u_g (\varepsilon_g + 0.5u_g^2) + pu_g]}{\partial x} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_g (T_g) \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) - G \left(c_v T_g + u_g^2 / 2 \right) - u_p \tau_{fr} + \alpha_p n_p S_p (T_p - T_g), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_{O_2}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{O_2} u_g}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_g \rho_g (T_g) \frac{\partial a_{O_2}}{\partial x} \right) - G, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \frac{\partial \rho_p u_p}{\partial x} = G, \quad (5)$$

$$\frac{\partial (\rho_p u_p)}{\partial t} + \frac{\partial \rho_p u_p^2}{\partial x} = \tau_{fr} + G u_g, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_p (\varepsilon_p + 0.5 u_p^2)}{\partial t} + \frac{\partial \rho_p u_p (\varepsilon_p + 0.5 u_p^2)}{\partial x} = \frac{QG}{\alpha_1} - \alpha_p S_p n_p (T_p - T_g) + \\ + G_{izl} + G (c_v T_g + u_g^2 / 2) + \tau_{fr} u_p, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} + \frac{\partial n_p u_p}{\partial x} = 0, \quad (8)$$

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

$$T_g(x, t_z) = \begin{cases} T_z, & 0 \leq x \leq x_0 \\ T_b, & x_0 < x < \infty \end{cases}, \quad T_p(x, t_z) = T_b, \quad \rho_{O_2}(x, t_z) = \rho_{O_2,b}, \quad (10)$$

$$\rho_p(x, t_z) = \rho_{p,b}, \quad u_g(x, t_z) = u_p(x, t_z) = 0, \quad \rho(x, t_z) = \rho_{p,b}, \quad n_p(x, t_z) = n_{p,b}.$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_{O_2}(0, t)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T_g(0, t)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \rho(0, t)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \rho_p(0, t)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial n_p(0, t)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T_p(0, t)}{\partial x} = 0, \quad u_p(0, t) = 0, \quad u_g(0, t) = 0, \\ \frac{\partial \rho_{O_2}(\infty, t)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T_g(\infty, t)}{\partial x} = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

В (1)–(11) приняты следующие обозначения: t – время, x – координата, ρ_g , ρ_{O_2} , ρ_p – плотность газа, парциальная плотность кислорода, распределенная плотность частиц, u – скорость, r_p – радиус частицы, p – давление, λ – коэффициент теплопроводности, $\lambda = \lambda_{st} (T/T_b)^{2/3}$, D_g – коэффициент диффузии, $D_g(T_g) = \lambda_g(T_g) / (c_p \rho_g)$, Q – тепловой эффект реакции на поверхности частиц, T – температура, η – коэффициент динамической вязкости газа. $\alpha_p = Nu_p \lambda_g / (2r_p)$ – коэффициент теплообмена газа с частицами, $\varepsilon_g = p / (\rho_g (\gamma - 1))$ – внутренняя энергия газа, $\gamma = c_{pg} / c_{vg}$ – 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, $S_m = \pi r_p^2$ – площадь миделевого сечения 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, $C_r = 24 (1 + 0.15 Re^{0.682}) / Re$ – коэффициент трения, Re – число Рейнольдса, $Nu_p = 2 + (Nu_l^2 + Nu_t^2)^{1/2}$ – число Нуссельта, где $Nu_l = 0.664 Re^{0.5}$,

$Nu_t = 0.037 Re^{0.8}$, α_1 – стехиометрический коэффициент реакции кислорода с частицами алюминия. Индексом b отмечены начальные значения параметров состояния, p – параметры частиц, g – параметры газа, Al – параметры алюминия, содержащегося в частице.

В уравнениях (1)–(8) правые части, отвечающие за химическое взаимодействие газа и частиц, определяются через радиус алюминия в частице. Слагаемые, отвечающие за инерционное и тепловое взаимодействие, определяются через радиус самой частицы, состоящей из алюминия и оксидного слоя на поверхности частицы. Для определения скорости изменения массы частиц при их горении G , примем, что продуктом сгорания алюминия является окисел Al_2O_3 , который остается на частице; плотность частицы в процессе горения не меняется. Размер оставшейся части алюминия в частице r_{Al} определяется из соотношения

$$r_{Al} = \left[\left(\frac{\mu_{Al} + 3/2 \mu_O}{\mu_{Al}} r_{Al,0}^3 - \frac{\rho_p}{(4/3)\pi \rho_p^0} \right) \frac{2\mu_{Al}}{3\mu_O} \right]^{1/3}, \quad (12)$$

где μ_O , μ_{Al} – молярная масса кислорода и алюминия, ρ_p^0 – собственная плотность алюминия.

Для радиуса частицы r_p , рассчитанного с учетом того, что частица состоит из несгоревшего алюминия и окисла Al_2O_3 , выполняется соотношение

$$r_p = 3 \sqrt[3]{\frac{3\rho_p}{4\pi\rho_p^0 n_p}}. \quad (13)$$

Подробный вывод уравнений (12)–(13) приведен в [9].

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

$$G = \alpha_1 n_p \rho_p^0 S_{Al} \frac{k(a_{O_2}, r_{Al}) \beta_p}{(k(a_{O_2}, r_{Al}) + \beta_p)}, \quad (14)$$

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

Перенос тепла за счет излучения от частиц определялся аналогично [14]:

$$G_{izl} = n_p S_{p,m} (4\sigma \varepsilon T_p^4 - U c), \quad (15)$$

где U – объемная плотность излучения, c – скорость света, ε – степень черноты, σ – постоянная Стефана–Больцмана. Величина объемной плотности излучения рассчитывалась из уравнения

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{3n_p S_{p,m}} \frac{dU}{dx} \right) = -n_p S_{p,m} (4\sigma \varepsilon T_p^4 - U c) \quad (16)$$

с граничными условиями $\frac{dU}{dx} = 0$, $cU(\infty) = 4\sigma \varepsilon T_b^4$.

Температура зажигания частиц алюминия определялась по уравнению [2]

$$T_{ign} = \exp\left(0.087 \cdot \lg(2r_{Al,0} \cdot 10^6) + 7.28\right). \quad (17)$$

Задача (16) решалась с использованием конечно-разностного метода с неявной аппроксимацией правой части уравнения. Для решения уравнений (1)–(11) использовались метод С.К. Годунова [16] и модификация метода С.К. Годунова, изложенная в [16]. После определения потоков, переносимых на гранях расчетных ячеек, уравнения (1)–(11) решались конечно-разностным методом. Подробная методика численного решения описана в [9], методика решения уравнения (16) описана в работе [14].

Результаты параметрических расчетов и обсуждение

Для решения задачи взяты физико-химические параметры из работы [9]. Результаты численного исследования представлены на рис. 1–6. Согласно рис. 1 для выбранного радиуса частиц температура газа отличается от температуры частиц и имеет перегиб в зоне горения частицы алюминия. Наблюдаемые скорости движения газа и частиц отличаются незначительно для выбранного радиуса.

Рисунок 1 соответствует установившемуся режиму распространения пламени. Затем волна горения перемещается по пространству со скоростями и температурами, приведенными на рис. 1. Для частиц меньшего радиуса из расчетов получено малое отклонение между динамическими и тепловыми характеристиками газа и частиц.

Учет лучистого теплопереноса влияет на скорость распространения пламени в газозвеси за счет того, что частицы теряют температуру из-за излучения. Далее было выполнено параметрическое исследование влияния учета степени черноты на скорость распространения пламени газозвеси частиц различного радиуса и массовой концентрации. Зависимости скоростей распространения пламени в газозвеси приведены на рис. 2–6.

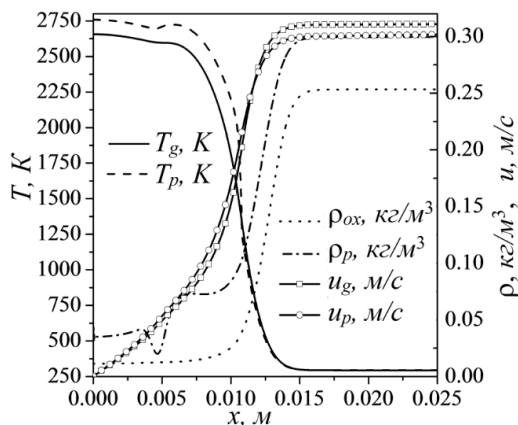


Рис. 1. Структура фронта пламени. $r_{Al,0} = 10$ мкм, $\rho_{p,b} = 0.3$ кг/м³, $\varepsilon = 0.1$

Fig. 1. Structure of the flame front at $r_{Al,0} = 10$ μ m, $\rho_{p,b} = 0.3$ kg/m³, $\varepsilon = 0.1$

На рис. 2 представлена зависимость видимой скорости горения аэрозвеси порошка алюминия с радиусом частиц 2 мкм от массовой концентрации порошка

в аэровзвеси. Для выбранных массовых концентраций частиц при значении $\varepsilon = 0.1$ скорость горения аэровзвеси порошка алюминия с увеличением массовой концентрации частиц увеличивается.

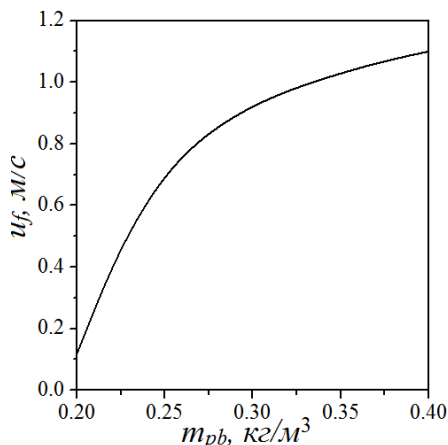


Рис. 2. Зависимость видимой скорости горения аэровзвеси порошка алюминия от массовой концентрации частиц алюминия в смеси. $r_{Al,0} = 2$ мкм, $\varepsilon = 0.1$

Fig. 2. Apparent burning rate of the air suspension of the aluminum powder as a function of mass concentration of aluminum particles in the mixture at $r_{Al,0} = 2$ μm , $\varepsilon = 0.1$

На рис. 3 представлена зависимость нормальной и видимой скорости распространения пламени по взвешенному порошку алюминия от радиуса частиц алюминия. Наблюдаемая закономерность поведения скорости горения от величины радиуса частицы соответствует работам [2, 9], с увеличением радиуса частиц скорость горения ведет себя асимптотически, замедляя скорость уменьшения.

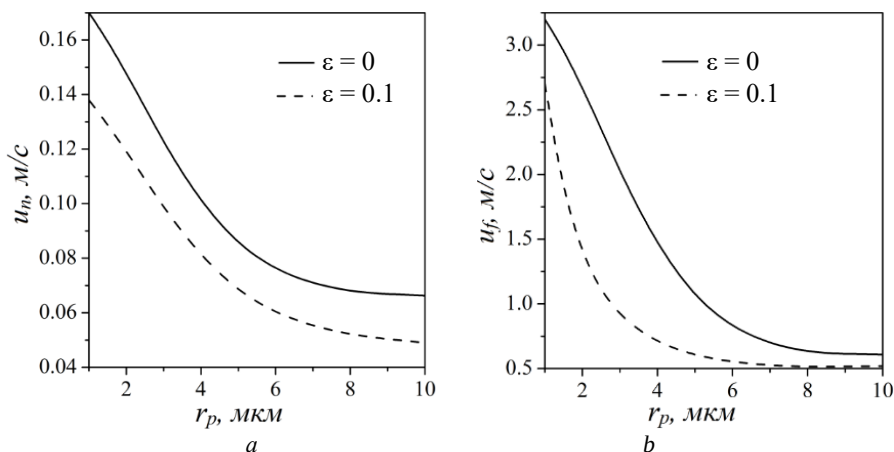


Рис. 3. Зависимость нормальной (a) и видимой (b) скорости горения аэровзвеси порошка алюминия от радиуса частиц алюминия в смеси, $\rho_{p,b} = 0.3$ кг/м³

Fig. 3. (a) Normal and (b) apparent burning rates of the air suspension of the aluminum powder as functions of the radius of aluminum particles in the mixture at $\rho_{p,b} = 0.3$ kg/m³

На рис. 4 представлена зависимость видимой и нормальной скорости горения газозвеси порошка алюминия от эффективной степени черноты ε . Сплошной линией представлена нормальная скорость горения газозвеси, пунктиром – видимая скорость. При увеличении степени черноты численные значения видимой и нормальной скорости горения газозвеси уменьшаются. Согласно рисунку относительное изменение нормальной скорости горения, посчитанное из разности скоростей горения при степени черноты 0 и 0.2, составило 21.5%.

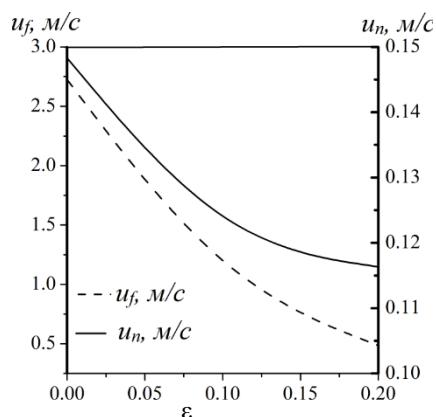


Рис. 4. Зависимость видимой и нормальной скорости горения аэрозвеси порошка алюминия от степени черноты, $\rho_{p,b} = 0.3 \text{ кг/м}^3$, $r_{Al,0} = 2 \text{ мкм}$

Fig. 4. Apparent and normal burning rates of the air suspension of aluminum powder as functions of the degree of blackness at $\rho_{p,b} = 0.3 \text{ kg/m}^3$, $r_{Al,0} = 2 \text{ }\mu\text{m}$

Уменьшение скорости распространения пламени с увеличением степени черноты объясняется тем, что при выбранных массовых концентрациях порошка алюминия потери за счет лучистого теплопереоса превышают приход тепла от горения частиц и поток тепла за счет механизмов теплопроводности газа. Соответственно, частицы алюминия имеют меньшую температуру при увеличении степени черноты. Снижение температуры порошка замедляет скорость его горения. Это объясняется тем, что излучение тепла частицами из зоны интенсивных гетерогенных химических реакций понижает температуру частицы. Известно, что зона химической реакции определяется одним «Семеновским интервалом» от адиабатической температуры горения. При учете излучения горячие частицы отдают часть тепла за счет излучения и получают тепло от химической реакции на поверхности, лимитируемой диффузией кислорода к поверхности частицы. В результате этих «условно конкурирующих» процессов излучение понижает температуру частиц и, соответственно, скорость распространения фронта горения.

Заключение

В работе выполнено численное исследование горения аэрозвеси порошка алюминия при наличии лучистого теплопереноса. Показано, что наличие лучистого теплопереноса для мелкодисперсного порошка алюминия снижает видимую скорость распространения пламени по газозвеси порошка алюминия. Можно сделать

вывод, что для задач горения газодисперсных сред нужно учитывать влияние лучистого теплопереноса.

Список источников

1. Dreizin E.L. On the mechanism of asymmetric aluminum particle combustion // *Combustion and Flame*. 1999. V. 117. P. 841–850.
2. Huang Y., Risha G.A., Yang V., Yetter R.A. Effect of particle size on combustion of aluminum particle dust in air // *Combustion and Flame*. 2009. V. 156. P. 5–13.
3. Пурмохаммад Я., Сабзпушани М. Влияние скорости деформации, размера частиц и коэффициента избытка горючего на горение в противотоках смеси воздуха и микрочастиц алюминия // *Физика горения и взрыва*. 2018. Т. 54, № 6. С. 59–67.
4. Badiola C., Gill R.J., Dreizin E.L. Combustion characteristics of micron-sized aluminum particles in oxygenated environments // *Combustion and Flame*. 2011. V. 158. P. 2064–2070.
5. Полетаев Н.И. Связь скорости распространения пылевого пламени с режимом горения частиц горючего // *Физика горения и взрыва*. 2016. Т. 52, № 6. С. 60–69.
6. Бойчук Л.В. Исследование процессов распространения пламени в двухкомпонентных смесях: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.17. Одесса, 1993. 18 с.
7. Алексеев А.Г., Судакова И.В. Скорость распространения пламени в взрывчатых металлических порошках // *Физика горения и взрыва*. 1983. Т. 19, № 5. С. 34–36.
8. Крюков А.Ю., Малинин В.И. Зависимость размера зоны пламени одиночных частиц алюминия от давления // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*. 2020. № 60. С. 45–54.
9. Моисеева К.М., Крайнов А.Ю., Дементьев А.А. Определение критических условий искрового зажигания газодисперсного порошка алюминия в воздухе // *Физика горения и взрыва*. 2019. Т. 55, № 4. С. 26–33.
10. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987.
11. Блох А.Г. Основы теплообмена излучением. Л.: Госэнергоиздат, 1962. 332 с.
12. Канторович Б.В. Основы теории горения и газификации твердого топлива. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1958. 606 с.
13. Moiseeva K.M., Krainov A.Yu. Effect of radiation transport on minimal sparkplug ignition energy of nanosized coal-dust suspension // *Key Engineering Materials*. 2018. V. 769. P. 311–316.
14. Крайнов А.Ю. Влияние лучистого теплопереноса на минимальную энергию искрового зажигания газодисперсных // *Физика горения и взрыва*. 2001. Т. 37, № 3. С. 16–24.
15. Моисеева К.М. Моделирование газодинамики и горения газодисперсных порошков горючих материалов: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 1.1.9. Томск, 2023.
16. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976.
17. Крайко А.Н. О поверхностях разрыва в среде, лишенной 'собственного' давления // *Прикладная математика и механика*. 1979. Т. 43, № 3. С. 500–510.

References

1. Dreizin E. L. (1999) On the mechanism of asymmetric aluminum particle combustion. *Combustion and Flame*. 117(4), pp. 841–850. doi: 10.1016/S0010-2180(98)00125-4
2. Huang Y., Risha G.A., Yang V., Yetter R.A. (2009) Effect of particle size on combustion of aluminum particle dust in air. *Combustion and Flame*. 156(1), pp. 5–13. doi: 10.1016/j.combustflame.2008.07.018
3. Pourmohammad Y., Sabzpooshani M. (2018) Influence of the strain rate, particle size, and equivalence ratio on the combustion of the premixed air–aluminum microparticle mixture with a counterflow structure. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 54(6), pp. 681–688. doi: 10.1134/S0010508218060072

4. Badiola C., Gill R.J., Dreizin E.L. (2011) Combustion characteristics of micron-sized aluminum particles in oxygenated environments. *Combustion and Flame*. 158(10). pp. 2064–2070. doi: 10.1016/j.combustflame.2011.03.007
5. Poletaev N.I. (2016) Relationship between the dust flame propagation velocity and the combustion mode of fuel particles. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 52. pp. 673–682. doi: 10.1134/S0010508216060071
6. Boychuk L.V. (1993) *Issledovanie protsessov rasprostraneniya plameni v dvukhkomponentnykh smesnykh* [Investigation of the flame propagation in two-component mixtures]. Ph.D. thesis, Odessa: OSU.
7. Fialkov B.S., Shcherbakov N.D., Akst N.K., Besedin V.I., Ostrovskii M.D. (1983) Application of electrophysical effects for the monitoring and control of heat-engineering and technological processes. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 19(5). pp. 559–561. doi: 10.1007/BF00750419
8. Kryukov A.Yu., Malinin V.I. (2020) Zavisimost' razmera zony plameni odinochnykh chastits alyuminiya ot davleniya [Dependence of the flame zone size of single aluminum particles on pressure]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika – Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace Engineering*. 60. pp. 45–54.
9. Moiseeva K.M., Krainov A.Y., Dement'ev A.A. (2019) Critical conditions of spark ignition of a bidisperse aluminum powder in air. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 55. pp. 395–401. doi: 10.1134/S001050821904004X
10. Nigmatulin R.I. (1987) *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of multiphase media]. Moscow: Nauka.
11. Blokh A.G. (1962) *Osnovy teploobmena izlucheniem* [Fundamentals of heat exchange by radiation]. Leningrad: Gosenergoizdat.
12. Kantorovich B.V. (1958) *Osnovy teorii gorenii i gazifikatsii tverdogo topliva* [Fundamentals of the theory of combustion and gasification of solid propellants]. Moscow: Izdatel'stvo akademii nauk SSSR.
13. Moiseeva K.M., Krainov A.Yu. (2018) Effect of radiation transport on minimal sparkplug ignition energy of nanosized coal-dust suspension. *Key Engineering Materials*. 769. pp. 311–316. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.769.311
14. Krainov A.Y. (2001) Effect of radiant heat transfer on the minimum spark-ignition energy of gas suspensions. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 37. pp. 259–266. doi: 10.1023/A:1017515720961
15. Moiseeva K.M. (2023) *Modelirovanie gazodinamiki i gorenii gazovzvesey poroshkov goryuchikh materialov* [Modeling of gas dynamics and combustion of gas mixtures of combustible powders]. Dissertation, Tomsk.
16. Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.I., Kraiko A.N., Prokopov G.P. (1976) *Chislennoe reshenie mnogomernykh zadach gazovoy dinamiki* [Numerical solution of multidimensional problems of gas dynamics]. Moscow: Nauka.
17. Kraiko A.N. (1979) On discontinuity surfaces in a medium devoid of “proper” pressure. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 43(3). pp. 539–549. doi: 10.1016/0021-8928(79)90102-3

Сведения об авторах:

Моисеева Ксения Михайловна – доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры математической физики физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: Moiseeva_KM@t-sk.ru

Митрофанов Артем Андреевич – аспирант кафедры математической физики физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: art_1827@mail.ru

Чура Евгения Сергеевна – студент кафедры математической физики физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: yulia.chura@mail.ru

Information about the authors:

Moiseeva Kseniya M. (Doctor of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: Moiseeva_KM@t-sk.ru

Mitrofanov Artyom A. (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: art_1827@mail.ru

Chura Evgeniya S. (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: yulia.chura@mail.ru

Статья поступила в редакцию 06.11.2024; принята к публикации 01.08.2025

The article was submitted 06.11.2024; accepted for publication 01.08.2025