

УДК 536.46

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ, РАЗМЕРА ЧАСТИЦ И КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБЫТКА ГОРЮЧЕГО НА ГОРЕНИЕ В ПРОТИВОТОКАХ СМЕСИ ВОЗДУХА И МИКРОЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ

Я. Пурмохаммад, М. Сабзпушани

Университет Кашана, 8731751167 Кашан, Иран, yasnarpourmohammad@gmail.com, spooshan@kashanu.ac.ir

Приближенным аналитическим методом возмущений исследовано влияние скорости деформации, коэффициента избытка горючего и диаметра частиц на горение в противотоках бедной смеси микрочастиц алюминия с воздухом. Пламя было аппроксимировано тремя зонами: зоной предварительного подогрева, фронтом пламени и зоной продуктов горения. Наблюдается приемлемое согласие между результатами расчета и экспериментальными данными по температуре пламени. Получены безразмерные значения максимальной температуры и температуры воспламенения, положения и толщины пламени в зависимости от скорости деформации при разных диаметрах частиц и коэффициента избытка горючего. Результаты показывают, что с ростом скорости деформации максимальная температура и температура воспламенения, а также толщина пламени уменьшаются. С уменьшением скорости деформации увеличивается зона предварительного подогрева. С ростом диаметра частиц увеличивается ширина пламени, а температура воспламенения и максимальная температура пламени снижаются. Увеличение коэффициента избытка горючего приводит к повышению конечной температуры пламени и уменьшению зоны предварительного подогрева и ширины пламени.

Ключевые слова: металлические частицы, микрочастицы алюминия, горение в противотоке, скорость деформации, предварительно перемешанная смесь.

DOI 10.15372/FGV20180607

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что горение частиц было предметом многочисленных исследований, изучение горения металлических микрочастиц необходимо углублять и расширять как в экспериментальном, так и в теоретическом плане из-за их значимости в науке и технике, особенно в таких важнейших сферах, как топливо, энергетика и взрывобезопасность [1, 2]. Понимание процессов горения металлов по-прежнему несовершенно по сравнению с изученностью горения газов. Сжигание пыли не ограничивается применением только для выработки энергии, но и распространяется на другие области, в частности на производство твердых топлив. Однако в конструировании твердотопливных ракетных двигателей технологии сжигания пыли не нашли применения. Как упоминалось ранее, размер частиц оказался ключевым фактором в процессе горения твердых частиц [2–4].

В последние десятилетия накоплен большой объем экспериментальных данных по зажиганию и горению частиц алюминия [5–10]. Несмотря на то, что частицы алюминия давно используются в качестве компонента твердых топлив из-за его высокой энергетической плотности, в большинстве ранее опубликованных работ не рассматривалось влияние скорости деформации поверхности пламени на горение алюминия.

Многочисленные экспериментальные исследования были посвящены определению времени горения частиц микрометрового и более крупного размера. Установлено, что горение металлов аналогично горению капель, и поэтому закон D^2 должен применяться для определения времени горения металлических микрочастиц [11]. В работе [11] предполагалось, что частицы не воспламеняются до тех пор, пока температура оксидной оболочки равна температуре плавления, а гетерогенные процессы, протекающие одновременно с газофазным горением, например растворение кислорода внутри капли и рост оксидной оболочки на поверхности капли, влияют на время горения. Для частиц

© Pourmohammad Y.¹, Sabzpooshani M.², 2018.

¹Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, I. R. Iran. ²Energy Research Institute, University of Kashan, Kashan, I. R. Iran.

микрометрового и большего размера, которые обычно горят в диффузионно-контролируемых условиях, также было предложено несколько D^n -моделей с $n = 1.5 \div 2.0$. В работе [12] выдвинуто предположение, что для моделирования влияния окислительной среды (кислород, CO_2 и H_2O) на время горения микрочастиц алюминия значение $n = 1.8$ подходит лучше всего.

Исследование горения алюминиевых частиц важно для проектирования и оптимизации камер сгорания силовых установок, поскольку дает ценную информацию о способе ввода частиц, их зажигании, условиях стабилизации пламени и его температуре, а также об управлении теплообменом в камере сгорания. Выполнено множество экспериментальных работ по изучению времени горения и температуры воспламенения алюминиевых частиц [12–16].

В работах [17, 18] теоретически исследовано горение алюминиевой пыли в ламинарном потоке воздуха в широком диапазоне размеров частиц (нано и микро). Путем численного решения уравнения энергетического баланса в зоне пламени получены скорость горения и распределение температуры в пламени.

Уменьшение размера частиц алюминия увеличивает их удельную площадь поверхности и, следовательно, сокращает время горения той же массы частиц. Диаметр частиц крайне важен для определения соответствующих механизмов горения. Процесс горения частиц большого диаметра контролируется диффузией, тогда как мелкие частицы горят в условиях кинетического контроля. Теплообмен микрочастиц с окружающим газом находится в непрерывном режиме.

Во многих практических применениях потоки являются гидродинамически растяженными, поэтому чтобы получить реалистичное предсказание поведения пламени в таких условиях, следует использовать противоточную конфигурацию. В течение нескольких последних десятилетий противоточная конфигурация активно развивалась в теоретических, экспериментальных и численных работах как модель для исследования различных физических эффектов в реальных пламенах — растяжения, избирательной диффузии, излучения и химической кинетики [19–22].

Хотя в предыдущих исследованиях получено много полезной информации, имеющиеся данные о горении алюминиевых пылевых ча-

стиц далеко не исчерпывающие. В настоящей работе аналитически изучено горение микрочастиц алюминия в предварительно перемешанном бедном пламени на противотоках. Представлены зависимости безразмерных температуры воспламенения и максимальной температуры пламени, места зажигания и толщины пламени от скорости деформации поверхности пламени частиц разных диаметров при различных коэффициентах избытка горючего. Полученные результаты, такие как рост температуры и скорости распространения пламени (пропорциональна положению пламени) с увеличением коэффициента избытка горючего, находятся в согласии с данными экспериментов [17, 18].

1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

1.1. Основные уравнения

В настоящей работе рассматриваются преимущественно бедные горючим смеси (бедные смеси). Предполагается, что пламя состоит из трех зон: зоны предварительного подогрева, фронта пламени и зоны конечных продуктов (конечной зоны). В зоне предварительного подогрева скорость реакции пренебрежимо мала и газ нагревается за счет теплопроводности из зоны пламени. Частицы нагреваются окружающим газом, пока не достигнут температуры воспламенения. В конечной зоне горение завершается. Во фронте пламени частицы воспламеняются и полностью сгорают. Скорость горения частиц обычно зависит от локального радиуса частицы, локальной концентрации окислителя, массы и температуропроводности окислителя. Из-за избытка окислителя в бедной смеси общее время горения частиц считается равным времени горения одной частицы. Сделаны следующие основные предположения: 1) сферические частицы алюминия равномерно распределены по смеси; 2) скорость частицы приблизительно равна скорости газа и изменяется вдоль траектории; 3) влияние гравитации и радиационный теплообмен не учитываются; 4) в зоне предварительного подогрева скорость реакции пренебрежимо мала; 5) алюминиевые частицы испаряются перед сгоранием и реагируют с воздухом в газовой фазе; 6) поток бедной смеси предполагается ламинарным.

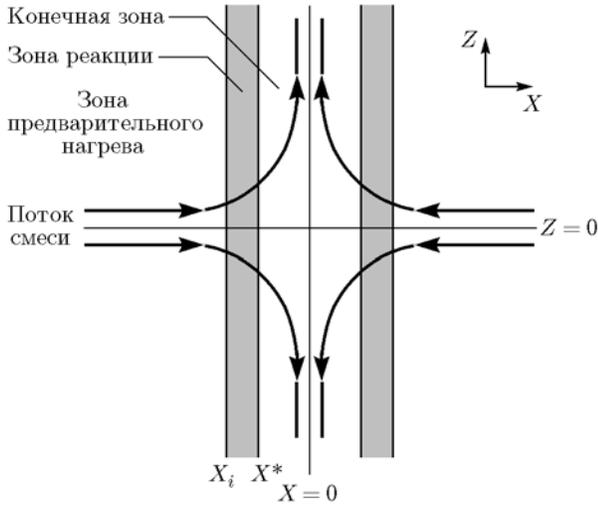


Рис. 1. Двойное плоское, предварительно перемешанное пламя в противоточной конфигурации

Рассматривалась одномерная аксиально-симметричная модель предварительно перемешанного противоточного пламени (рис. 1). Рассмотренная конфигурация включает в себя плоское двойное пламя. Реагенты поступают по направлению $\pm X$, а продукты выходят по направлению $\pm Z$. В соответствии с симметрией конфигурации все вычисления выполнены для расстояния от начала координат $x' < 0$.

В общем случае скорость деформации a в любой точке поверхности пламени определяется как скорость изменения площади A бесконечно малого элемента, движущегося с потоком в лагранжевом представлении:

$$2a = \frac{1}{A} \frac{dA}{dt}. \quad (1)$$

Уравнение непрерывности для фиксированного конечного объема может быть записано в виде

$$\rho u A = \text{const}. \quad (2)$$

Комбинируя уравнения (2) и (1) и используя определение лагранжевой производной, можно записать уравнение скорости деформации в декартовых координатах, как показано в [23]:

$$2a = -\frac{1}{\rho} \frac{d(\rho u)}{dx'}. \quad (3)$$

Здесь скорость деформации a представлена как функция координаты x' . Для учета изменения плотности частиц алюминия в ходе реакции использовалось выражение

$$x = \int_0^{x'} \frac{\rho}{\rho_u} dx'. \quad (4)$$

Таким образом, основные уравнения выглядят следующим образом:

$$-2\rho_u a x c \frac{dT}{dx} = \lambda_u \frac{d^2 T}{dx^2} + \omega_f \frac{\rho_u}{\rho} Q, \quad (5)$$

$$-\frac{2}{3} \rho_s c_s a x \frac{dT_s}{dx} = \frac{\lambda}{r^2} (T - T_s). \quad (6)$$

Уравнение (5) описывает сохранение энергии в газе. Здесь c — удельная теплоемкость газа; λ_u — коэффициент теплопроводности; Q — удельная теплота реакции на единицу массы; ω_f — скорость реакции во фронте пламени, $\omega_f = \sigma/\tau_b$ [17]; σ — концентрация частиц пыли; τ_b — время горения, $\tau_b = r^2 \rho_s / [2\rho D \log(1 + vY_{0,\infty})]$ в предположении, что частицы горят в диффузионно-контролируемом режиме; r — радиус частицы; v — стехиометрическое отношение масс топлива/окислитель; ρ — плотность газа; D — коэффициент диффузии; Y — массовая доля. Индексы u, f, s соответствуют состоянию на входе, фронту пламени, твердой частице.

1.2. Аналитическое решение

Введем безразмерные параметры:

$$\theta = \frac{T}{T_u}, \quad \theta_s = \frac{T_s}{T_u}, \quad y = x \sqrt{\frac{\rho_u c}{\lambda_u a \tau_b^2}},$$

$$\phi = \frac{\sigma}{\sigma_{st}}, \quad \kappa = a \tau_b, \quad \mu = \frac{\sigma_{st} Q}{\rho c_p (T_{si} - T_u)},$$

$$\nu = \frac{c_s}{c} \log(1 + vY_{0,\infty}), \quad \zeta = \frac{3 \text{Le}}{4\nu}, \quad \text{Le} = \frac{\alpha}{D}$$

(индексы st, i соответствуют стехиометрическому состоянию и началу реакции). Подставляя их в (5) и (6), получаем следующие безразмерные уравнения:

$$-2\kappa^2 y \frac{d\theta}{dy} = \frac{d^2 \theta}{dy^2} + \mu \phi \kappa (\theta_{si} - 1), \quad (7)$$

$$-y \frac{d\theta_s}{dy} = \frac{\zeta}{\kappa} (\theta - \theta_s). \quad (8)$$

Граничные условия в зоне предварительного подогрева:

$$\begin{aligned}
 y \rightarrow -\infty : \quad \theta &= \theta_s = 1, \\
 y \rightarrow y_i^- : \quad \theta &= \theta_i, \quad \theta_s = \theta_{si}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

В этой зоне скорость реакции принимается пренебрежимо малой, тогда решение уравнения (7) дает температуру газа

$$\theta = (\theta_i - 1) \frac{1 + \operatorname{erf}(\kappa y)}{1 + \operatorname{erf}(\kappa y^*)} + 1 \tag{10}$$

(везде индексом * обозначены условия в конце зоны реакции). Подставляя данное решение в (8), получаем уравнение для температуры твердых микрочастиц:

$$\begin{aligned}
 \theta_s = \frac{\theta_i - 1}{1 + \operatorname{erf}(\kappa y^*)} & \left(1 + \operatorname{erf}(\kappa y) + \right. \\
 & \left. + \frac{\kappa y (\kappa^2 y^2)^{\frac{\zeta - \kappa}{2\kappa}}}{\sqrt{\pi}} \Gamma\left(\frac{\kappa - \zeta}{2\kappa}, \kappa^2 y^2\right) \right) + 1. \tag{11}
 \end{aligned}$$

Граничные условия в зоне реакций:

$$\begin{aligned}
 y \rightarrow y_i^+ : \quad \theta &= \theta_i, \quad \frac{d\theta}{dy} \Big|_{y_i^+} = \frac{d\theta}{dy} \Big|_{y_i^-}, \\
 y \rightarrow y^* : \quad \theta &= \theta^*, \quad \frac{d\theta}{dy} = 0.
 \end{aligned} \tag{12}$$

В данной работе для решения дифференциального уравнения использовался метод возмущений. Методы возмущений [24, 25] широко применяются для получения приближенных решений таких уравнений при наличии малого параметра ε . С помощью метода возмущений безразмерная температура газа во фронте пламени находится из уравнения (7) следующим образом:

$$\varepsilon = \kappa^2, \tag{13}$$

$$\theta = \theta_0 + \varepsilon \theta_1 + \varepsilon^2 \theta_2 + \dots, \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
 \theta = -\frac{b}{2} y^2 + b y_1 y + \theta_1 - \frac{b y_1^2}{2} + \\
 + \varepsilon \left(\frac{b}{6} y^4 - \frac{b}{3} y_1 y^3 + \frac{b}{3} y_1^3 y + \theta_1 - \frac{b}{6} y_1^4 \right) + \\
 + \varepsilon^2 \left(\frac{-2b}{45} y^6 + \frac{b}{10} y_1 y^5 - \frac{b}{9} y_1^3 y^3 + \frac{b}{10} y_1^5 y + \right.
 \end{aligned}$$

$$\left. + \theta_1 - \frac{2b}{45} y_1^6 \right) + O[\varepsilon^3], \tag{15}$$

$$b = \mu \phi \kappa (\theta_{si} - 1).$$

Согласно работе [16] время горения принимается известным. Учитывая это допущение и используя τ_b , находим безразмерную толщину пламени δ :

$$\delta = y^* - y_i,$$

где $y^* = y_i \exp(-\kappa)$. Используя уравнения (10), (11), (15) и граничные условия (9), (12), можно найти θ_i , θ_b и y^* при любом коэффициенте избытка горючего.

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В этом параграфе представлены результаты аналитического решения уравнений. Построены профили безразмерной температуры в зоне предварительного подогрева и во фронте пламени. Следует отметить, что для расчета фактической толщины пламени и положения пламени нужно изменить их значения в соответствии с соотношением (2).

Для проверки состоятельности и точности модели и аналитического решения проведены сравнения с имеющимися экспериментальными результатами. Существует ограничение в сравнении результатов, полученных в настоящей работе и в других исследованиях, из-за некоторых различий в конфигурации и используемом методе. На рис. 2 для сравнения представлены данные экспериментов [26]. Результаты моделирования показывают, что средняя температура пламени возрастает при уменьшении диаметра частиц. Это согласуется с экспериментами [26]. Как видно из рис. 2, скорость деформации мало влияет на среднюю температуру пламени для небольших частиц.

Распределения температур газа и твердых частиц в зоне предварительного подогрева приведены на рис. 3. Характер изменения этих температур в зоне предварительного подогрева сходен, но температура твердой фазы всегда ниже температуры газовой фазы.

2.1. Влияние скорости деформации

Скорость деформации очень сильно влияет на горение предварительно перемешанных

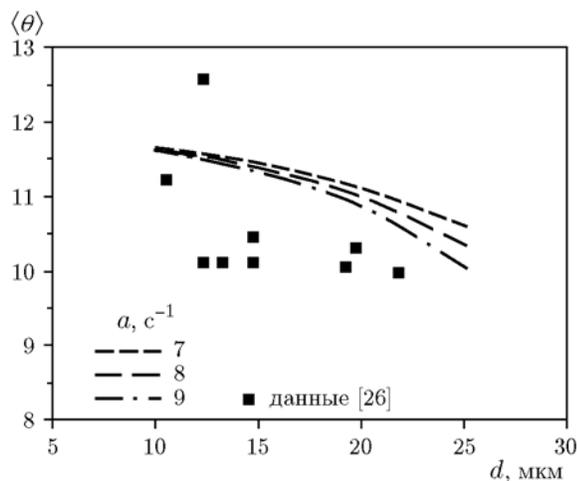


Рис. 2. Безразмерная средняя температура пламени в зависимости от диаметра частиц при разных скоростях деформации ($\phi = 0.8$)

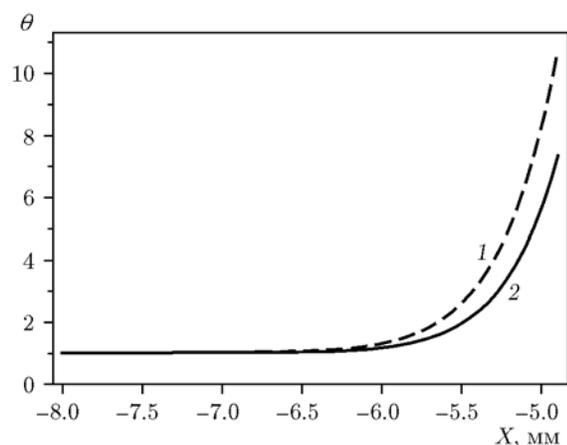


Рис. 3. Распределения температур газа (1) и твердых частиц (2) в зоне предварительного подогрева ($d = 20$ мкм, $a = 6.0$ с $^{-1}$, $\phi = 0.8$)

смесей; характеристики пламени зависят от того, как реагирует смесь на растяжение потока. В противоточной конфигурации скорость деформации влияет на ширину фронта ламинарного пламени и температуру. Влияние на температуру обусловлено тем, что изменяются теплотеплотери в несгоревшую смесь.

На рис. 4,а показано изменение безразмерной температуры газа в зависимости от расстояния при различных скоростях деформации. Видно, что при фиксированных значениях радиуса и концентрации твердых частиц топлива длина зоны предварительного подогрева незначительно увеличивается с уменьшением скорости деформации. Безразмерная температу-

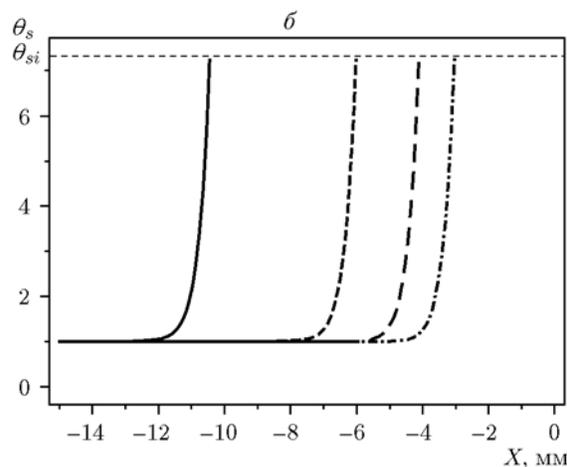
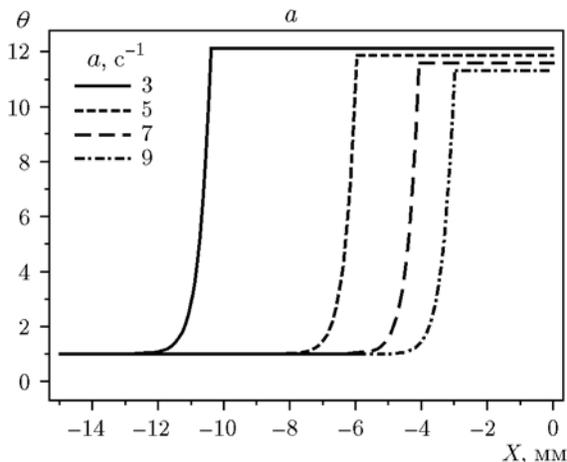


Рис. 4. Безразмерные температуры потока газа (а) и частиц (б) в зависимости от расстояния при различных скоростях деформации ($d = 20$ мкм, $\phi = 0.8$)

ра частиц в зависимости от расстояния при разных скоростях деформации представлена на рис. 4,б. Видно, что в зоне предварительного подогрева температура частиц повышается до температуры их воспламенения. Для частиц алюминия диаметром $d = 1 \div 100$ мкм существует широкий диапазон температуры воспламенения — 1 300 ÷ 2 300 К. В этой работе принято значение 2 200 К [15].

2.2. Влияние размера частиц

На рис. 5,а представлены рассчитанные значения положения предварительно перемешанного противоточного пламени в зависимости от скорости деформации поверхности пламени для частиц различных диаметров. Положение пламени при горении в противотоке очень важно, так как пламя стабилизируется в

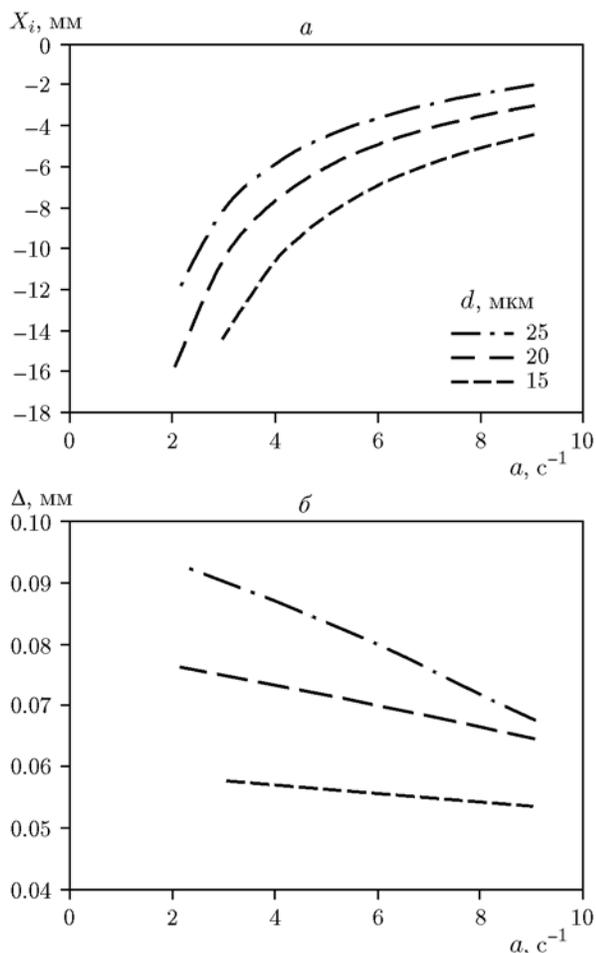


Рис. 5. Положение пламени (*a*) и его толщина (*б*) в зависимости от скорости деформации для частиц разных диаметров ($\phi = 0.8$)

том месте, где существует баланс между скоростью горения и локальной скоростью потока. Следовательно, в противоточной конфигурации скорость горения может быть оценена по положению пламени. На рис. 5, *a* видно, что пламя отдалается от плоскости симметрии при уменьшении скорости деформации и диаметра частиц. Вследствие этого уменьшения скорость горения увеличивается. Из рис. 5, *б* видно, что с увеличением диаметра частиц и уменьшением скорости деформации толщина пламени Δ возрастает. По мере повышения скорости деформации длина пламени увеличивается, а его толщина уменьшается.

Рис. 6 иллюстрирует влияние скорости деформации поверхности пламени и диаметра частиц на безразмерную температуру воспламенения и безразмерную максимальную темпера-

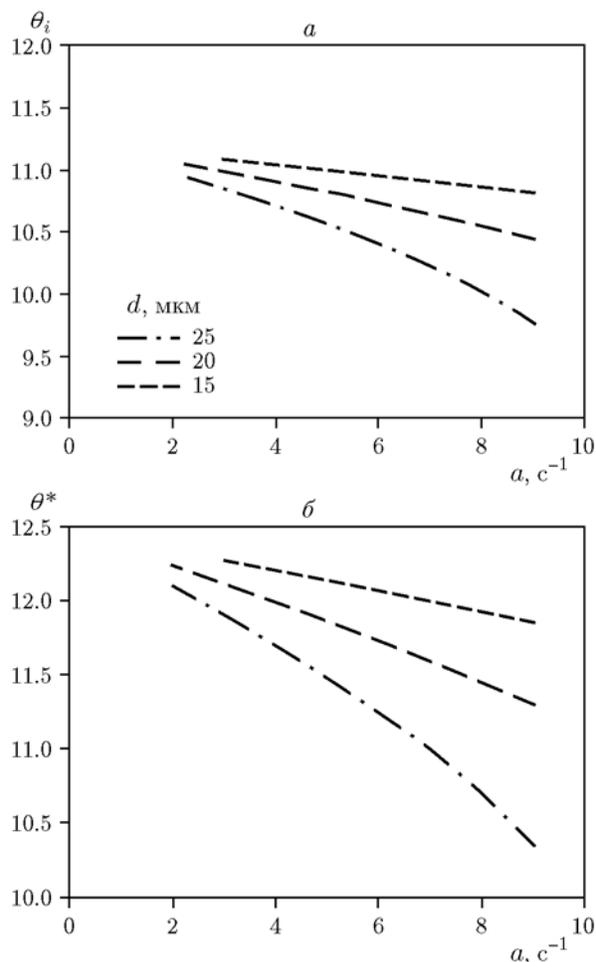


Рис. 6. Безмерная температура воспламенения (*a*) и максимальная температура пламени (*б*) в зависимости от скорости деформации для частиц разных диаметров ($\phi = 0.8$)

туру пламени: они увеличиваются с уменьшением диаметра частиц и скорости деформации. Влияние скорости деформации на температуру пламени уменьшается при малых значениях скорости деформации. Конечная температура пламени микрочастиц алюминия стремится к температуре нерастяженного пламени частиц алюминия при малых скоростях деформации.

2.3. Влияние коэффициента избытка горючего

Влияние коэффициента избытка горючего на горение частиц алюминия представлено следующим образом. Изменение положения пламени в зависимости от скорости деформации его поверхности при различных коэффициентах избытка горючего показано на рис. 7, *a*. Видно, что пламя отодвигается от центральной плос-

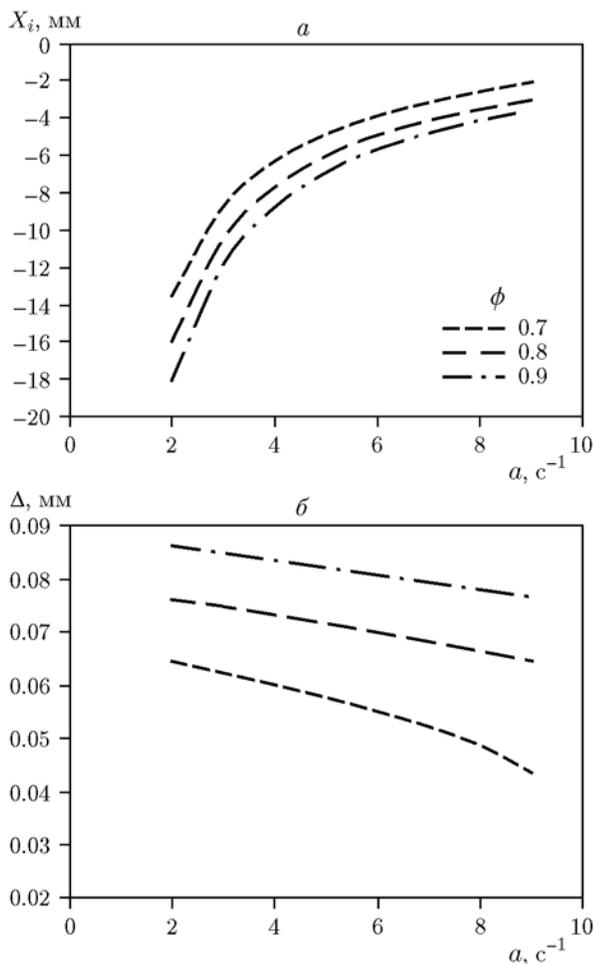


Рис. 7. Положение пламени (а) и его толщина (б) в зависимости от скорости деформации при разных коэффициентах избытка горючего ($d = 20$ мкм)

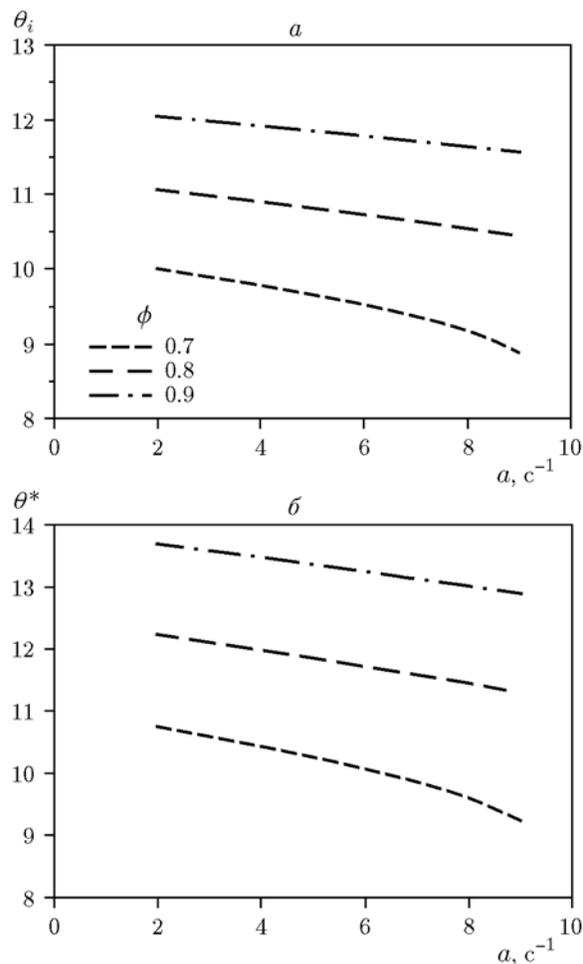


Рис. 8. Безмерные температура воспламенения (а) и максимальная температура пламени (б) в зависимости от скорости деформации при разных коэффициентах избытка горючего ($d = 20$ мкм)

кости симметрии с увеличением концентрации частиц. Кроме того, можно сделать вывод, что в случае высоких скоростей деформации после определенного значения концентрации частиц не наблюдается существенного изменения положения пламени.

Толщина пламени как функция скорости деформации при разных коэффициентах избытка горючего представлена на рис. 7, б. Как следует из рисунка, с повышением концентрации частиц толщина пламени возрастает, а при увеличении скорости деформации уменьшается. Из-за уменьшения толщины пламени и увеличения его длины передача тепла в зону предварительного подогрева возрастает и температура пламени падает.

Согласно рис. 8 с увеличением concentra-

ции частиц температура пламени повышается. Это связано с увеличением количества вводимого горючего. Температура воспламенения уменьшается по мере роста скорости деформации. Аналогичная тенденция наблюдается и для максимальной температуры пламени. Следует отметить, что существует различие в значениях температуры воспламенения и максимальной температуры из-за того, что горение отдельных микрочастиц происходит в конечной области.

На рис. 9 показаны безразмерные температуры газа и частиц в зависимости от расстояния при разных коэффициентах избытка горючего. Наклон профиля температуры газа (рис. 9, а) падает с уменьшением коэффициен-

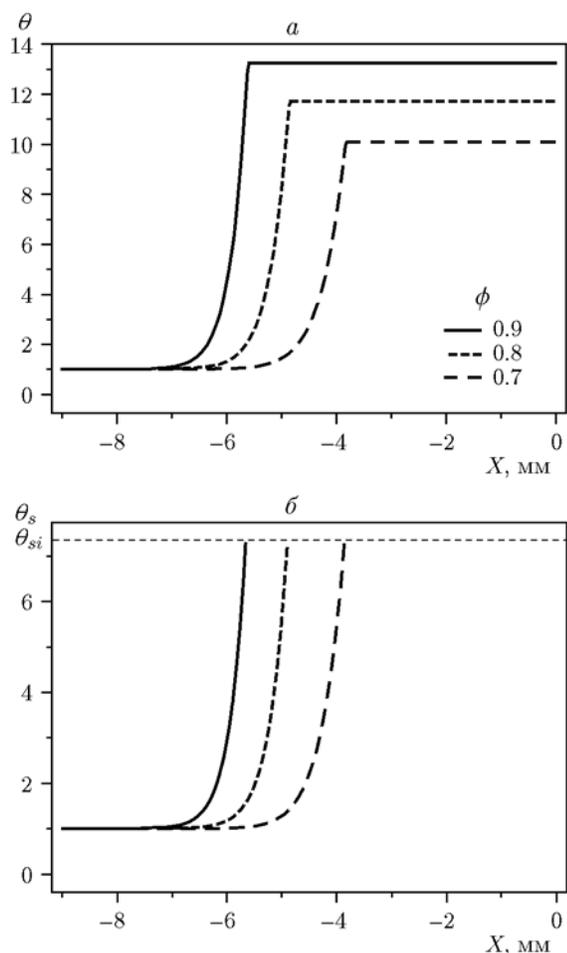


Рис. 9. Влияние расстояния от плоскости симметрии и коэффициента избытка горючего на безразмерные температуры газа (а) и частиц (б) ($d = 20$ мкм, $a = 6.0$ с $^{-1}$)

та избытка горючего. Из-за повышения температуры пламени смесь нагревается быстрее с увеличением коэффициента избытка горючего.

Скорость роста температуры твердой фазы возрастает с увеличением коэффициента избытка горючего (рис. 9, б). Фактически, повышение концентрации пыли означает, что температура частиц увеличивается быстрее, а длина зоны предварительного подогрева уменьшается, что приводит к более быстрой передаче тепла и более высокой скорости горения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построена математическая модель для анализа влияния скорости деформации на одномерное, предварительно перемешанное пла-

мя алюминиевых микрочастиц в противоточной конфигурации.

Результаты расчетов показывают, что при увеличении концентрации частиц температура воспламенения и максимальная температура пламени возрастают, а положение пламени смещается, так что толщина пламени увеличивается. Более того, из-за конечной толщины пламени частиц алюминия существует разница между температурой воспламенения и максимальной температурой пламени. По мере увеличения скорости деформации поверхности пламени температура воспламенения и толщина пламени уменьшаются, а положение пламени смещается к началу координат. В случае очень малых скоростей деформации (почти плоское пламя) температура воспламенения выше, а скорость изменения положения пламени намного больше, чем при больших скоростях деформации. Сравнение полученных результатов показывает, что коэффициент избытка горючего оказывает меньшее влияние на положение пламени, чем скорость деформации. При увеличении размера частиц пламя стабилизируется ближе к началу координат, а толщина пламени увеличивается. Из-за уменьшения скорости горения при увеличении диаметра частиц воспламенение происходит в зоне низкой скорости потока, которая находится ближе к источнику свежей смеси. По мере увеличения диаметра частиц температура воспламенения и максимальная температура пламени снижаются. Наблюдается удовлетворительное согласие между полученными в этой работе результатами и данными экспериментов [26]. Для более глубокого понимания процессов, происходящих при горении микрочастиц в противоточной конфигурации, необходимо проведение дальнейших исследований.

Авторы выражают благодарность Институту энергетических исследований Университета Кашана за поддержку этой работы (грант № 3224127/6).

ЛИТЕРАТУРА

1. Brooks K. P., Beckstead M. W. Dynamics of aluminum combustion // J. Propul. Power. — 1995. — V. 11. — P. 769–780.
2. King M. K. Aluminum combustion in a solid rocket motor environment // Proc. Combust. Inst. — 2009. — V. 32. — P. 2107–2114.
3. Feng Y., Xia Z., Huang L., Yan X. Experimental investigation on the combustion charac-

- teristics of aluminum in air // *Acta Astronaut.* — 2016. — V. 129. — P. 1–7.
4. **Guery J. F., Chang I. S., Shimada T., Glick M., Boury D., Robert E., Napior J., Wardle R., Pérut C., Calabro M., Glick R., Habu H., Sekino N., Vigier G., d'Andrea B.** Solid propulsion for space applications: an updated roadmap // *Acta Astronaut.* — 2010. — V. 66. — P. 201–219.
 5. **Dreizin E. L.** Experimental study of stages in aluminium particle combustion in air // *Combust. Flame.* — 1996. — V. 105. — P. 541–556.
 6. **Sun J., Dobashi R., Hirano T.** Structure of flames propagating through aluminum particles cloud and combustion process of particles // *J. Loss Prevent. Process Ind.* — 2006. — V. 19. — P. 769–773.
 7. **Chen Z., Fan B.** Flame propagation through aluminum particle cloud in a combustion tube // *J. Loss Prevent. Process Ind.* — 2005. — V. 18. — P. 13–19.
 8. **Ильин А. П., Громов А. А., Верещагин В. И., Попенко Е. М., Сургин В. А., Лен А.** О горении сверхтонкого алюминия в воздухе // *Физика горения и взрыва.* — 2001. — Т. 37, № 6. — С. 56–60.
 9. **Joulin G.** Asymptotic analysis of non-adiabatic flames, heat losses towards small inert particles // *Proc. Combust. Inst.* — 1981. — V. 18. — P. 1395–1404.
 10. **Kwon Y. S., Gromov A. A., П'ин А. П., Попенко Е. М., Rim G. H.** The mechanism of combustion of superfine aluminum powders // *Combust. Flame.* — 2003. — V. 133. — P. 385–391.
 11. **Dreizin E. L.** On the mechanism of asymmetric aluminum particle combustion // *Combust. Flame.* — 1999. — V. 117. — P. 841–850.
 12. **Бекстед М. В.** Анализ данных по времени горения частиц алюминия // *Физика горения и взрыва.* — 2005. — Т. 41, № 5. — С. 55–69.
 13. **Derizin E. L.** Experimental study of aluminum particle flame evolution in normal and microgravity // *Combust. Flame.* — 1999. — V. 116. — P. 323–333.
 14. **Julien P., Vickery J., Whiteley S., Wright A., Goroshin S., Bergthorson J. M., Frost D. L.** Effect of scale on freely propagating flames in aluminum dust clouds // *J. Loss Prevent. Process Ind.* — 2015. — V. 36. — P. 230–236.
 15. **Goroshin S., Bidabadi M., Lee J. H. S.** Quenching distance of laminar flame in aluminum dust clouds // *Combust. Flame.* — 1996. — V. 105. — P. 147–160.
 16. **Goroshin S., Kolbe M., Lee J. H. S.** Flame speed in a binary suspension of solid fuel // *Proc. Combust. Inst.* — 2000. — V. 28, N 2. — P. 2811–2817.
 17. **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. — P. 5–13.
 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. — P. 2001–2009.
 19. **Daou J.** Strained premixed flames: Effect of heat-loss, preferential diffusion and reversibility of the reaction // *Combust. Theory Model.* — 2011. — V. 15. — P. 437–454.
 20. **Thatcher R. W., AlSarairah E.** Steady and unsteady flame propagation in a premixed counterflow // *Combust. Theory Model.* — 2007. — V. 11. — P. 569–583.
 21. **Wang H. Y., Chen W. H., Law C. K.** Extinction of counterflow diffusion flames with radiative heat loss and nonunity Lewis numbers // *Combust. Flame.* — 2007. — V. 148. — P. 100–116.
 22. **Camacho J., Singh A. V., Wang W., Shan R., Yapp E. K. Y., Chen D., Kraft M., Wang H.** Soot particle size distributions in premixed stretch-stabilized flat ethylene — oxygen — argon flames // *Proc. Combust. Inst.* — 2017. — V. 36, N 1. — P. 1001–1009.
 23. **El-Mahallaway F., El-Din Habik S.** Fundamentals and Technology of Combustion. — Elsevier Science Ltd, UK, 2002.
 24. **Rand R. H., Armbruster D.** Perturbation Methods, Bifurcation Theory and Computer Algebra. — Springer, 1987.
 25. **Nayfeh A. H.** Introduction to Perturbation Techniques. — John Wiley & Sons, 1993.
 26. **Badiola C., Gill R. J., Dreizin E. L.** Combustion characteristics of micron-sized aluminum particles in oxygenated environments // *Combust. Flame.* — 2011. — V. 158. — P. 2064–2070.

*Поступила в редакцию 20/IX 2017 г.,
в окончательном варианте — 20/II 2018 г.*