

УДК 536.46

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ПО ПРОТИВОТОЧНОЙ СХЕМЕ ВЗВЕСИ СУБМИКРОННЫХ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ В ВОЗДУХЕ

Н. Khalili¹, S. A. Madani¹, М. Mohammadi², А. К. Poorfar¹, М. Bidabadi¹,
Ph. Pendleton³

¹Иранский университет науки и техники, Нармак, Тегеран 16846-13114, Иран,
moein.mohammadi@fuw.edu.pl

²Университет Варшавы, Варшава 02093, Польша

³Университет Аделаиды, Аделаида SA 5000, Австралия

Исследуется структура пламени двухфазной смеси частиц алюминиевой пудры субмикронного размера и воздуха, горящей в условиях противоточной конфигурации. Разработана математическая модель для оценки положения пламени и скорости его распространения в условиях фиксированного коэффициента растяжения. В предложенной модели горения частиц рассматривается трехзональная структура пламени, включающая в себя зону предварительного подогрева, зону реакций и зону продуктов горения. Уравнения сохранения для каждой зоны решаются с учетом соответствующих граничных условий. Исследовано влияние термофореза и броуновского движения частиц горючего. Рассмотрено влияние размера частиц, а также их полидисперсности на скорость горения и положение пламени. Результаты расчета скорости распространения пламени находятся в разумном согласии с известными из литературы экспериментальными данными.

Ключевые слова: термофорез, броуновское движение, частицы алюминиевой пудры, структура пламени, асимптотическое решение.

DOI 10.15372/FGV20190107

ВВЕДЕНИЕ

Проблема нехватки ископаемых ресурсов в ближайшем будущем и постоянно увеличивающееся потребление энергии способствуют повышению интереса к исследованию горения пылевых частиц. Несмотря на внимание к этой теме, некоторые аспекты данного процесса все еще остаются неясными и нуждаются в дальнейшем изучении [1]. Плотность энергии при сжигании частиц неорганических топлив значительно выше по сравнению с органическими топливами. Наиболее распространен среди неорганических топлив алюминий. В частности, он используется для интенсификации горения ракетных топлив [2, 3]. Однако следует отметить, что взвесь частиц алюминия в воздухе даже при низкой концентрации частиц

подвержена риску взрыва и воспламенения при воздействии внешних источников тепла, таких как искра, процессы трения и т. п. Это может привести к человеческим жертвам и серьезному финансовому ущербу [4]. Одно из таких бедствий в результате взрыва взвеси частиц алюминия произошло в Китае в 2014 г. [5]. Приложено немало усилий для поиска решений, направленных на предотвращение подобных инцидентов [6, 7].

Горению алюминия были посвящены многочисленные исследования [8–13]. Изучались как микро-, так и наноразмерные частицы и их влияние на горение. Результаты по горению микрочастиц неприменимы для наноразмерных частиц, поскольку их физико-химические, тепловые и электрические свойства совершенно другие [14]. Например, уменьшение диаметра частиц до 10 нм резко изменяет температуру плавления, точку кристаллизации и теплоту плавления [15]. Наиболее важным различием между этими двумя масштабами является различие удельных поверхностей, что объясняет более высокую реакционную способ-

© Н. Khalili¹, S. A. Madani¹, М. Mohammadi²,
А. К. Poorfar¹, М. Bidabadi¹, Ph. Pendleton³, 2019.

¹School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Narmak, Tehran, 16846-13114, Iran. ²Institute of Geophysics, Faculty of Physics, University of Warsaw, Warsaw, 02093, Poland. ³School of Chemical Engineering, University of Adelaide, Adelaide, SA 5000, Australia.

ность наноразмерных частиц [16]. Кроме того, каталитическая активность наночастиц выше, они имеют другое магнитное поведение, большую пластичность, меньшее время горения и меньшую температуру горения [17–19]. В работе [20] представлена модель, описывающая скорость горения взвеси алюминиевых частиц в воздухе в зависимости от размера частиц и коэффициента избытка горючего. Установлено, что при уменьшении размера частиц до наномасштабов скорость распространения пламени возрастает. Эти выводы были подтверждены как экспериментальными, так и теоретическими результатами. В экспериментах [21] удалось сократить время горения частиц алюминия за счет уменьшения их размера. Было также исследовано влияние диаметра частиц на скорость распространения и максимальную температуру пламени. В работе [22] сообщалось о влиянии давления и размера частиц на скорость горения жидкого топлива на основе воды и наноразмерного алюминия. Авторы пришли к выводу, что скорость горения сильно зависит от коэффициента избытка горючего. Кроме того, при уменьшении диаметра частиц и приближении к наномасштабам эффекты термофореза и броуновского движения частиц уже не являются незначительными [23, 24]. В работе [25] представлена модель, учитывающая влияние термофореза при горении смеси порошка алюминия и воды. Эта модель лучше описывает различные характеристики горения. Тем не менее, насколько известно авторам настоящей работы, влияние термофореза и броуновского движения на характеристики горения наноразмерных частиц в воздухе в условиях противоточной конфигурации ранее систематически не изучалось.

Очень важно иметь полный контроль над процессом горения, чтобы точно его описать. Наилучшей экспериментальной конфигурацией является противоточная, в которой топливовоздушная смесь подается из двух сопел навстречу друг другу. Эта схема хорошо подходит для изучения характеристик реальных пламен, таких как растяжение пламени, избирательная диффузия, излучение и химико-кинетические процессы. В последние годы противоточная конфигурация использовалась для исследования горения как твердых, так и жидких топлив. В работе [26] численными методами установлена взаимосвязь между коэффициентом растяжения и радиационными потерями

тепла, в результате которой происходило гашение предварительно перемешанного бедного метановоздушного пламени на противотоках. В [27] представлена математическая модель, описывающая структуру пламени смеси ликоподий/воздух при горении в противоточной конфигурации. В работе [28] исследовалась скорость горения взвеси алюминиевого порошка в воздухе, проведено сравнение результатов с данными, полученными ранее для других пламен. В экспериментах [29] исследовалось распространение пламени по облаку наночастиц алюминия среднего диаметра 50 и 100 нм в среде CO_2 , воздуха и кислорода в прозрачной кварцевой трубе. Изучались такие характеристики, как скорость распространения пламени, длина и высота облака алюминиевой пудры. В работе [30] методом высокоскоростной фотосъемки исследовалось распространение пламени в облаках частиц титана, алюминия и железа диаметром 40 нм. В работе [31] изучалось горение взвеси порошка алюминия в противоточной конфигурации — скорость распространения пламени, положение точки стабилизации пламени и влияние коэффициента растяжения на процесс горения.

В настоящей работе используется концепция «черного ящика» для моделирования кинетики химических реакций, которая зависит от температуры окружающей среды, размера частиц и концентрации кислорода. Путем решения уравнений сохранения получены профили массовой доли соединений и температуры. Скорость горения и положение пламени вычислены с учетом диаметра частиц, их концентрации и коэффициента растяжения. Исследовано также влияние броуновского движения, термофореза и размера частиц на характеристики горения.

1. ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ

В модели рассматриваются три отдельные зоны, для каждой из них записываются и решаются уравнения сохранения. Для повышения точности модели предпринята попытка учесть броуновское движение частиц топлива и действующую на частицы силу термофореза. Наблюдения показали, что эти два параметра значительно влияют на характеристики горения. Для упрощения анализа различных параметров горения используется безразмерная форма уравнений сохранения.

1.1. Броуновское движение частиц

Броуновское движение представляет собой случайное движение твердых частиц в среде в результате непрерывного столкновения частиц с молекулами среды. Наночастицы можно эффективно рассматривать как большие молекулы, у которых средняя кинетическая энергия равна энергии молекул среды ($k_B T/2$), и поэтому частицы имеют намного меньшую скорость. Массовый поток наночастиц в результате броуновской диффузии ($j_{s,B}$) можно вычислить следующим образом:

$$j_{s,B} = -\rho D_B \nabla Y_s.$$

Здесь Y_s — массовая доля частиц, ρ — плотность смеси, D_B — коэффициент броуновской диффузии: $D_B = k_B T(1 - 1.5\varphi)/(3\pi\mu d_p)$ [32], k_B — постоянная Больцмана, μ — коэффициент динамической вязкости смеси, φ — объемная доля частиц, d_p — диаметр частиц.

1.2. Термофоретический эффект

В условиях градиента температуры на частицы действует сила, которая заставляет их диффундировать. Это явление называется термофорезом, оно аналогично эффекту Соре в газах. Массовый поток наночастиц, создаваемый в результате термофореза ($j_{s,T}$), рассчитывается следующим образом:

$$j_{s,T} = \rho Y_s V_T = -\rho D_T \frac{\nabla T}{T_u}.$$

Здесь V_T — скорость термофореза: $V_T = -K_{tp} \frac{\mu \nabla T}{\rho T_u}$, ∇T — градиент температуры, T_u — температура свежей смеси, равная температуре окружающей среды, K_{tp} — коэффициент в выражении для скорости термофореза, рассчитываемый согласно [25], D_T — коэффициент термодиффузии: $D_T = K_{tp} \frac{\mu}{\rho} Y_s$.

1.3. Уравнения сохранения

Уравнение сохранения массы:

$$\rho \left(\frac{\partial Y_i}{\partial t} + V \nabla Y_i \right) = -\nabla j_i + \dot{\omega}_i,$$

где Y_i — массовая доля, j_i — массовый поток, $\dot{\omega}_i$ — массовая скорость образования i -го компонента.

Уравнение сохранения энергии:

$$\begin{aligned} \rho c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + V \nabla T \right] &= \\ &= \nabla \lambda \nabla T - c_{p,s} j_s \nabla T + \dot{\omega} Q + \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{loss}, \end{aligned}$$

где

$$j_s = j_{s,B} + j_{s,T} = -\rho D_B \nabla Y_s - \rho D_T \frac{\nabla T}{T_u},$$

c_p — теплоемкость при постоянном давлении, Q — теплота реакции. Тогда

$$\begin{aligned} \rho c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + V \nabla T \right] &= \nabla \lambda \nabla T + \\ &+ \rho c_{p,s} \left[D_B \nabla Y_s \nabla T + D_T \frac{\nabla T \nabla T}{T_u} \right] + \\ &+ \dot{\omega} Q + \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{loss}. \end{aligned}$$

Здесь $\dot{\omega} = \rho Y_s / \tau_b$, τ_b — время горения частицы алюминия, рассчитываемое на основе экспериментальных данных [20]:

$$\tau_b = \frac{d_p^{0.3}}{c_2 X_{eff}} \exp \left(\frac{E}{RT_f} \right),$$

где d_p — [мкм], $E = 73.6$ кДж/моль — энергия активации, $c_2 = 8.72 \cdot 10^5$ м⁴/(моль · с), R — универсальная газовая постоянная, T_f — температура пламени, X_{eff} — эффективная молярная доля окислителя, учитывающая содержание кислорода, диоксида углерода и паров воды:

$$X_{eff} = C_{O_2} + 0.6 C_{H_2O} + 0.22 C_{CO_2}.$$

1.4. Приведение к безразмерным величинам

Горение алюминиевой пудры упрощенно можно описать одномерными стационарными уравнениями сохранения:

$$\begin{aligned} \rho u \frac{dY_s}{dx} &= \frac{d}{dx} \left(\rho D_B \frac{dY_s}{dx} \right) + \\ &+ \frac{d}{dx} \left(\frac{\rho D_T}{T_u} \frac{dT}{dx} \right) - \frac{\rho Y_s}{\tau_b}, \quad (1) \end{aligned}$$

$$\rho u c_p \frac{dT}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) + \rho D_B c_{p,s} \frac{dY_s}{dx} \frac{dT}{dx} +$$

$$+ \frac{\rho D_T c_{p,s}}{T_u} \left(\frac{dT}{dx} \right)^2 + \frac{\rho Y_s}{\tau_b} Q. \quad (2) \quad \chi \frac{d\theta}{d\chi} = \frac{\chi}{2} \frac{d^2\theta}{d\chi^2} + \frac{1}{2} \frac{d\theta}{d\chi} +$$

Введем следующие безразмерные параметры:

$$\chi = \int_0^x \frac{\rho_u a x c_p}{\lambda} dx, \quad \delta = \frac{Y_s}{Y_{s,u}}, \quad \theta = \frac{T - T_u}{T_{ign} - T_u},$$

$$Le = \frac{\lambda}{\rho D_B c_p}, \quad N_{TT} = \frac{\lambda T_u Y_{s,u}}{\rho D_T c_p (T_{ign} - T_u)},$$

$$\gamma = \frac{c_{p,s} Y_{s,u}}{c_p}, \quad \zeta = \frac{\rho}{2\rho_u a \tau_b}, \quad \eta = \frac{Q Y_{s,u}}{c_p (T_{ign} - T_u)}.$$

Здесь x — положение вдоль оси x , Le — число Льюиса, λ — теплопроводность, $Y_{s,u}$ — исходная массовая доля горючего, T_{ign} — температура воспламенения, T_u — температура окружающей среды, a — скорость деформации (или коэффициент растяжения). Последняя величина характеризуется локальным градиентом скорости непосредственно перед пламенем ($a = \frac{du}{dx}$). При увеличении коэффициента растяжения пламена приближаются к плоскости торможения потоков, так что положение каждого из пламен определяется условием равенства скорости его распространения и скорости потока. При очень высоких скоростях деформации оба пламени расположены близко к плоскости торможения.

Запишем уравнения (1) и (2) в безразмерном виде:

$$\chi \frac{d\delta}{d\chi} = \frac{\chi}{Le} \frac{d^2\delta}{d\chi^2} + \frac{1}{2Le} \frac{d\delta}{d\chi} + \frac{\chi}{N_{TT}} \frac{d^2\theta}{d\chi^2} + \frac{1}{2N_{TT}} \frac{d\theta}{d\chi} - \zeta\delta,$$

$$+ \chi \frac{\gamma}{Le} \frac{d\delta}{d\chi} \frac{d\theta}{d\chi} + \chi \frac{\gamma}{N_{TT}} \left(\frac{d\theta}{d\chi} \right)^2 + \zeta\eta\delta.$$

Влияние диффузии частиц, вызванное броуновским движением и силой термофореза, задается параметрами Le и N_{TT} , в которые входят соответствующие коэффициенты диффузии.

1.5. Предположения, лежащие в основе модели

При моделировании горения предварительно перемешанной смеси частиц алюминия с воздухом в одномерной осесимметричной противоточной конфигурации приняты следующие основные допущения:

- 1) частицы алюминия сферические и распределены равномерно [33],
- 2) скорость частиц равна скорости газа,
- 3) в зоне предварительного подогрева потери тепла и скорость реакции пренебрежимо малы,
- 4) пламя ламинарное и стационарное,
- 5) реакция диффузионно-контролируемая [34],
- 6) система для твердой и газовой фаз квазиоднородная и изотермическая,
- 7) давление постоянное,
- 8) влияние теплового излучения и гравитации не учитывается,
- 9) тепловые свойства воздуха и частиц алюминия постоянны (см. таблицу).

На рис. 1 показана схема горелки противоточной конфигурации. Свежая горючая смесь поступает из сопел в направлениях $\pm x$, а продукты покидают область горения в направлениях $\pm y$. В силу симметрии все расчеты проведены при $x > 0$. Область горения разделена

Тепловые свойства воздуха и частиц алюминия, используемые в модели

ρ , кг/м ³	c , кДж/(кг·К)	T , К	T_{ad} , К	T_{ign} , К
Воздух				
1.164 [35]	1.005 [35]	300 [35]	—	—
Частицы алюминия				
2707 [35]	0.896 [35]	—	3400 [36]	$T_{ign} = 34.5d_p + 789.1$ [37]

на зону предварительного подогрева, зону пламени и зону продуктов горения. Предполагается, что смесь частиц алюминия и воздуха на входе находится при температуре окружающей среды T_u . Температура смеси увеличивается за счет тепла из зоны реакции (пламени) до тех пор, пока не достигает температуры воспламенения T_{ign} в положении $x = x^*$, где начинается реакция. Процесс горения продолжается, и температура частиц увеличивается до максимальной в зоне продуктов горения. В данной модели реакция протекает в узкой зоне, находящейся сразу после зоны предварительного подогрева. В соответствии с этими предположениями можно выделить следующие области.

- Зона предварительного подогрева:

$$\chi^* < \chi < +\infty: T_u < T < T_{ign}.$$

Скорость реакции в этой зоне равна нулю, поэтому нет необходимости решать уравнение сохранения массы — массовая доля топлива постоянна и равна начальной массовой доле. Однако тепло, передаваемое из зоны реакции, вызывает повышение температуры смеси, поэтому требуется решение уравнения энергии. В пренебрежении реакционным членом и изменением массовой доли, уравнение сохранения энергии и граничные условия запишутся в следующем виде:

$$\chi \frac{d\theta}{d\chi} = \frac{\chi}{2} \frac{d^2\theta}{d\chi^2} + \frac{1}{2} \frac{d\theta}{d\chi} + \chi \frac{\gamma}{N_{TT}} \left(\frac{d\theta}{d\chi} \right)^2,$$

$$\chi \rightarrow +\infty: \theta = 0,$$

$$\chi = \chi^*: \theta = 1.$$

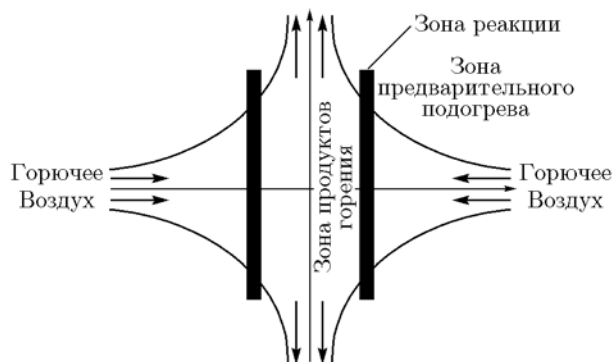


Рис. 1. Противоточная схема горения предварительно перемешанной смеси частиц алюминия и воздуха

- Зона реакций:

$$\chi^{*-} < \chi < \chi^{*+}: T = T_{ign}.$$

В этой зоне диффузионно-контролируемая реакция проходит на поверхности металла, но влиянием образования оксида металла на скорость реакции в данной модели пренебрегается. Благодаря большой энергии активации в уравнении Аррениуса, толщина реакционной зоны очень мала по сравнению с двумя другими зонами.

- Зона продуктов горения:

$$0 < \chi < \chi^*: T_{ign} < T < T_f.$$

Продукты горения покидают эту зону, достигнув конечной температуры T_f . В пренебрежении термофоретическим эффектом уравнение сохранения массы имеет вид:

$$\chi \frac{d\delta}{d\chi} = \frac{\chi}{Le} \frac{d^2\delta}{d\chi^2} + \frac{1}{2Le} \frac{d\delta}{d\chi} - \zeta\delta,$$

$$\chi = \chi^*, \quad \delta|_{\chi^{*-}} = \delta|_{\chi^{*+}}, \quad \frac{d\delta}{d\chi}|_{\chi^{*-}} = \frac{d\delta}{d\chi}|_{\chi^{*+}},$$

$$\chi = 0, \quad \delta = 0.$$

С учетом влияния броуновского движения и термофореза уравнение сохранения энергии запишется следующим образом:

$$\chi \frac{d\theta}{d\chi} = \frac{\chi}{2} \frac{d^2\theta}{d\chi^2} + \frac{1}{2} \frac{d\theta}{d\chi} +$$

$$+ \chi \frac{\gamma}{Le} \frac{d\delta}{d\chi} \frac{d\theta}{d\chi} + \chi \frac{\gamma}{N_{TT}} \left(\frac{d\theta}{d\chi} \right)^2 + \zeta\eta\delta,$$

$$\chi = \chi^*: \theta = 1,$$

$$\chi = 0: \frac{d\theta}{d\chi} = 0.$$

Для решения этого уравнения используются уравнение для массовой доли топлива и метод возмущений.

1.6. Моделирование полидисперсности частиц горючего

Для учета полидисперсности частиц необходимо использовать плотность распределения

$f_N(d)$ частиц по размерам, определенную как доля частиц, имеющих размеры в интервале от d до $d + \Delta d$ [38], т. е.

$$\frac{\Delta N}{N_0} = f_N(d)\Delta d.$$

Средний диаметр Саутера

$$d_{32} = \frac{\int_0^{\infty} d^3 f_N(d)\Delta d}{\int_0^{\infty} d^2 f_N(d)\Delta d}$$

определяется отношением объема частицы к площади ее поверхности. В этой работе при моделировании гетерогенного горения наночастиц алюминия в воздухе в противоточной конфигурации предполагается, что все частицы имеют средний диаметр Саутера, а положение пламени и скорость горения рассчитываются с учетом полидисперсности частиц.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С использованием предложенной аналитической модели проведен анализ влияния диаметра частиц, их концентрации, дисперсности, а также коэффициента растяжения потока на процесс горения частиц.

Изменение массовой доли твердых частиц трех разных диаметров в зависимости от безразмерной координаты при концентрации топлива $C_f = 0.32 \text{ кг/м}^3$ и скорости деформации $a = 4.5 \text{ с}^{-1}$ иллюстрирует рис. 2. Как упоминалось выше, при приближении к пламени массовая доля частиц топлива стремительно падает и в зоне продуктов обращается в нуль. Кроме того, уменьшение диаметра частиц приводит к росту скорости горения и увеличению расхода топлива, что обусловлено большей контактной поверхностью между частицами и газом.

На рис. 3 показана зависимость безразмерной температуры от безразмерной координаты при концентрации горючего $C_f = 0.32 \text{ кг/м}^3$, скорости деформации $a = 1.5 \text{ с}^{-1}$ и диаметре частиц $d_p = 1 \text{ мкм}$. Пламя формируется в том месте, где соответствующая безразмерная температура становится равной единице. Как следует из рис. 3, в зоне предварительного нагрева температура смеси постепенно увеличивается, достигает температуры пламени и продолжает повышаться за счет тепла, приходящего из зоны реакций.

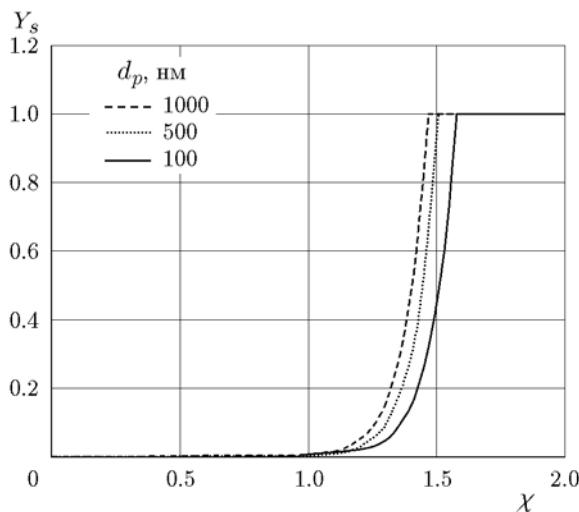


Рис. 2. Зависимость массовой доли частиц алюминия от безразмерной координаты

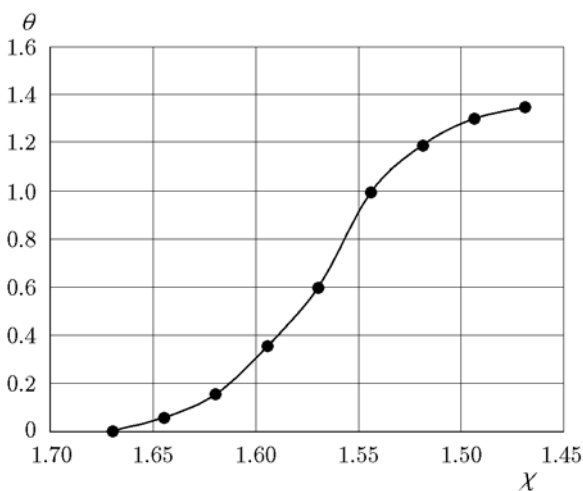


Рис. 3. Зависимость безразмерной температуры пламени от безразмерной координаты

Положение пламени в зависимости от концентрации горючего при разных скоростях деформации для частиц диаметром $d_p = 1 \text{ мкм}$ показано на рис. 4. Как и ожидалось, при увеличении концентрации пудры пламя приближается к соплу, что связано с увеличением количества тепла, получаемого частицами от пламени в зоне предварительного нагрева.

Зависимость положения пламени от концентрации пудры с частицами разного диаметра при скорости деформации $a = 4.5 \text{ с}^{-1}$ показана на рис. 5. Видно, что при увеличении концентрации частиц выше 0.4 кг/м^3 ее влияние на положение пламени ослабевает, что связано с достижением стехиометрического соотноше-

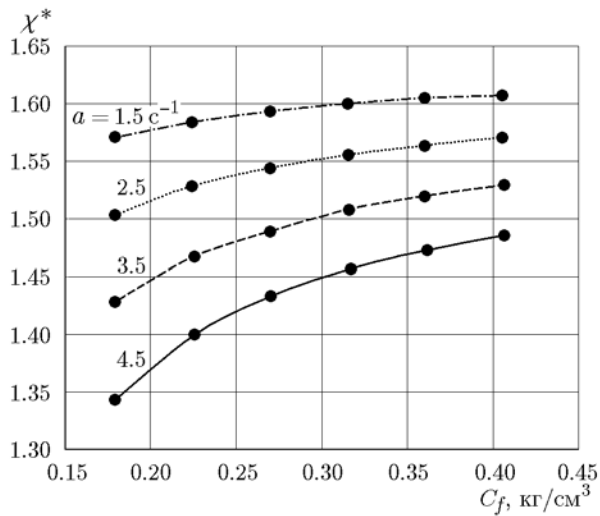


Рис. 4. Зависимость положения пламени от концентрации пудры при различных коэффициентах растяжения пламени

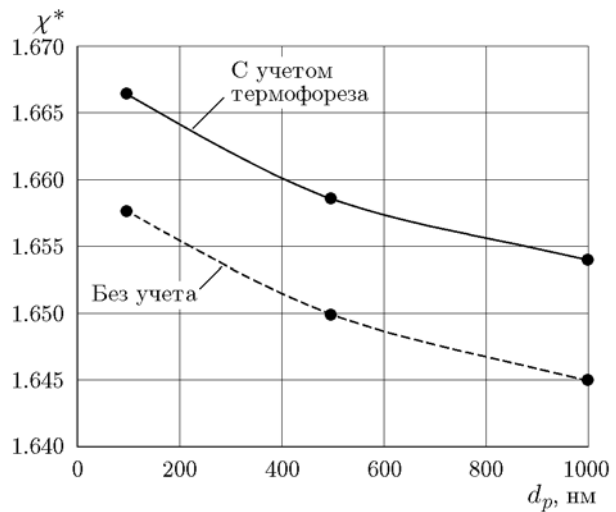


Рис. 6. Зависимость положения пламени от диаметра частиц с учетом и без учета влияния термофореза

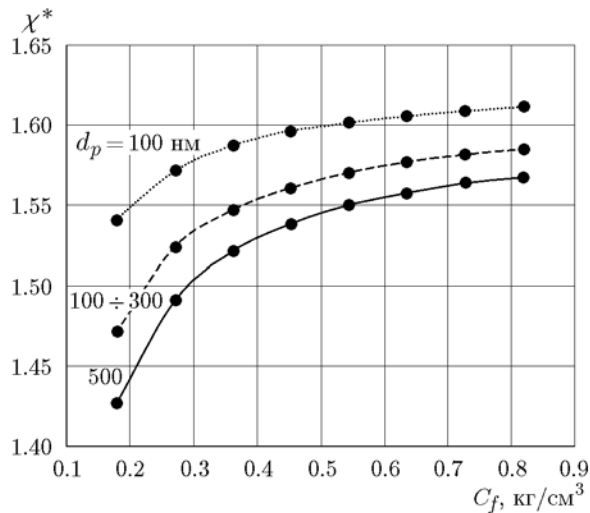


Рис. 5. Зависимость положения пламени от концентрации пудры в случае частиц диаметром только 100 или только 500 нм, а также полидисперсных частиц

ния, а также со снижением скорости горения в условиях обогащения горючим. При уменьшении размера частиц пламя формируется ближе к соплу, что связано с увеличением поверхности контакта между горючим и окислителем. Таким образом, при уменьшении диаметра от 500 до 100 нм расстояние χ^* растёт от 3 до 7 % в зависимости от концентрации пудры, варьируемой в пределах $0.82 \div 0.18 \text{ кг/м}^3$. На данном рисунке также показан случай, когда частицы полидисперсные.

Влияние диаметра частиц на положение пламени более подробно иллюстрирует рис. 6 (концентрация пудры 0.27 кг/м^3). При пренебрежении эффектом термофореза реакция протекает ближе к плоскости торможения потоков, что является результатом снижения теплопередачи в зону предварительного подогрева. Значения χ^* оказываются в среднем на 0.6 % меньше, если не учитывать действия термофореза.

При горении предварительно перемешанной смеси в противотоках положение пламени определяется из условия, что скорость горения равна локальной скорости потока. Таким образом, скорость горения можно вычислить следующим образом: $V_b = ax^*$. На рис. 7 показана зависимость скорости горения от концентрации горючего для частиц различного размера при коэффициенте растяжения $a = 4.5 \text{ c}^{-1}$. Видно, что, когда концентрация горючего превышает стехиометрическую, рост скорости горения ослабевает в результате недостатка окислителя и лишь частичного сгорания частиц. Известно, что чем меньше диаметр частиц, тем меньше время и выше скорость горения. Поэтому при уменьшении диаметра от 500 до 100 нм скорость горения увеличивается от 1.3 до 3.8 %. Поскольку экспериментальные данные по горению наночастиц алюминия в противоточной конфигурации отсутствуют, полученные результаты по скорости горения могут быть сопоставлены с имеющимися литературными данными по распространению пла-

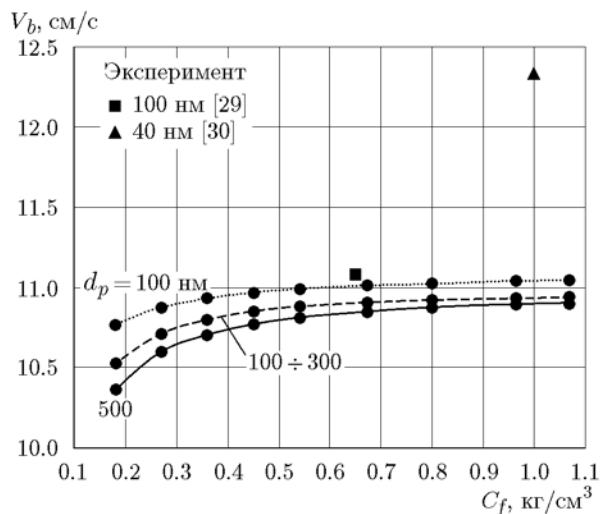


Рис. 7. Зависимость скорости горения от концентрации горючего для частиц различного диаметра

мени в облаке алюминиевой пудры. Так как рассматриваемое в настоящей работе значение коэффициента растяжения относительно невелико, можно предположить, что пламя является нерастяженным. Полученные в рамках рассматриваемой модели значения скорости горения находятся в разумном согласии с данными экспериментов [29, 30], особенно для частиц диаметром 100 нм. В работе [30] было показано, что при уменьшении размера частиц до 40 нм скорость горения увеличивается благодаря большей поверхности, на которой протекает реакция между окислителем и горючим.

Рис. 8 иллюстрирует влияние диаметра частиц на скорость горения алюминия при концентрации $C_f = 0.27$ кг/м³ и коэффициенте растяжения $a = 0.5$ с⁻¹ как с учетом, так и без учета термофоретического эффекта. При пренебрежении влиянием термофореза расчетное значение скорости горения оказывается ниже, что связано с уменьшением передаваемого тепла. Получено, что скорость горения снижается на 0.24 %. С уменьшением диаметра частиц при заданной концентрации горючего, благодаря увеличению контактной поверхности, время горения сокращается и, соответственно, скорость горения растет.

На рис. 9 показана зависимость скорости горения частиц диаметром $d_p = 1$ мкм от коэффициента растяжения при концентрации пудры $C_f = 0.32$ кг/м³. С увеличением коэффициента растяжения скорость горения возрастает

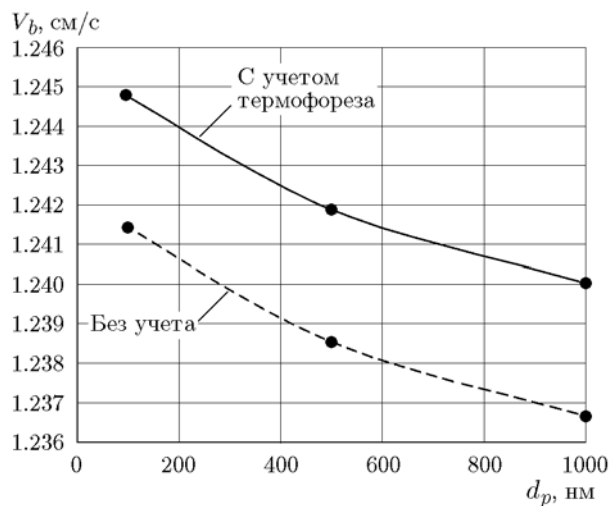


Рис. 8. Зависимость скорости горения от размера частиц с учетом термофоретического эффекта

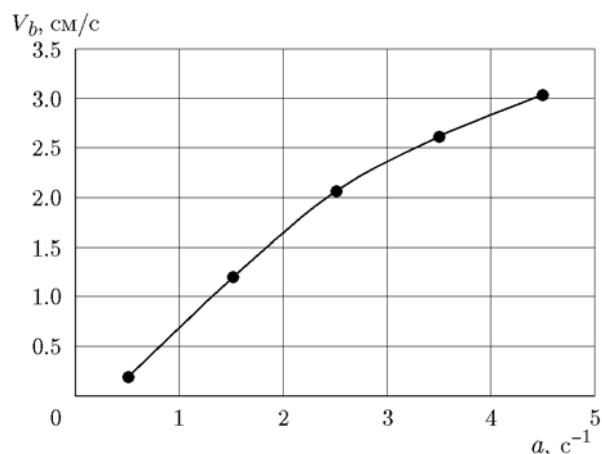


Рис. 9. Зависимость скорости горения от коэффициента растяжения

в соответствии с выражением $V_b = ax^*$.

Зависимость толщины пламени h от коэффициента растяжения при концентрации пудры $C_f = 0.32$ кг/м³ для частиц диаметром $d_p = 1$ мкм приведена на рис. 10. Скорость горения повышается с увеличением коэффициента растяжения. Поскольку толщина пламени определяется соотношением $h = V_b \tau_b$ и время горения частиц фиксировано, скорость деформации непосредственно влияет на толщину пламени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аналитически исследовано горение наночастиц алюминия, диспергированных в воздухе, в условиях противоточной конфигурации.

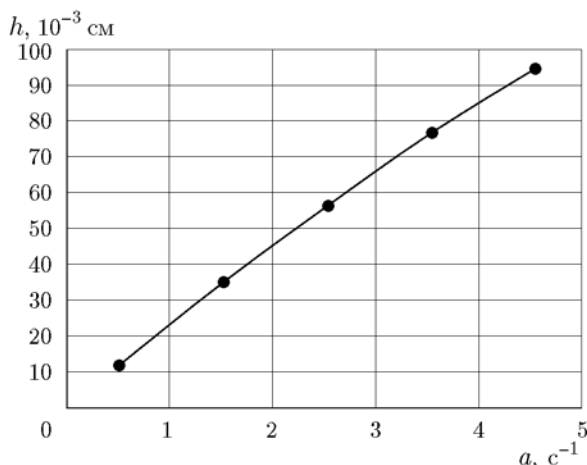


Рис. 10. Зависимость толщины пламени от коэффициента растяжения

Зона горения разделена на три: зону предварительного подогрева, зону реакций и зону конечных продуктов. Уравнения сохранения массы и энергии решены для каждой зоны отдельно. Исследовано влияние термофоретической силы, броуновского движения и полидисперсности частиц. Путем расчета получено распределение температуры по зоне горения. Как и ожидалось, в зоне предварительного подогрева температура увеличивается постепенно и резко возрастает в зоне реакций. Для каждой зоны рассчитано пространственное распределение массовой доли компонентов. Положение пламени определяется в значительной степени концентрацией горючего в исходной смеси. При уменьшении размера частиц от микро- до наномасштабов скорость горения повышается, что связано с увеличением площади контакта между горючим и окислителем. Учет термофоретических сил и броуновского движения частиц дает более высокое значение скорости горения. С ростом коэффициента растяжения положение пламени смещается в сторону свежей смеси, скорость горения растет, а толщина пламени увеличивается. Увеличение концентрации пудры приводит к увеличению скорости горения и смещению положения пламени в сторону плоскости торможения потоков. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что представленная модель, учитывающая эффекты термофореза и броуновского движения частиц, адекватно описывает горение порошка алюминия субмикронного размера в воздухе, протекающие в условиях противоточной конфигурации. Состоятельность модели провере-

на путем сопоставления рассчитанных скоростей горения с экспериментальными данными из литературы, которые оказались в хорошем согласии друг с другом. Таким образом, предложенный подход может быть использован для оценки скорости горения наночастиц алюминия при их различной концентрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Russo M., Li R., Mench M., Van Duijn A.** Molecular dynamic simulation of aluminum-water reactions using the ReaxFF reactive force field // *Int. J. Hydrogen Energy*. — 2011. — V. 36, N 10. — P. 5828–25835.
2. **Ingenito A., Bruno C.** Using aluminum for space propulsion // *J. Propul. Power*. — 2004. — V. 20, N 6. — P. 1056–1063.
3. **Джараман К., Чакраварти С. Р., Сарати Р.** Накопление наноразмерного алюминия при горении твердотопливных композиций // *Физика горения и взрыва*. — 2010. — Т. 46, № 1. — P. 26–35.
4. **Martin C., Comet M., Schnell F., Berthe J.** Aluminum nanopowder: a substance to be handled with care // *J. Hazard. Mater.* — 2017. — V. 342. — P. 347–352.
5. **Li G., Yang H., Yuan C., Eckhoff R.** A catastrophic aluminium-alloy dust explosion in China // *J. Loss Prevent. Process Ind.* — 2016. — V. 39. — P. 121–130.
6. **Bernard S., Gillard P., Frascati F.** Ignition and explosibility of aluminium alloys used in additive layer manufacturing // *J. Loss Prevent. Process Ind.* — 2017. — V. 49, pt B. — P. 888–895.
7. **Wu W., Liu L., Zhang Q.** A new 20 L experimental vessel for dust explosion and measurement of local concentration // *J. Loss Prevent. Process Ind.* — 2017. — V. 49, pt B. — P. 299–309.
8. **Dreizin E. L.** Experimental study of stages in aluminium particle combustion in air // *Combust. Flame*. — 1996. — V. 105, N 4. — P. 541–556.
9. **Beckstead M.W.** A Summary of Aluminum Combustion. — Provo UT.: Brigham Young Univ., 2004.
10. **Filippo M., Dossi S., Paravan C., DeLuca L. T., Liljedahl M.** Activated aluminum powders for space propulsion // *Powder Technol.* — 2015. — V. 270, pt A. — P. 46–52.
11. **Сандарам Д., Янг В., Зарко В. Е.** Горение наночастиц алюминия (обзор) // *Физика горения и взрыва*. — 2015. — Т. 51, № 2. — С. 37–63.
12. **Li Q., Wang K., Zheng Y., Mei X., Lin B.** Explosion severity of micro-sized aluminum dust and its flame propagation properties in 20 L spherical vessel // *Powder Technol.* — 2016. — V. 301. — P. 1299–1308.

13. **Bidabadi M., Mohammadi M., Poorfar A. K., Mollazadeh S., Zadsirjan S.** Modeling combustion of aluminum dust cloud in media with spatially discrete sources // *Heat Mass Transfer*. — 2015. — V. 51, N 6. — P. 837–845.
14. **Yetter R., Risha G., Son S.** Metal particle combustion and nanotechnology // *Proc. Combust. Inst.* — 2009. — V. 32, N 2. — P. 1819–1838.
15. **Delogu F.** Thermodynamics on the nanoscale // *J. Phys. Chem. B*. — 2005. — V. 109, N 46. — P. 21938–21941.
16. **Kwon Y., Gromov A., Ilyin A., Popenko E.** The mechanism of combustion of superfine aluminum powders // *Combust. Flame*. — 2003. — V. 133, N 4. — P. 385–391.
17. **Zachariah M., Aquino M., Shull R., Steel E.** Formation of superparamagnetic nanocomposites from vapor phase condensation in a flame // *Nanostructured Mater.* — 1995. — V. 5, N 4. — P. 383–392.
18. **Huang Y., Risha G. A., Yang V., Yetter R. A.** Combustion of bimodal nano/micron-sized aluminum particle dust in air // *Proc. Combust. Inst.* — 2007. — V. 31, N 2. — P. 2001–2009.
19. **Beck D., Siegel R.** The dissociative adsorption of hydrogen sulfide over nanophase titanium dioxide // *J. Mater. Res.* — 1992. — V. 7, N 10. — P. 2840–2845.
20. **Huang Y., Risha G. A., Yang V., Yetter R. A.** Effect of particle size on combustion of aluminum particle dust in air // *Combust. Flame*. — 2009. — V. 156, N 1. — P. 5–13.
21. **Bocanegra P., Chauveau C., Gökalp I.** Experimental studies on the burning of coated and uncoated micro and nano-sized aluminium particles // *Aerosp. Sci. Technol.* — 2007. — V. 11, N 1. — P. 33–38.
22. **Risha G., Son S., Yetter R., Yang V.** Combustion of nano-aluminum and liquid water // *Proc. Combust. Inst.* — 2007. — V. 31, N 2. — P. 2029–2036.
23. **Keblinski P., Phillpot S., Choi S.** Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids) // *Int. J. Heat Mass Transfer*. — 2002. — V. 45, N 4. — P. 855–863.
24. **Toda A., Ohnishi H., Dobashi R., Hirano T.** Experimental study on the relation between thermophoresis and size of aerosol particles // *Int. J. Heat Mass Transfer*. — 1998. — V. 41, N 17. — P. 2710–2713.
25. **Bidabadi M., Ramezanpour M., Mohammadi M., Fereidooni J.** The effect of thermophoresis on flame propagation in nano-aluminum and water mixtures // *Periodica Polytechnica. Chem. Eng.* — 2016. — V. 60, N 3. — P. 157–164.
26. **Guo H., Ju Y., Maruta K., Niioka T., Liu F.** Radiation extinction limit of counterflow premixed lean methane-air flames // *Combust. Flame*. — 1997. — V. 109, N 4. — P. 636–646.
27. **Bidabadi M., Vakilabadi M., Poorfar A., Monteiro E., Rouboa A., Rahbari A.** Mathematical modeling of premixed counterflow combustion of organic dust cloud // *Renew. Energy*. — 2016. — V. 92. — P. 376–384.
28. **Julien P., Whiteley S., Soo M., Goroshin S.** Flame speed measurements in aluminum suspensions using a counterflow burner // *Proc. Combust. Inst.* — 2017. — V. 36, N 2. — P. 2291–2298.
29. **Sun Y., Sun R., Zhu B., Wu Y., Wang Q., Han W.** Combustion characteristics of nano-aluminum cloud in different atmospheres // *Ind. Eng. Chem. Res.* — 2018. — V. 57, N 1. — P. 129–138.
30. **Gao W., Zhang X., Zhang D., Peng Q., Zhang Q., Dobashi R.** Flame propagation behaviours in nano-metal dust explosions // *Powder Technol.* — 2017. — V. 321. — P. 154–162.
31. **Mohammadi M., Bidabadi M., Khalili H.** Modeling counterflow combustion of dust particle cloud in heterogeneous media // *J. Energy Eng.* — 2017. — V. 143, N 2.
32. **Murshed S. M., de Castro C. A.** Predicting the thermal conductivity of nanofluids—effect of Brownian motion of nanoparticles // *J. Nanofluids*. — 2012. — V. 1, N 2. — P. 99–114.
33. **Sun J., Dobashi R., Hirano T.** Combustion behavior of iron particles suspended in air // *Combust. Sci. Technol.* — 2000. — V. 150, N 1-6. — P. 99–114.
34. **Bidabadi M., Mohebbi M., Poorfar A. K., Hochgreb S., Lin C. X., Biouki S. A., Hajilou M.** Modeling quenching distance and flame propagation speed through an iron dust cloud with spatially random distribution of particles // *J. Loss Prevent. Process Ind.* — 2016. — V. 43. — P. 138–146.
35. **Bergman T. L., Incropera F. P.** *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. — John Wiley & Sons, 2011.
36. **Bidabadi M., Zadsirjan S., Mostafavi S.** Propagation and extinction of dust flames in narrow channels // *J. Loss Prevent. Process Ind.* — 2013. — V. 26, N 1. — P. 172–176.
37. **Marino T. A.** *Numerical Analysis to Study the Effects of Solid Fuel Particle Characteristics on Ignition, Burning, and Radiative Emission*. — The George Washington Univ., 2008.
38. **Loth E., O'Brien T., Syamlal M., Cantero M.** Effective diameter for group motion of polydisperse particle mixtures // *Powder Technol.* — 2004. — V. 142, N 2-3. — P. 209–218.