

УДК 541.1; 662.6; 51-74

DOI: 10.15593/2224-9982/2023.74.02

А.Ю. Крюков, В.И. Малинин, А.А. Надыров, И.В. Данилов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ПРОЦЕССЫ В ПРЕДПЛАМЕННОЙ ОБЛАСТИ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ В КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Проанализированы процессы в зоне диссоциации при горении частиц алюминия в среде «79 % He + 21 % O₂». Обоснована необходимость учёта влияния давления на диссоциацию кислорода для объяснения влияния физических процессов на скорость горения частиц и на размеры частиц оксида, в частности, на условия образования ультрадисперсного оксида в среде «79 % He + 21 % O₂». Расчёты выполнены для условий квазистационарности и сферической симметрии процессов в предпламенной области, для частиц диаметром 220 мкм и давления окружающей среды $p = 1\text{--}6$ МПа в соответствии с результатами экспериментальных работ. Предложено разделение предпламенной области с включением в нее зоны диссоциации. Установлено, что значения концентрации диссоциирующего окислителя на границе пламени при высоком давлении уменьшаются в 10 раз по сравнению с атмосферным, а температура повышается на 15 %. Получены распределения концентраций окислительных компонентов, температуры среды в зависимости от отношения координат R внутренних точек области к текущему радиусу частицы R_0 , координаты точек границы пламени и концентрации окислителя на них в зависимости от давления среды. Показано, что зона диссоциации лежит в пределах $1,6 \leq R/R_0 \leq 2,9$ для горения при давлении $p = 6$ МПа, и в пределах $2,0 \leq R/R_0 \leq 4,0$ при атмосферном давлении. Результаты анализа позволяют предположить, что за счет дальнейшего уменьшения относительной концентрации окислителя в зоне пламени к поверхности частицы окислитель не поступает, что объясняет отсутствие крупнодисперсного оксида при горении частиц алюминия в среде «79 % He + 21 % O₂».

Ключевые слова: предпламенная область, условия образования ультрадисперсного оксида, горение частиц алюминия, баланс потоков тепла и окислителя, зона диссоциации, граничные условия, термодинамический анализ, влияние давления, диссоциация кислорода, потоки молекулярного и атомарного кислорода.

A.Yu. Kryukov, V.I. Malinin, A.A. Nadyrov, I.V. Danilov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

PRE-FLAME REGION PROCESSES OF ALUMINUM PARTICLES IN OXYGEN-CONTAINING MEDIA AT HIGH PRESSURES

The processes in the dissociation zone during the combustion of aluminum particles in the medium "79 % He + 21 % O₂" are analyzed. The necessity of taking into account the effect of pressure on oxygen dissociation to explain the influence of physical processes on the rate of combustion of particles and on the size of oxide particles, in particular on the conditions for the formation of ultrafine oxide in the medium "79 % He + 21 % O₂" is substantiated. The calculations were performed for the conditions of quasi-stationarity and spherical symmetry of processes in the pre-flame region, for particles with a diameter of 220 μm and ambient pressure $p = 1\text{--}6$ MPa in accordance with the results of experiment. The separation of the pre-flame region with the inclusion of a dissociation zone in it is proposed. It has been established that the values of the concentration of the dissociating oxidizer at the flame boundary at high pressure decrease by 10 times compared to atmospheric pressure, and the temperature rises by 15 %. The distributions of the concentrations of oxidizing components, the temperature of the medium depending on the ratio of the R coordinates of the internal points of the region to the current radius of the particle R_0 , the coordinates of the points of the flame boundary and the concentration of the oxidizer on them depending on the pressure of the medium are obtained. It is shown that the dissociation zone lies within $1.6 \leq R/R_0 \leq 2.9$ for combustion at a pressure of $p = 6$ MPa, and within $2.0 \leq R/R_0 \leq 4.0$ at atmospheric pressure. The results of the analysis suggest that due to a further decrease in the relative concentration of the oxidizer in the flame zone, the oxidizer does not enter the surface of the particle, which explains the absence of coarse oxide during the combustion of aluminum particles in the medium "79 % He + 21 % O₂".

Keywords: pre-flame region, ultra-dispersed oxide formation conditions, aluminum particles combustion, balance of heat and oxidant flows, dissociation zone, boundary conditions, thermodynamic analysis, pressure effect, oxygen dissociation, molecular and atomic oxygen flows.

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 [1–20].

Горение частиц алюминия при низком давлении среды происходит с образованием ультрадисперсного оксида, при высоком – крупнодисперсного и ультрадисперсного оксида, что подтверждают как теоретические, так и экспериментальные данные [8, 9]. Однако при горении алюминия в среде $\text{He} + \text{O}_2$ при низком и высоком давлении образуется только ультрадисперсный оксид [10]. Эти данные не объясняются теоретическими моделями, в которых не рассматривают процессы диссоциации в предпламенной области. Модель [2] описывает образование ультрадисперсного оксида за счет диссоциации молекулярного кислорода, но не анализирует это явление в зависимости от давления среды.

Поэтому целью настоящей работы является анализ процессов в предпламенной области при горении частиц алюминия в средах «79 % $\text{He} + 21\% \text{O}_2$ » при давлениях, существенно превышающих атмосферное (1,0–6,0 МПа).

Задачи, которые решаются в работе:

- расчёт температуры среды и относительных концентраций окислительных компонентов в зоне диссоциации кислорода при горении частиц алюминия в смеси «79 % $\text{He} + 21\% \text{O}_2$ » при давлениях 1,0–6,0 МПа;
- определение температуры и концентрации окислительных компонентов на границе пламени;
- проведение анализа диффузии окислительных компонентов от среды к границе пламени.

Физическая модель горения частицы с учётом предпламенной области

Схема физической модели горения (рис. 1), представленная в работе [2], уточнена и дополнена зоной диссоциации, которая условно расположена между границей зоны пламени (\bar{R}_3) и границей зоны диссоциации (\bar{R}_4). Предпламенная область включает в себя зону диссоциации и область на бесконечном удалении от зоны пламени, в которой процессы диссоциации кислорода незначительны. Процессы в зоне диссоциации, расположенной между радиусами $\bar{R}_3 \dots \bar{R}_4$, особенно тепло- и массопереноса, связанные с диссоциацией молекулярного кислорода при высоких температуре и давлении, должны влиять на горение в зоне пламени (область $\bar{R}_1 \dots \bar{R}_3$). Поэтому в данной работе и выполнен их анализ.

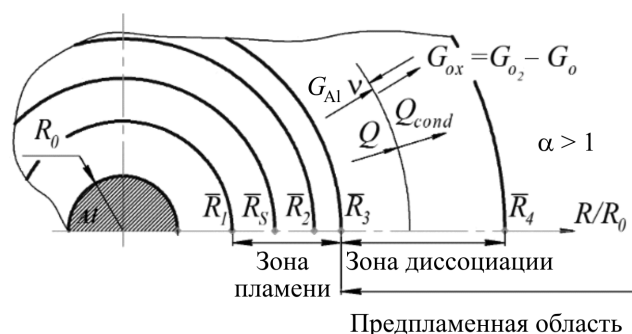


Рис. 1. Схема процесса горения одиночной частицы алюминия

Математическая модель процессов

Математическая модель и основные допущения взяты из работы [2].

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

в равновесном режиме, с учётом диссоциации 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 зоны диссоциации:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial R} = \left(k_r Q - \int_{I(\bar{R}_4)}^{I(\bar{R})} dI \right) g_{Al} \frac{R_0}{R^2}, \quad (1)$$

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

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

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 зоны диссоциации:

$$-\left(D_{O_2} \frac{\partial p_{O_2}}{\partial R} + 0,5 D_O \frac{\partial p_O}{\partial R} \right) / (R_g T) = v g_{Al} \frac{R_0}{R^2}, \quad (3)$$

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 (1)–(3) устанавливают на текущем радиусе (координате) R/R_0 равенство тепловых потоков из точек зоны диссоциации, лежащих ближе к частице, чем R/R_0 , и идущих 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 зону диссоциации к зоне пламени.

Определение граничных условий

В начальной точке на кривой, соответствующей $p_o/p_{ox} = 0,02$, давление окислителя определяется по формуле, аналогичной использованной в работе [2]:

$$\frac{p_{ox}(\bar{R}_4)}{p} = 0,21 - \frac{g_{Al}^* R_0^* v R_g \bar{T}}{D_{O_2} \left(1 + \frac{\bar{p}_{ox}}{p} \right) R_4 / R_0}, \quad (4)$$

где g_{Al}^* , R_0^* – известные расход металла на единицу площади частицы и радиус частицы при определённом времени горения τ^* , соответственно, вычисляемые по модели горения частицы в диффузионном режиме, $v = 0,75$ – стехиометрический коэффициент для реакции окисления, R_g – универсальная газовая постоянная, R_0 – текущий радиус частицы, R – сферическая координата зоны диссоциации, $\bar{R}_4 = R_4/R_0$ – относительный радиус границы зоны диссоциации, \bar{T} –

температура, являющаяся средней между значениями T_{R_4} (температура, задаваемая на границе зоны диссоциации) и T_∞ (температура окружающей среды, равная 300 К).

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

$$\bar{R}_4 = \frac{k_r g_{Al} R_0^* q_H}{\lambda_{mix} \cdot (T_{R_4} - T_\infty)}, \quad (5)$$

где k_r – отношение потока тепла, отдаваемого за счёт теплопроводности и диффузии окислителя к суммарному потоку, определённому с учётом лучистого теплообмена, g_{Al} – массовый расход алюминия на единицу площади поверхности частицы (определён по данным, представленным в [3, 4, 9, 10, 14]), λ_{mix} – теплопроводность смеси на радиусе R_4 , определяемая по справочнику [21], q_H – удельная теплота химической реакции алюминия с кислородом в зоне пламени. Коэффициент k_r рассчитывается по формуле

$$k_r = \frac{Q_{ht} + Q_{hd}}{Q_{ht} + Q_{hd} + Q_{rad}}, \quad (6)$$

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 [22]:

$$Q_{ht} = -\lambda \frac{dT}{dR}, \quad Q_{hd} = -\sum_j i_j \frac{dp_{ox}}{dR}, \quad Q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_3^4 - T_\infty^4),$$

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 (рис. 1).

Для горения в гелии коэффициент k_r определён на основании сопоставления размеров зон пламени при сгорании частицы в смесях «79 % Ar + 21 % O₂» [1, 4, 16] и «79 % He + 21 % O₂» [20]. Полученные значения для гелия $k_r = 0,96$ – $0,94$ при давлении среды $p = 1$ – 6 МПа.

Расчёт термодинамических параметров в зоне диссоциации

Выполнен термодинамический расчёт параметров в зоне диссоциации частицы, горящей в средах «79 % He + 21 % O₂» при давлениях 1–6 МПа на основе классической модели равновесной термодинамики [19]. Результат термодинамического анализа, необходимый для реализации в дальнейшем процедуры расчётов распределения температуры и концентрации окислительных компонентов, представлен в форме зависимостей температуры среды от концентрации окислителя p_{ox}/p (рис. 2). Здесь p_{ox} – суммарное давление окислителя, вычисляемое по давлениям атомарного p_O и молекулярного кислорода p_{O_2} : $p_{ox} = 0,5 p_O + p_{O_2}$ [4].

Для учёта процесса диссоциации кислорода граница зоны диссоциации условно установлена в координате \bar{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, 18] и соответствует $\eta = 0,99$.

По графикам можно определять температуру при заданных величинах p_{O_2} , p_{O_2} и p_{Ox} , а далее по найденным значениям рассчитывать потоки тепла и окислителя в соответствии с изложенным выше математическим описанием процессов в зоне диссоциации.

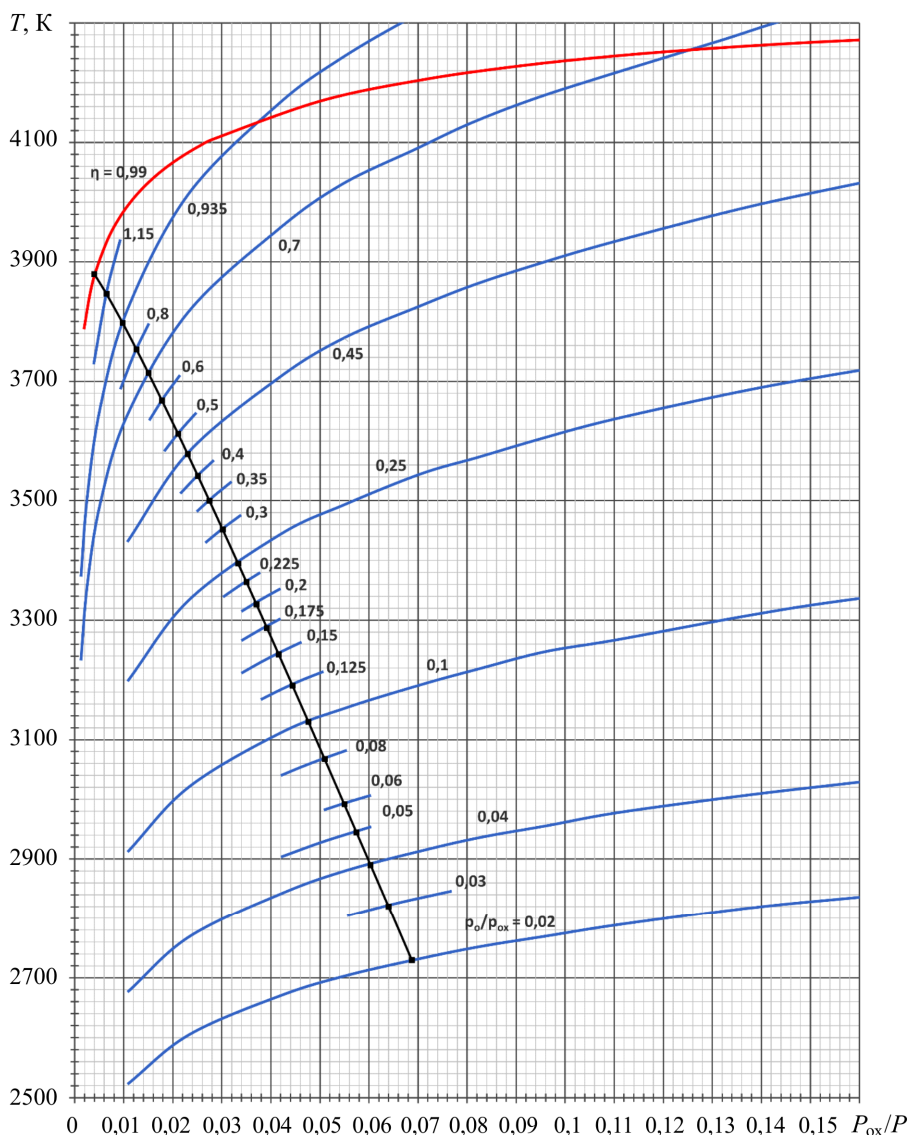


Рис. 2. Зависимость температуры в зоне диссоциации от концентрации окислителя и отношения давления атомарного кислорода к общему давлению окислителя для горения в среде «79 % He + 21 % O₂» при давлении 6 МПа

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 в работе [2].

Температуры среды T (рис. 3) нелинейно возрастают от граничной координаты R/R_0 до координаты, соответствующей границе края пламени [4], причём размер зоны диссоциации лежит в пределах $1,6 \leq R/R_0 \leq 2,9$ для горения при давлении среды $P = 6,0$ МПа, а при атмосферном – $2,0 \leq R/R_0 \leq 4,0$. Согласно литературным данным [11], при увеличении давления процессы горения приближаются к поверхности частицы. Следовательно, это справедливо и для зоны диссоциации.

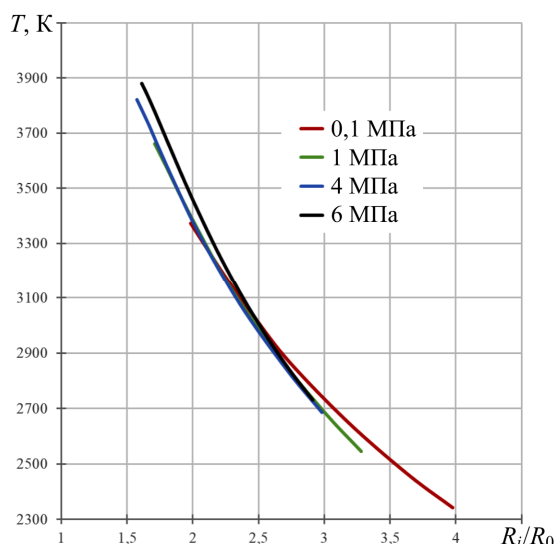


Рис. 3. Зависимости температур от координаты зоны диссоциации

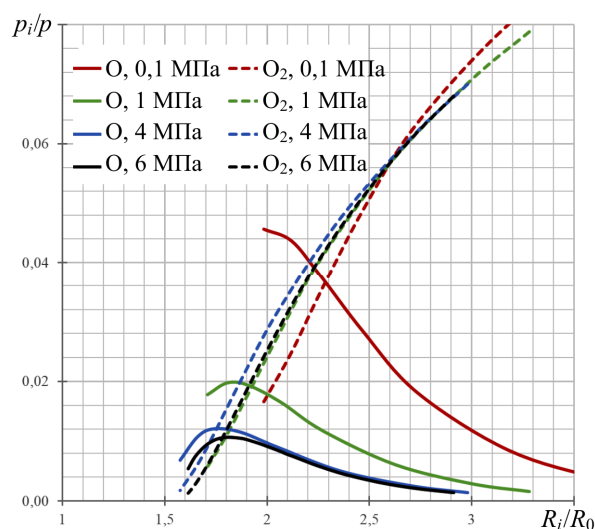


Рис. 4. Зависимости относительных концентраций окислительных компонентов от координаты зоны диссоциации

Концентрации окислительных компонентов, рассчитанные в пределах указанных выше диапазонов относительного радиуса, показывают, что в целом концентрация окислителя падает в направлении поверхности частицы (рис. 4). 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).

С ростом давления до 6 МПа суммарная концентрация окислителя на границе пламени уменьшается на порядок (более чем в 10 раз) по сравнению с горением при атмосферном давлении (рис. 6). Дальнейшее уменьшение относительной концентрации окислителя в зоне пламени может являться объяснением отсутствия крупнодисперсного оксида при горении частиц алюминия в среде «79 % He + 21 % O₂».

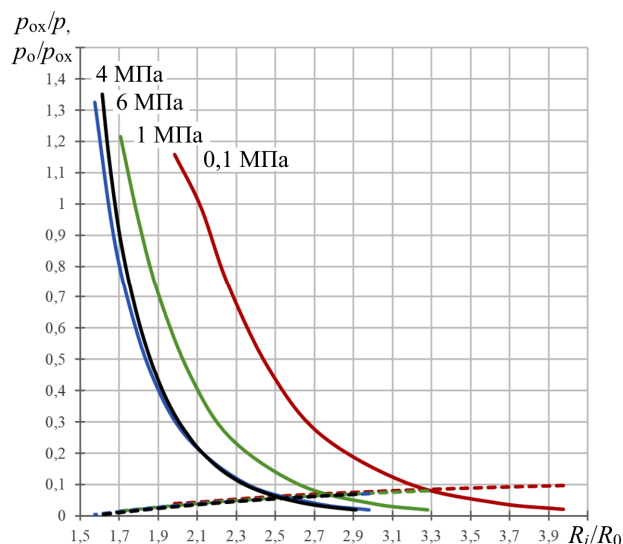


Рис. 5. Зависимости относительной концентрации окислителя и степени диссоциации кислорода от координаты зоны диссоциации (сплошные линии – степень диссоциации, штриховые – концентрация окислителя)

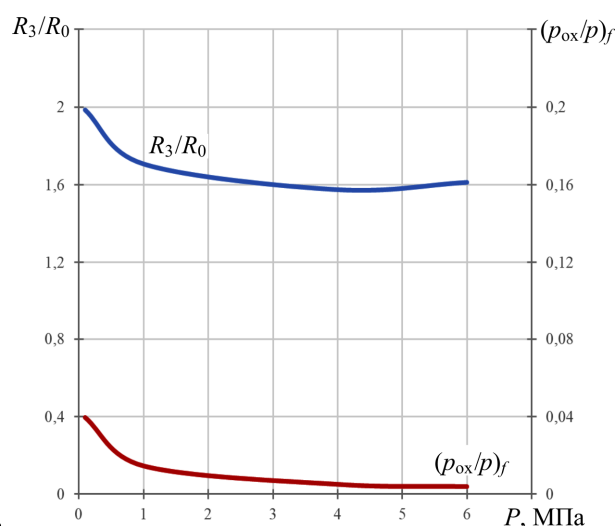


Рис. 6. Зависимости относительной концентрации окислителя и относительной координаты границы пламени от давления среды

Заключение

1. Зона диссоциации имеет относительно малый размер. Например, при давлении 6 МПа область находится в диапазоне $1,6 \leq R/R_0 \leq 2,9$, а при атмосферном – в диапазоне $2,0 \leq R/R_0 \leq 4,0$. Согласно литературным данным [11], при увеличении давления процессы горения приближаются к поверхности частицы. Следовательно, это справедливо и для зоны диссоциации.

2. На границе пламени повышение давления влияет на параметры в различных масштабах. По сравнению с горением при атмосферном давлении температура повышается всего на 15 %, а относительная концентрация уменьшается на порядок (более чем в 10 раз), что существенно влияет на процессы в зоне пламени.

3. При давлении 6 МПа суммарная относительная концентрация окислителя уменьшается от 0,07 на внешней границе зоны диссоциации до 0,004 на границе зоны пламени, а степень диссоциации возрастает от 0,02 (1 %) до 1,35 (67,5 %) соответственно. За счет этого происходит «эффект торможения» диффузии окислителя в зону пламени.

4. Данные результаты позволяют предположить, что за счет дальнейшего уменьшения относительной концентрации окислителя в зоне пламени к поверхности частицы окислитель не поступает, что объясняет отсутствие крупнодисперсного оксида при горении частиц алюминия в среде «79 % He + 21 % O₂». Следующим этапом работы по изучению горения частицы алюминия является исследование процессов в зоне пламени, а также автоматизация расчета путем создания программного комплекса для определения параметров в зоне диссоциации и в зоне пламени.

Библиографический список

1. Yu. Kriukov, V.I. Malinin. Analysis of combustion peculiarities in flame zone of aluminium particle // Acta Astronautica. – 2021. – № 180. – P. 266–272.
2. Крюков А.Ю., Малинин В.И. Влияние физических процессов в предпламенной области на горение частиц алюминия в кислородсодержащих средах // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 69. – С. 43–52.
3. Ягодников Д.А. Горение порошкообразных металлов в газодисперсных средах. – М.: Изд-во Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана, 2018. – 444 с.
4. Крюков А.Ю., Малинин В.И. Зависимость размера зоны пламени одиночных частиц алюминия от давления // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2020. – № 60. – С. 45–54.
5. Егоров А.Г. О скорости распространения пламени в аэрозвеси частиц алюминия // Физика горения и взрыва. – 2020. – Т. 56, № 1. – С. 48–58.
6. Егоров А.Г. Влияние дисперсных характеристик аэрозвеси на скорость распространения пламени // Ракетно-космические двигательные установки: материалы Всероссийской научно-технической конференции. – М.: Изд-во Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана, 2020. – С. 83–85.
7. Egorov A.G. Implementation and investigation of a pulsed aluminum-air flame // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – № 1181. Article number 012030.
8. Бекстед М.В. Анализ данных по времени горения частиц алюминия // Физика горения и взрыва. – 2005. – Т. 41, № 5. – С. 55–69.
9. Бекстед М.В., Лианг У., Паддупаккам К.В. Математическое моделирование горения одиночной алюминиевой частицы (обзор) // Физика горения и взрыва. – 2005. – Т. 41, № 6. – С. 15–33.
10. 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.
11. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В. Горение порошкообразных металлов в активных средах. – М.: Наука, 1972.
12. Малинин В.И. Внутрикамерные процессы в установках на порошкообразных металлических горючих. – Екатеринбург – Пермь: УрО РАН, 2006.
13. 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.

14. Dreizin E.L. On the mechanism of asymmetric aluminum particle combustion // *Combust. Flame.* – 1999. – Vol. 117. – P. 841–850.
15. Гремячкин В.М. Гетерогенное горение частиц твёрдых топлив. – М.: Изд-во Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана, 2015. – 230 с.
16. 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.
17. Prentice J.L. and Kraentle K.L., *Metal Particle Combustion Report.* – Naval Weapons Center, NWC TR 4658. – 1969.
18. 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. 9-й Междунар. конф. цикла «Космический вызов XXI века. (SPACE'2019)»*, Ярославль, 7–11 окт. 2019 г. / Федер. исслед. центр хим. физики им. Н.Н. Семенова Рос. акад. наук. – М.: [б. и.], 2019. – С. 35–37.
19. Трусов Б.Г. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах. – М.: Изд-во Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана, 1991. – 40 с.
20. 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.
21. 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.
22. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1987. – 502 с.

References

1. A.Yu. Kriukov, V.I. Malinin. Analysis of combustion peculiarities in flame zone of aluminium particle. *Acta Astronautica*, 180 (2021), pp. 266–272.
2. Kryukov A.Yu., Malinin V.I. Vliyanie fizicheskikh processov v predplamenoj oblasti na gorenje chastic alyuminiya v kislorodsoderzhashchih sredah [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.
3. Yagodnikov D.A. Gorenje poroshkoobraznyh metallov v gazodispersnyh sredah [Combustion of powdered metals in gaseous media]. – М.: Publishing house of the Bauman Moscow State Technical University, 2018. – p. 444.
4. Kryukov, V.I. Malinin. Zavisimost' razmera zony plameni odinochnykh chastic alyuminiya ot davleniya [Pressure dependence of flame zone size of single aluminium particles]. *PNRPU Aerospace engineering Bulletin.* – 2020, no. 60. – pp. 45-54.
5. Egorov A.G. O skorosti rasprostraneniya plameni v aerovzvesi chastic alyuminiya [Flame propagation velocity in an air suspension of aluminum particles]. *Physics of combustion and explosion.* 2020. Vol. 56. no. 1. pp. 48-58.
6. Egorov A.G. Vliyanie dispersnyh harakteristik aerovzvesi na skorost' rasprostraneniya plameni [Influence of dispersed characteristics of aerosuspension on the speed of flame propagation]. *Rocket and Space Propulsion Systems: Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference.* Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2020. pp. 83-85.
7. Egorov A.G. Implementation and investigation of a pulsed aluminum-air flame. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2021. № 1181. C. Article number 012030
8. M.V. Beksted. Analiz dannyh po vremeni gorenija chastic alyuminiya [Analysis of data on the burning time of aluminum particles]. *Physics of combustion and explosion.* 2005. Vol. 41, no. 5. pp. 55–69.
9. M.V. Beksted, U. Liang, K.V. Padduppakkam. Matematicheskoe modelirovanie gorenija odinochnoj alyuminievoj chasticy (obzor) [Mathematical modeling of combustion of a single aluminum particle (review)]. *Physics of combustion and explosion.* 2005. Vol. 41, no. 6. pp. 15–33.
10. G.P. Kuznetsov, A.G. Istratov, V.I. Kolesnikov-Svinarev, I.G. Assovsky. Osobennosti gorenija kapli alyuminiya v smesyah kisloroda s argonom i geliem [Features of combustion of a drop of aluminum in mixtures of oxygen with argon and helium]. *Combustion and explosion*, 2018, Vol. 11 no. 2. – pp. 83-87.

11. Pokhil P.F., Belyaev A.F., Frolov Yu.V. Gorenje poroshkoobraznyh metallov v aktivnyh sredah [Combustion of powdered metals in active media]. M.: Science, 1972.
12. Malinin V.I. Vnutrikamernye processy v ustanovkakh na poroshkoobraznyh metallicheskih goryuchih [Intrachamber processes in installations on powdered metal fuels]. Ekaterinburg-Perm: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2006.
13. 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.
14. Dreizin E.L. On the mechanism of asymmetric aluminum particle combustion // Combust. Flame. 1999. V. 117. pp. 841-850.
15. Gremyachkin V.M. Geterogennoe gorenje chastic tvorydyh topliv [Heterogeneous combustion of solid fuel particles]. Moscow: Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University, 2015. – p. 230
16. V.M. Gremyachkin, A.G. Istratov, O.I. Leipunsky. K teorii gorenija metallicheskih chastic [On the theory of combustion of metal particles]. Physical processes during combustion and explosion. Moscow: Atomizdat, 1980. pp. 4-68.
17. Prentice, J.L. and Kraentle, K.L., Metal Particle Combustion Report, Naval Weapons Center, NWC TP 4658, 1969.
18. A.Y. Kryukov, V.I. Malinin. Analiz osobennostej gorenija odinochnoj chasticy alyuminiya v kislorodsoderzhashchih sredah na osnove modeli neravnovesnoj termodinamiki [Analysis of the combustion features of a single aluminum particle in oxygen-containing media based on the model of nonequilibrium thermodynamics]. Advanced technologies, materials and devices for space research and terrestrial applications: [thesis of the 9th international conference of the cycle "Space Challenge of the XXI Century. (SPACE'2019) ", Yaroslavl, October 7-11. 2019] /Federal Research Center of Chem. Physics N.N. Semenov Physics of the Russian Academy of Sciences. - Moscow: [b. and.], 2019. – pp. 35-37.
19. Trusov B.G. Modelirovanie himicheskikh i fazovykh ravnovesij pri vysokih temperaturah [Modeling of chemical and phase equilibria at high temperatures]. – M.: Publishing house of the Bauman Moscow State Technical University, 1991. – p. 40
20. A. Braconniera, C. Chauveaub, F. Halterb, S. Gallier. Experimental investigation of the aluminum combustion in different O₂ oxidizing mixtures: Effect of the diluent gases // Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 170 (2020), p. 110110.
21. Physical quantities: Handbook. A.P. Babichev, N.A. Babushkina, A.M. Bratkovsky et al. Ed. by I.S. Grigoriev, E.Z. Meilikhov. Moscow: Energoatomizdat, 1991. p. 563 (in Russian).
22. Frank - Kamenetsky D.A. Diffuziya i teploperedacha v himicheskoy kinetike [Diffusion and heat transfer in chemical kinetics]. - M.: Science, 1987. - p. 502

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).

Надыров Арсен Альбертович (Пермь, Россия) – студент, кафедра «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: arseseninsin@gmail.com).

Данилов Илья Владимирович (Пермь, Россия) – студент, кафедра «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: ilya.dan.2001@mail.ru).

About the authors

Aleksey Yu. Kryukov (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Assistant Professor, Department of Machine Engineering Innovation Technologies, 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: malininv@mail.ru).

Arsen A. Nadyrov (Perm, Russian Federation) – Student, Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: arseseninsin@gmail.com).

Илья V. Danilov (Perm, Russian Federation) – Student, Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: ilyadanilov2000@gmail.com).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Поступила: 27.06.2023

Одобрена: 30.06.2023

Принята к публикации: 12.10.2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Процессы в предпламенной области частиц алюминия в кислородсодержащих средах при высоких давлениях / А.Ю. Крюков, В.И. Малинин, А.А. Надыров, И.В. Данилов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2023. – № 74. – С. 20–29. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.74.02

Please cite this article in English as: Kryukov A.Yu., Malinin V.I., Nadyrov A.A., Danilov I.V. Pre-flame region processes of aluminum particles in oxygen-containing media at high pressures. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2023, no. 74, pp. 20-29. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.74.02