

DOI: 10.15593/2224-9982/2022.69.05

УДК 541.1; 662.6; 51-74

А.Ю. Крюков, В.И. Малинин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ВЛИЯНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРЕДПЛАМЕННОЙ ОБЛАСТИ НА ГОРЕНИЕ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ В КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ

Проанализированы процессы в предпламенной области при горении частиц алюминия в средах «79 % Ar + 21 % O₂» и «79 % He + 21 % O₂». Обоснована необходимость учёта диссоциации кислорода для объяснения влияния физических процессов на скорость горения частиц. Расчёты выполнены для условий квазистационарности и сферической симметрии процессов в предпламенной области, для частиц диаметром 220 мкм и давления окружающей среды $p = 0,1$ МПа. Установлено, что значения концентрации диссоциирующего окислителя на границе пламени на 30 % ниже для горения в аргоне и в 2,5 раза ниже для горения в гелии, чем вычисленные без учёта диссоциации. Получены распределения концентраций окислительных компонентов, температуры среды в зависимости от отношения координат R внутренних точек области к текущему радиусу частицы R_0 . Показано, что предпламенная область лежит в пределах $15 \leq R/R_0 \leq 6,9$ для горения в аргоне и в пределах $2,4 \leq R/R_0 \leq 5,1$ для горения в гелии. Результаты анализа показывают необходимость учёта диссоциации молекулярного кислорода в рассматриваемой области и объясняют отличия скоростей горения, полученных в экспериментах, от расчётных значений, а также соотношение скоростей горения частиц в средах с существенно различными коэффициентами переноса.

Ключевые слова: предпламенная область, зона пламени, граничные условия, термодинамический анализ, диссоциация кислорода, потоки молекулярного и атомарного кислорода.

A.Yu. Kryukov, V.I. Malinin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

INFLUENCE OF PHYSICAL PROCESSES IN PREFLAME REGION ON ALUMINUM PARTICLES COMBUSTION IN OXYGEN-CONTAINING MEDIA

The processes in preflame region while combustion of aluminum particles in media «79% Ar + 21% O₂» and «79% He + 21% O₂» were analyzed. The necessity of oxygen dissociation taking into account for explanation of effect of physical processes on particles rate of combustion is proved. The calculations are implemented for particles of diameter 220 μm and ambient pressure $p=0,1$ MPa provided that quasistationarity and symmetry of processes. Values of concentration of dissociating oxidizer on the flame boundary are established to be lower than those calculated without dissociation taking into account (in 2,5 times lower for combustion in helium and by 30% lower for combustion in argon). Distributions of medium temperature and concentrations of oxidizing components are obtained depending on relation of coordinates R of inner points of region to current particle radius R_0 . The preflame region is revealed to be in the range of $2,4 \leq R/R_0 \leq 5,1$ for burning in helium and to be in the range of $15 \leq R/R_0 \leq 6,9$ for burning in argon. The results of analysis show necessity of molecular oxygen dissociation taking into account in the region under consideration. The results explain differences of burning rates obtained in experiments from calculated values. Also results of this work explain particles combustion rates ratio in media possessing essentially different transport coefficients.

Keywords: preflame region, flame zone, boundary conditions, thermodynamic analysis, oxygen dissociation, flows of molecular and atomic oxygen.

Построение и исследование моделей горения частиц порошкообразного алюминия является актуальной задачей, решение которой позволяет получать новые знания о физико-химических и теплофизических явлениях, определяющих параметры рабочих процессов технологических и энергетических установок [1–11].

Скорость горения частиц металла является важным параметром, который включает-

ся в математические модели процессов в камерах сгорания, оказывает влияние на тепло- и массообмен, режимы химических реакций. Поэтому понимание факторов, определяющих скорости горения частиц, является существенным и важным для развития теории горения и её прикладного использования [2; 3; 7; 9].

Как следует из общей теории горения частиц, скорость горения обратно пропор-

циональна коэффициенту диффузии [8–10]. Таким образом, скорости горения частиц в смесях «79 % He + 21 % O₂» должны быть примерно в 2,5 раз выше, чем в смесях «79 % Ar + 21 % O₂». Но результаты экспериментов [4–6] показывают, что данные скорости отличаются примерно в 1,5 раза. Причиной этого, по-видимому, являются особенности горения, которые их ограничивают. Ранее в моделях, описывающих горение частицы алюминия [2; 12], полагалось, что все значимые процессы происходят в зоне пламени, процессами же в предпламенной области пренебрегалось. Однако в ней фактически происходит перенос вещества и энергии, что может оказывать воздействие на концентрации окислителя, а значит, и на скорость горения частицы. В частности, не учитывалась диссоциация молекул кислорода на атомы, т.е. переход части окислителя в одноатомный газ в предпламенной области.

Поэтому целью настоящей работы является анализ влияния коэффициентов переноса на распределение температуры и концентраций окислительных компонентов в предпламенной области при горении частиц алюминия в средах «79 % Ar + 21 % O₂».

Задачи, которые решаются в работе:

- разработка усовершенствованной физической модели горения одиночной частицы алюминия: введение в рассмотрение области, где процессы горения ещё не идут, но существенна диссоциация кислорода (предпламенная область);

- выявление зависимостей между термодинамическими параметрами (температурой и концентрацией окислителя) в предпламенной области горящей частицы;

- построение математической модели физических процессов (переноса тепла и окислительных компонентов) в предпламенной области;

- расчёт зависимостей температуры среды и концентрации окислительных компонентов от относительного радиуса $\bar{R} = R / R_0$ (отношения сферической координаты R точек предпламенной области к текущему радиусу частицы R_0) с учётом диссоциации кислорода при высоких температурах.

Физическая модель горения частицы с учётом предпламенной области

Схема физической модели горения представлена на рис. 1. В дополнение к физической модели, представленной в работах [1; 12], в рассмотрение введена предпламенная область с границей радиусом R_4 (рис. 1), физические процессы в которой оказывают существенное влияние на дальнейшее горение в зоне пламени и параметры физико-химических процессов внутри неё. Таким образом, предложено разделение прилегающего к частице пространства на четыре части, ограниченные радиусами R_1 , R_2 , R_3 и R_4 , значения которых определяются балансом потоков тепла, массы и скоростей физико-химических процессов [1; 12–14]. Процессы в предпламенной области, расположенной между радиусами R_3 и R_4 , особенности тепло- и массопереноса, связанные с диссоциацией молекулярного кислорода при высоких температурах, должны влиять на горение в зоне пламени (область R_1 – R_3). Поэтому в данной работе и выполнен их анализ.

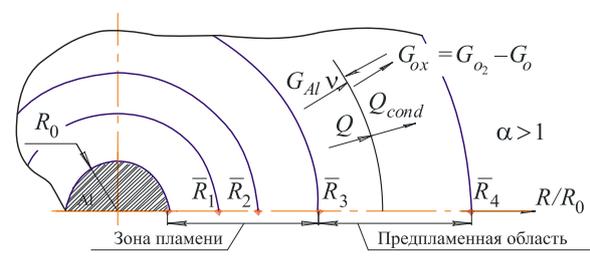


Рис. 1. Схема процессов горения одиночной частицы алюминия

Расчёт термодинамических параметров в предпламенной области

Выполнен термодинамический расчёт параметров в предпламенной области частицы, горящей в средах «79 % He + 21 % O₂» и «79 % Ar + 21 % O₂» на основе классической модели равновесной термодинамики [15]. Результаты термодинамического анализа, необходимые для реализации в дальнейшем процедуры расчётов распределения температуры и концентрации окислительных компонентов, представлены на рис. 2, а (смесь гелия с ки-

слородом) и рис. 2, б (смесь аргона с кислородом) в форме зависимостей температуры среды от концентрации окислителя p_{ox}/p . Здесь p_{ox} – суммарное давление окислителя, вычисляемое по давлениям атомарного p_O и молекулярного кислорода p_{O_2} : $p_{ox} = 0,5p_O + p_{O_2}$ [12].

Для учёта процесса диссоциации кислорода граница предпламенной области (зоны диссоциации) условно установлена в координате R_4 , при которой соотношение p_O/p_{ox} составляет 0,02 (это соответствует диссоциации 1 % молекулярного кислорода). Графики зависимостей термодинамических параметров от концентрации окислителя для различных значений степени диссоциации кислорода p_O/p_{ox} строятся вплоть до границы зоны пламени, где последняя кривая уже определяется через степень превращения η металла в конденсированный оксид [1; 13] и соответствует $\eta = 0,99$.

По графикам можно определять температуру при заданных величинах p_O , p_{O_2} и p_{ox} , а далее по найденным значениям рассчитывать потоки тепла и окислителя в соответствии с изложенным ниже математическим описанием процессов в предпламенной области.

Определение граничных условий

В начальной точке на кривой, соответствующей $p_O/p_{ox} = 0,02$, давление окис-

лителя определяется по формуле, аналогичной использованной в работе [12]:

$$p_{ox} = 0,21 - \frac{g_{Al}^* R_0^* \nu R_g \bar{T}}{0,167 \cdot (\bar{T} / 273)^{1,74} \bar{R}_4}, \quad (1)$$

где g_{Al}^* , R_0^* – известные расход металла на единицу площади частицы и радиус частицы при определённом времени горения, соответственно, вычисляемые по модели горения частицы в диффузионном режиме, $\nu = 0,75$ – стехиометрический коэффициент для реакции окисления, R_g – универсальная газовая постоянная, R_0 – текущий радиус частицы, R – сферическая координата предпламенной области, $\bar{R}_4 = R_4/R_0$ – относительный радиус границы предпламенной области, \bar{T} – температура, являющаяся средней между значениями T_{R_4} (температура, задаваемая на границе предпламенной области) и T_∞ (температура окружающей среды, равная 300 К).

Относительный радиус \bar{R}_4 определяется следующим образом:

$$\bar{R}_4 = \frac{k_r g_{Al} R_0^* q_H}{\lambda_{mix} \cdot (T_{R_4} - T_\infty)}, \quad (2)$$

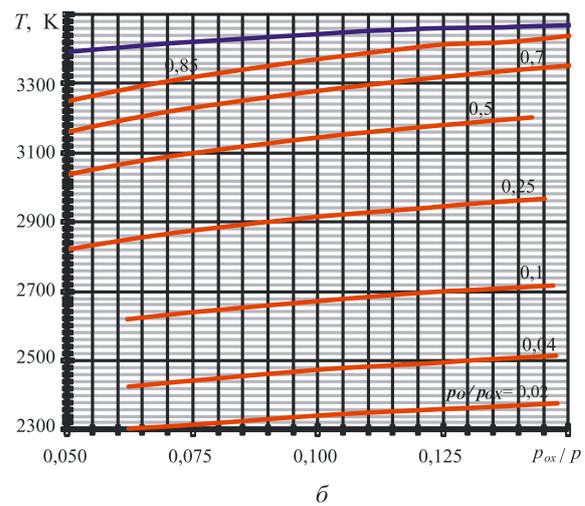
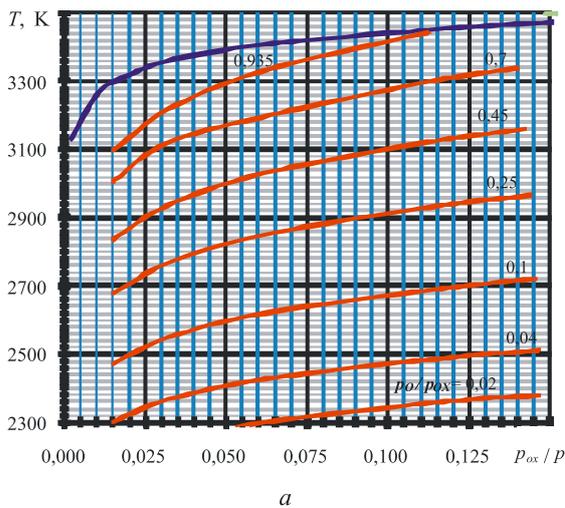


Рис. 2. Зависимость температуры в предпламенной области от концентрации окислителя и отношения давления атомарного кислорода к общему давлению окислителя для горения при $\eta = 0,99$: а – в среде «79 % He + 21 % O₂», б – в среде 79 % Ar + 21% O₂»

где k_r – отношение потока тепла, отдаваемого за счёт теплопроводности и диффузии окислителя к суммарному потоку, определённом с учётом лучистого теплообмена, g_{Al} – массовый расход алюминия на единицу площади поверхности частицы (определён по данным, представленным в [3; 4; 6; 11]), λ_{mix} – теплопроводность смеси на радиусе R_4 , определяемая по справочнику [16], q_H – удельная теплота химической реакции алюминия с кислородом в зоне пламени. Коэффициент k_r рассчитывается по формуле

$$k_r = \frac{Q_{ht} + Q_{hd}}{Q_{ht} + Q_{hd} + Q_{rad}}, \quad (3)$$

где Q_{ht} – тепловой поток за счёт теплопроводности, Q_{hd} – тепловой поток, обусловленный диффузионным переносом, Q_{rad} – тепловой поток, обусловленный излучением. Соответствующие тепловые потоки определяются так [17]:

$$Q_{ht} = -\lambda \frac{dT}{dR}, \quad Q_{hd} = -\sum_j i_j \frac{dp_{ox}}{dR},$$

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_3^4 - T_\infty^4),$$

где λ – коэффициент теплопроводности среды, определяемый по данным термодинамического анализа, j – номер окислительного компонента ($j = 1$ – молекулярный кислород, $j = 2$ – атомарный кислород), i_j – энтальпия j -го окислительного компонента, ε – эффективная степень черноты облака ультрадисперсного оксида, σ – постоянная Стефана – Больцмана, T_3 – температура на границе пламени R_3 (см. рис. 1).

Для горения в аргоне коэффициент k_r определён на основании работы [12]. Для горения в гелии его значение определено на основании сопоставления размеров зон пламени при сгорании частицы в смесях «79 % Ar + 21 % O₂» [1; 4; 12] и «79 % He + 21 % O₂» [18]. Полученные значения k_r равны 0,8 и 0,98 соответственно.

Математическая модель процессов

Задача, в соответствии с предложенной физической моделью, решается при следующих допущениях: сферической симметрии и квазистационарности процессов, которые протекают в равновесном режиме, с учётом дис-

социации окислителя на атомарный и молекулярный кислород. Решение выполняется на основе баланса тепловых потоков, а также баланса массы окислителя.

В математической форме уравнение теплового баланса в каждой точке предпламенной зоны:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial R} = \left(k_r Q - \int_{I(R_4)}^{I(\bar{R})} dI \right) g_{Al} \frac{R_0}{R^2}, \quad (4)$$

где T – температура, $Q = g_{Al} q_H$ – тепловыделение в реакции алюминия с кислородом в зоне пламени, I – удельная (массовая) энтальпия среды предпламенной области при соответствующей координате:

$$I = v \left[\frac{1}{2} I_{O_2} \left(1 - \frac{p_o}{p_{ox}} \right) - C_p \left(1 - \frac{1}{2} \frac{p_o}{p_{ox}} \right) (T - T_{R_4}) \right], \quad (5)$$

где q_H – удельная теплота химической реакции в зоне пламени, $v = 0,75$ – стехиометрический коэффициент для реакции окисления, I_{O_2} – удельная массовая энтальпия молекулярного кислорода, C_p – удельная массовая теплоёмкость молекулярного кислорода.

Уравнение баланса массы окислителя в каждой точке предпламенной зоны:

$$-\left(D_{O_2} \frac{\partial p_{O_2}}{\partial R} + 0,5 D_O \frac{\partial p_O}{\partial R} \right) / (R_g T) = v g_{Al} \frac{R_0}{R^2}, \quad (6)$$

где R_g – газовая постоянная кислорода, D_{O_2} – коэффициент диффузии молекулярного кислорода, D_O – коэффициент диффузии атомарного кислорода, которые определяются, как и коэффициент теплопроводности, по данным термодинамического анализа, p_O – давление атомарного кислорода, p_{O_2} – давление молекулярного кислорода.

Граничные условия для решения системы уравнений (4) – (6) – значения температуры T и давления окислителя p_{ox} определяются на радиусе R_4 (внешняя граница) и на радиусе R_3 (внутренняя граница).

В целом уравнения (4) – (6) устанавливают на текущем радиусе (координате) R/R_0

равенство тепловых потоков из точек предпламенной области, лежащих ближе к частице, чем R/R_0 , и идущего к лежащим дальше, чем R/R_0 , слоям, а также равенство расхода окислителя, необходимого для образования Al_2O_3 , и окислителя, поступающего из окружающей среды через предпламенную область к зоне пламени.

Схема расчёта параметров в предпламенной области (методы решения задачи)

Зависимости распределения температуры $T(R/R_0)$ и давления окислителя $p_{ox}/p(R/R_0)$ по координате предпламенной области определяются из решения уравнений (4) – (6). Причём необходимо решать систему из двух нелинейных уравнений интегро-дифференциального и дифференциального. Их аналитическое решение весьма затруднительно. Требуется одновременно учесть зависимости теплофизических свойств среды (коэффициентов переноса) от температуры, а также взаимосвязи параметров T и p_{ox} , которые должны определяться с помощью термодинамического анализа при заданном значении p_O/p_{ox} .

Предлагается следующая схема приближённого численного решения уравнений баланса, аналогичная описанной в работе [1]. Вся область разбивается на отдельные участки, на границах которых задана величина отношения давлений (концентраций) p_O/p_{ox} и рассчитываются температура и давление окислителя (рис. 3). Решение для каждой относительной координаты \bar{R}_i получается с помощью решения, полученного на предыдущем шаге для координаты \bar{R}_{i-1} .

Задача решается методом последовательных приближений путём баланса потоков окислителя и тепла для данной точки – координаты в предпламенной области – за счёт изменения её значения (см. рис. 3). Таким образом, на каждом шаге расчёта записывается следующее уравнение баланса потоков тепла:

$$-\lambda_{i,i-1}(T_{i-1} - T_i) \frac{(\bar{R}_{i-1} / \bar{R}_i)(\bar{R}_i / \bar{R}_0)}{R_0^*(\bar{R}_{i-1} / \bar{R}_i - 1)} = g_{Al} \left(k_r Q - \sum_{i=0}^N (I_i - I_{i-1}) \right), \tag{7}$$

где $\lambda_{i,i-1}$ – теплопроводность, определяемая при температуре, являющейся средней между температурами в точках области с номерами i и $i-1$, R_0^* – начальный радиус частицы, N – текущее количество шагов расчёта, наибольшее значение N определяется условием окончания расчёта.

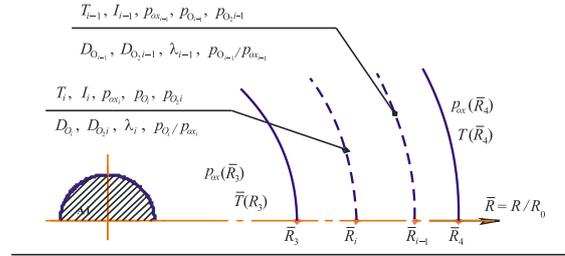


Рис. 3. Схема расчёта параметров в предпламенной области

Уравнение баланса потоков окислителя на каждом шаге расчёта записывается следующим образом:

$$-\left[D_{O_{2i,i-1}} (p_{O_{2i}} - p_{O_{2i-1}}) + 0,5 D_{O_{i,i-1}} (p_{O_{i-1}} - p_{O_i}) \right] \cdot \frac{(\bar{R}_{i-1} / \bar{R}_i)(\bar{R}_i / \bar{R}_0)}{R_0^*(\bar{R}_{i-1} / \bar{R}_i - 1) \bar{T} R_g} = \nu g_{Al}, \tag{8}$$

где \bar{T} – средняя температура между точками области с номерами i и $i-1$, а в текущей точке с номером i для расчётов используются значения коэффициентов диффузии и теплопроводности, равные средней величине между их значениями в точках с номерами i и $i-1$.

По величине температуры среды T и давления окислителя p_{ox} для заданных отношений p_O/p_{ox} рассчитывались тепловые и диффузионные потоки при соответствующих координатах \bar{R}_i , т.е. вычислялись левые и правые части уравнений (7) и (8) соответственно. Значения левых и правых частей сравнивались между собой, и, если их расхождение превышало 1 %, то величина \bar{R}_i корректировалась совместно с величиной термодинамических параметров до достижения баланса. При достижении совместного баланса фиксировались соответствующие значения T и p_{ox} , координата \bar{R}_i и осуществлялся переход к следующей точке.

Результаты расчётов, их обсуждение и анализ

Решение выполнено для частиц диаметром 220 мкм и давления окружающей среды $p = 0,1$ МПа в соответствии с подходами к определению термодинамических параметров, которые изложены выше.

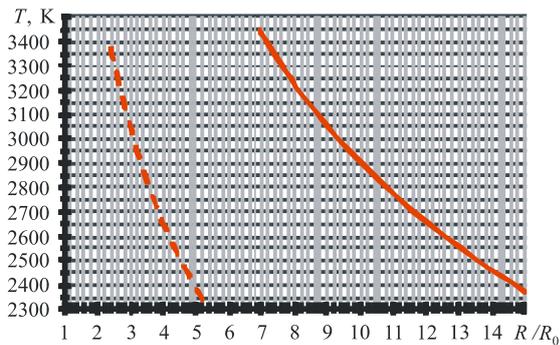


Рис. 4. Зависимости температур от координаты предпламенной области, сплошные линии – горение в среде «79 % Ar + 21 % O₂», штриховые – в среде «79 % He + 21 % O₂»

Температуры среды T (рис. 4) нелинейно возрастают от граничной координаты R/R_0 до координаты, соответствующей границе края пламени [12; 14], причём размер предпламенной области лежит в пределах $15 \leq R/R_0 \leq 6,9$ для горения в аргоне, а для горения в гелии она гораздо уже – $2,4 \leq R/R_0 \leq 5,1$. Таким образом, значения относительного радиуса для среды «79 % He + 21 % O₂» гораздо меньше, чем для среды «79 % Ar + 21 % O₂», что объясняется гораздо большими значениями коэффициентов переноса для горения в гелии (соотношение коэффициентов диффузии примерно 2,5, коэффициентов теплопроводности – 1,7). Это же объясняет и значительно бóльшие производные рассматриваемых термодинамических параметров по координате предпламенной области для смеси «79 % He + 21 % O₂». Для среды «79 % Ar + 21 % O₂» конечные результаты расчёта в целом соответствуют данным экспериментов [4].

Концентрации окислительных компонентов, рассчитанные в пределах указанных выше диапазонов относительного радиуса,

показывают, что в целом концентрация окислителя падает в направлении поверхности частицы (см. рис. 4).

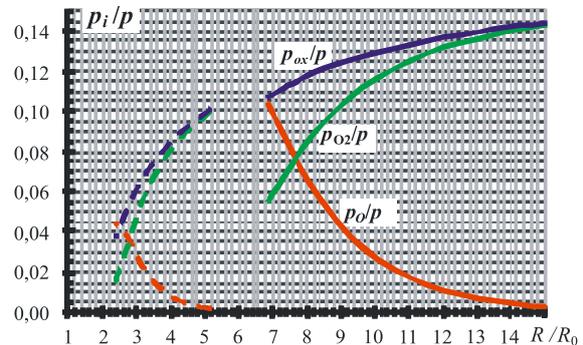


Рис. 5. Зависимости концентраций окислительных компонентов от координаты предпламенной области, сплошные линии – горение в среде «79 % Ar + 21 % O₂», штриховые – в среде «79 % He + 21 % O₂»

Однако с ростом температуры всё большая часть кислорода подвергается диссоциации, и вычисления показывают, что по крайней мере до границы пламени концентрация атомарного кислорода увеличивается (рис. 5). Следовательно, поток части окислительных компонентов (атомарного кислорода) направлен в окружающую среду, эффективный коэффициент диффузии окислителя уменьшается и диффузионное сопротивление в предпламенной области возрастает, соответственно, увеличивается перепад давлений между окружающей средой и зоной пламени. Это явление приводит к понижению скоростей процессов теплообмена и диффузии, что необходимо учитывать при теоретическом описании горения частиц алюминия. Полученные значения относительного давления (концентрации) окислителя на границе пламени существенно ниже, чем вычисленные ранее: давление окислителя на границе R_3 для смеси «79 % Ar + 21 % O₂» равно 0,1075, что существенно ниже, чем $p_{ox} = 0,127$, вычисленное в [1; 12] без учёта процессов в предпламенной области. Для смеси же «79 % He + 21 % O₂» $p_{ox} = 0,037$, что более чем в два раза ниже, чем дают вычисления без учёта процессов диссоциации кислорода.

«Торможение процессов» (уменьшение концентрации окислителя) по направлению от границы пламени к окружающей среде происходит более интенсивно при горении в смеси

«79 % He + 21 % O₂» из-за большого диффузионного сопротивления, поскольку массовая концентрация кислорода в ней составляет 68%, для смеси же «79 % Ar + 21 % O₂» она равна лишь 17,5 %. Следовательно, при горении в гелии увеличение общего относительного содержания кислорода в смеси увеличивает долю диссоциирующих молекул, т.е. долю атомарного кислорода и его бóльший поток от предпламенной области в окружающую среду.

Выполненные расчёты позволяют объяснить существенно более низкие скорости горения, измеренные в экспериментах, по сравнению с теоретическими предсказаниями их значений. Анализ показывает, что равновесная термодинамика предпламенной области является основой для расчёта и адекватного описания распределения в пространстве температуры и концентрации компонентов так же, как это имеет место и для зоны пламени [1].

Выводы

Разработана физическая модель горения частицы алюминия, в которой введена в рассмотрение предпламенная область, где процессы горения ещё не идут, но существенна диссоциация кислорода. Предпламенная область добавлена к описанию пространства вокруг частицы и присоединена к зоне пламени (равновесных процессов) и зоне неравновесных процессов.

С использованием зависимостей между температурой и концентрацией окислителя на основании уравнений баланса тепловых потоков и диффузионных потоков окислительных компонентов разработана математическая модель и методика расчёта, позволяющая вычислять распределение указанных термодинамических параметров вдоль относительного радиуса (отношения сферической координаты R точек предпламенной области к текущему радиусу частицы R_0). Исходя из допущений квазистационарности и равновесности процессов, выполнены расчёты переноса тепла и окислителя. При этом учёт диссоциации кислорода и значений коэффициентов переноса

позволяет количественно и качественно обосновать характер полученных зависимостей, связывающих термодинамические и геометрические параметры в предпламенной области.

Предпламенная область для горения в смеси гелия с кислородом имеет относительно малый размер ($2,4 \leq R / R_0 \leq 5,1$) по сравнению с таковым для горения в смеси аргона и кислорода ($15 \leq R / R_0 \leq 6,9$). Это обусловлено тем, что производные термодинамических параметров для среды «79 % He + 21 % O₂» по координате гораздо выше, чем для среды «79 % Ar + 21 % O₂», вследствие гораздо бóльших значений коэффициентов теплопроводности при горении в гелии.

Значение давления окислителя p_{ox} падает в направлении поверхности частицы, но с ростом температуры всё бóльшая часть кислорода диссоциирует, до границы пламени R_3 концентрация атомарного кислорода увеличивается, поток части окислительных компонентов (а именно атомарного кислорода) направлен в окружающую среду и замедляет процесс диффузии окислителя к зоне пламени. Полученное значение относительного давления (концентрации) окислителя p_{ox} на границе пламени R_3 для горения частицы алюминия в смеси «79 % Ar + 21 % O₂» равно 0,1075, для горения в смеси «79 % He + 21 % O₂» $p_{ox} = 0,037$, что на 30 % и соответственно более чем в два раза ниже, чем дают вычисления без учёта диссоциации кислорода в предпламенной области.

Результаты позволяют объяснить существенно бóльшие времена горения, измеренные в экспериментах, по сравнению с ранее известными теоретическими предсказаниями. Разработанная методика расчёта распределения термодинамических параметров может быть адаптирована к изучению горения частиц Al других исходных размеров в различных средах, а также использоваться для частиц других исходных размеров – промышленных порошков алюминия – порошкообразного металлического горючего.

Библиографический список

1. Kriukov A.Yu., Malinin V.I. Analysis of combustion peculiarities in flame zone of aluminium particle // Acta Astronautica. 2021. – 180. – P. 266–272.

2. Бекстед М.В., Лианг У., Паддуппаккам К.В. Математическое моделирование горения одиночной алюминиевой частицы (обзор) // Физика горения и взрыва. – 2005. – Т. 41, № 6. – С. 15–33.
3. Бекстед М.В. Анализ данных по времени горения частиц алюминия // Физика горения и взрыва. – 2005. – Т. 41, № 5. – С. 55–69.
4. PLIF species and ratiometric temperature measurements of aluminum particle combustion in O₂, CO₂ and N₂O oxidizers, and comparison with model calculations / P. Bucher [et. al.] // Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute. – 1998. – P. 2421–2429.
5. Dreizin E.L. On the mechanism of asymmetric aluminum particle combustion // *Combust. Flame*. – 1999. – Vol. 117. – P. 841–850.
6. Особенности горения капли алюминия в смесях кислорода с аргоном и гелием / Г.П. Кузнецов, А.Г. Истратов, В.И. Колесников-Свинарёв, И.Г. Ассовский // Горение и взрыв. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 83–87.
7. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В. Горение порошкообразных металлов в активных средах. – М.: Наука, 1972.
8. Гремячкин В.М. Гетерогенное горение частиц твёрдых топлив. – М.: Изд-во Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана им. Н.Э. Баумана, 2015. – 230 с.
9. Ягодников Д.А. Горение порошкообразных металлов в газодисперсных средах. – М.: Изд-во Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, 2018. – 444 с.
10. Гремячкин В.М., Истратов А.Г., Лейпунский О.И. К теории горения металлических частиц // Физические процессы при горении и взрыве. – М.: Атомиздат, 1980. – С. 4–68.
11. Prentice J.L. and Kraentle K.L. Metal Particle Combustion Report. – Naval Weapons Center, NWC TR 4658. – 1969.
12. Крюков А.Ю., Малинин В.И. Зависимость размера зоны пламени одиночных частиц алюминия от давления // Вестник Пермского национального исследовательского университета. Аэрокосмическая техника. – 2020. – № 60. – С. 45–54.
13. Крюков А.Ю., Малинин В.И. Анализ особенностей горения одиночной частицы алюминия в кислородсодержащих средах на основе модели неравновесной термодинамики // Перспективные технологии, материалы и приборы для космических исследований и земных приложений: тез. докл. IX Междунар. конф. цикла «Космический вызов XXI века. (SPACE'2019)», Ярославль, 7–11 окт. 2019 г. / Федер. исслед. центр хим. физики им. Н.Н. Семенова РАН. – М., 2019. – С. 35–37.
14. Крюков А.Ю., Малинин В.И. Анализ влияния физических процессов в предпламенной области на горение частиц алюминия // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2021: материалы XXII Всерос. науч.-техн. конф. (г. Пермь, 18–20 ноября 2021 г.): в 2 т. – Т. 1. – Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского университета, 2021. – С. 89–92.
15. Трусов Б.Г. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах. – М.: Изд-во Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, 1991. – 40 с.
16. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 563 с.
17. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1987. – 502 с.
18. Experimental investigation of the aluminum combustion in different O₂ oxidizing mixtures: Effect of the diluent gases / A. Braconniera, C. Chauveaub, F. Halterb, S. Gallier // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2020. – Vol. 170. – P. 110110.

References

1. Kriukov A.Yu., Malinin V.I. Analysis of combustion peculiarities in flame zone of aluminium particle. *Acta Astronautica*, 2021, 180 pp. 266-272.
2. Beksted M.V., Liang U., Padduppakkam K.V. Matematicheskoe modelirovanie gorenija odinochnoy alyuminievoy chastitsy (obzor) [Mathematical modeling combustion of single aluminium particle (review)]. *Fizika gorenija i vzryva*, 2005, vol. 41, no. 6, pp. 15-33.
3. Beksted M.V. Analiz dannyh po vremeni gorenija chastits aljuminija [Data analysis on time of aluminium particles combustion]. *Fizika gorenija i vzryva*, 2005, vol. 41, no. 5, pp. 55-69.
4. Dreizin E. L. On the mechanism of asymmetric aluminum particle combustion. *Combust. Flame*, 1999, vol. 117, pp. 841-850.

5. Kuznetsov G.P., Istratov A.G., Kolesnikov-Svinarjev V.I., Assovskiy I.G. Osobennosti gorenija kapli aljuminija v smesjah kisloroda s argonom i heliem [Peculiarities of aluminum drop combustion in mixtures of oxygen with argon and helium]. *Gorenje i vzryv*, 2018, vol. 11, no. 2, pp. 83-87.
6. Bucher P. et. al. PLIF species and ratiometric temperature measurements of aluminum particle combustion in O₂, CO₂ and N₂O oxidizers, and comparison with model calculations. *Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion*. The Combustion Institute, 1998, pp. 2421-2429.
7. Pokhil P.F., Beljaev A.F., Frolov Yu.V. Gorenije poroshkoobraznykh metallov v aktivnykh sredakh [Combustion of powdery metals in active mediums]. Moscow, Nauka, 1972.
8. Gremjachkin V.M. Geterogennoe gorenje chastits tvjerdyyh tonliv [Heterogeneous combustion of particles of solid propellants]. Moscow, 2015, 230 p.
9. Yagodnikov D.A. Gorenije poroshkoobraznykh metallov v gazodispersnykh sredakh [Combustion of powdery metals in gas-dispersed media]. Moscow, 2018, 444 p.
10. V.M. Gremjachkin, A.G. Istratov, O.I. Lejpunskij K teorii gorenija metallicheskih chastits / *Fizicheskiye protsessy pri gorenii I vzryve*. Moscow: Atomizdat, 1980, pp. 4-68.
11. Prentice J.L. and Kraentle K.L. Metal Particle Combustion Report, Naval Weapons Center, NWC TP 4658, 1969.
12. Kryukov A.Yu., Malinin V.I. Zavisimost' razmera zony plameni odinochnykh chastits alyuminija ot davlenija [Dependence of flame zone size of single aluminium particles on pressure]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2020, no. 60, pp. 45-54.
13. Kryukov A.Yu., Malinin V.I. Analiz osobennostej gorenija odinochnoj chastitsy aljuminija v kislorodsoderzhaschih sredakh na osnove modeli neravnovesnoj termodinamiki [Analysis of combustion peculiarities of single aluminium particle in oxygen-containing media on the basis of nonequilibrium thermodynamics model]. *Perspektivnyje tehnologii, materialy I pribory dlja kosmicheskikh issledovanij i zemnykh prilozhenij: tez. dokl. IX mezhdunar. konf. tsikla «Kosmicheskij vyzov XXI veka. (SPACE'2019)»*, Yaroslavl', 7-11 october 2019. Feder. issled. tsentr him. fiziki im. N.N. Semjonova RAS. Moscow, 2019, pp. 35-37.
14. Kryukov A.Yu., Malinin V.I. Analizs vlijanija fizicheskikh protsessov v predplamennoi oblasti na gorenje chastits aljuminija [Analysis of physical processes influence in before-flame zone on aluminum particles combustion]. *Aerokosmicheskaja tekhnika, vysokije tehnologii i innovatsiy – 2021: mater. dokl. 22-j vsross. konf.*, Perm, 18-20 november 2021, Perm, 2021, pp. 89-92.
15. Trusov B.G. Modelirovanie himicheskikh i fazovykh ravnesij pri vysokih temperaturah. [Modeling of chemical and phase equilibriums at high temperatures]. Moscow: izd-vo MSTU im. N.E. Baumana, 1991, 40 p.
16. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovskij A.M. Fizicheskie velichiny: Spravochnik [Physical magnitudes: Reference book]. Ed. of I.S. Grigor'eva, E.Z. Mejliхова. Moscow: Jenergoatomizdat, 1991, 563 p.
17. Frank-Kamenetskij D.A. Diffuzija i teploperedacha v himicheskoy kinetike [Diffusion and heat transfer in chemical kinetics]. Moscow: izd-vo Nauka, 1987, 502 p.
18. Braconniera A., Chauveaub C., Halterb F., Gallier S. Experimental investigation of the aluminum combustion in different O₂ oxidizing mixtures: Effect of the diluent gases. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2020. vol. 170, pp. 110110.

Об авторах

Крюков Алексей Юрьевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Инновационные технологии машиностроения», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29), e-mail: alexkryukov@list.ru.

Малинин Владимир Игнатьевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29), e-mail: malininvi@mail.ru.

About the authors

Aleksey Y. Kryukov (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Assistant Professor, Department of “Innovation Technologies of Machine Engineering”, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky Av., 614990, Perm), e-mail: alexkryukov@list.ru.

Vladimir I. Malinin (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of “Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems”, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky Av., 614990, Perm), e-mail: malininvi@mail.ru.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках научного проекта FEUG-2020-0013.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Поступила: 20.05.2022

Одобрена: 27.05.2022

Принята к публикации: 04.08.2022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Крюков, А.Ю. Влияние физических процессов в предпламенной области на горение частиц алюминия в кислородсодержащих средах / А.Ю. Крюков, В.И. Малинин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 69. – С. 43–52. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.69.05

Please cite this article in English as: Kryukov A.Yu., Malinin V.I. Influence of physical processes in preflame region on aluminum particles combustion in oxygen-containing media. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2022, no. 69, pp. 43-52. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.69.05