

УДК 621.453

Д.А. Болховских, В.И. Малинин, Р.В. Бульбович

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВОВ МЕТАЛЛОГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОДИСПЕРСНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Рассматриваются процессы, протекающие в форкамере опытно-промышленной установки сжигания газозвесей металлических порошков и синтеза дисперсных оксидов. Описаны наиболее значимые факторы, влияющие на получение нанооксида алюминия в опытно-промышленной установке, такие как температура продуктов первичного горения, доли конденсированной и газообразной фазы алюминия, образованные в форкамере. С учетом влияния этих факторов подобраны компоненты, способствующие улучшению процесса синтеза и качества нанооксида алюминия. Исследованы горючие металлогазовые смеси, содержащие инертные по отношению к алюминию компоненты: $\text{Al} + \text{O}_2 + \text{H}_2$, $\text{Al} + \text{O}_2 + \text{He}$, $\text{Al} + \text{O}_2 + \text{Ar}$. Для сравнения рассмотрена применяемая ранее смесь $\text{Al} + \text{воздух}$. Проведены термодинамические расчеты, определен состав продуктов сгорания исследуемых металлогазовых смесей и содержание конденсированной фазы в смеси. Построены графики зависимости суммарной доли конденсированной фазы, температуры и доли алюминия в конденсированной фазе от коэффициента избытка окислителя. Проведено сравнение смесей, содержащих инертные компоненты, со смесью $\text{Al} + \text{воздух}$ и выявлено снижение массовой доли конденсированной фазы в 2–3 раза, доли алюминия в конденсированной фазе в 3–6 раз и температуры продуктов сгорания более чем на 200 К. Рассмотрена экономическая целесообразность использования смесей. По результатам исследований сделан вывод, что для производства нанооксида алюминия лучше всего использовать смесь $\text{Al} + \text{O}_2 + \text{Ar}$.

Ключевые слова: наноксид, металлогазовая смесь, опытно-промышленная установка, форкамера, охлаждение, конденсированная фаза, доля алюминия в газообразном состоянии, соотношение расхода компонентов.

D.A. Bolkhovskikh, V.I. Malinin, R.V. Bulbovich

Perm National Research Polytechnic University

INVESTIGATION OF COMPOUNDS OF METALGAS MIXTURES FOR OBTAINING OF NANODISPERSE OXIDE OF ALUMINIUM

It is considered the processes occurring in a prechamber of experimental-industrial plant for burning of gas suspension of metallic powders and synthesis of disperse oxides. The most significant factors to obtain the nanooxide of aluminum in experimental-industrial plant, such as temperature of primary combustion products, a fraction of the condensed and gaseous phase of the aluminum, formed in a prechamber are described. Take into account of these factors, the components promoting improvement of process of synthesis and quality of nanooxide of aluminum have been chosen. It was investigated burning metalgas mixtures containing inert components in relation to aluminum: $\text{Al} + \text{O}_2 + \text{H}_2$, $\text{Al} + \text{O}_2 + \text{He}$, $\text{Al} + \text{O}_2 + \text{Ar}$. For comparison it is considered applied earlier mixture of

Al + air. Thermodynamic calculations have been carried out, the structure of combustion products of studied metalgas mixtures and the content of the condensed phase in a mixture have been determined. The curves of dependence of a total share of the condensed phase, temperatures and fraction of aluminum in the condensed phase on excess oxidant ratio have been constructed. Comparison of the mixtures containing inert components, with mixture of Al + air has been carried out. It has been revealed the reduction of mass fraction of the condensed phase in 2–3 times, fraction of aluminum in the condensed phase in 3–6 times and temperatures of combustion products more than by 200 K. Economic integrity of use of mixtures has been considered. The conclusion on the base of investigation results was made: for production of nanooxide of aluminium the best substance is Al + O₂ + Ar mixture.

Keywords: nanooxide, metalgas mixture, experimental-industrial plant, prechamber, cooling, condensed phase, fraction of aluminum in a gaseous state, ratio of components consumption.

Практический и теоретический интерес представляет исследование возможности получения нанодисперсных оксидов методом сжигания газовзвесей порошков металлов. Суть предлагаемого метода заключается в следующем. Порошок металла сжигается в условиях, при которых максимальная доля продуктов сгорания состоит из паров металла или его газообразных оксидов. Затем газообразные продукты первичного горения быстро охлаждаются в окислительной среде. При этом частицы образующегося конденсата не успевают вырасти, и оксид металла получается в нанодисперсном виде. Легко показать, что в равновесном состоянии доля нанодисперсного оксида примерно равна доле металла q_{vap} , преобразующегося в газообразную фазу в процессе первичного горения, поэтому с целью увеличения доли нанодисперсного оксида необходимо создать такие условия горения, чтобы максимально увеличить значение q_{vap} . В идеальном случае $q_{vap} = 1$ [1].

Данная работа посвящена исследованию процессов, протекающих в форкамере (ФК) опытно-промышленной установки сжигания газовзвесей металлических порошков и синтеза дисперсных оксидов [2–5]. Установка состоит из системы подачи, ФК, камеры сгорания, устройства отбора дисперсных продуктов. Устройство опытно-промышленной установки подобно экспериментальной установке, описанной в работах [2, 6–9]. Форкамера предназначена для смешения порошка с первичным воздухом, воспламенения и первичного горения образованной металлогазовой смеси. Камера сгорания предназначена для сжигания вторичной смеси и синтеза оксида с заданными свойствами.

В работах [2, 6–9] представлены исследования по получению оксида алюминия в экспериментальной установке с применением в ФК смеси Al + воздух. Нами проведен анализ эффективности использования данной смеси. Выявлены следующие недостатки применения вышеуказанной смеси в форкамере:

- высокая температура продуктов первичного горения (> 2500 K);
- образование большой доли конденсированной фазы (> 15 %);
- недостаточное количество газообразной фазы алюминия попадает в камеру сгорания ($q_{vap} < 80$ %).

Следствием перечисленных недостатков является то, что большой тепловой поток попадает на стенки и возникают трудности с их охлаждением. Также происходит налипание на стенки большого количества конденсированной фазы, из-за этого усложняется процесс охлаждения и уменьшается проходное сечение ФК. Увеличивается количество алюминия, не преобразованного в газообразную фазу, т.е. доля алюминия, находящегося в K -фазе в форкамере $K_{air,f}$ ($K_{air,f} = 1 - q_{vap}$). Она включает в себя долю алюминия, преобразованного в конечный продукт, и долю алюминия, не вступившего в реакцию окисления.

В экспериментальной установке проблема охлаждения стенок форкамеры решалась с помощью использования абляционных теплозащитных материалов (полиметилметакрилат). Основной недостаток данного способа заключается в том, что при длительном высокотемпературном тепловом воздействии происходит полное разрушение полиметилметакрилата. Из-за этого установку необходимо останавливать для размещения нового слоя вышеуказанного материала.

В работах [2–5] предлагалось обеспечивать непрерывное функционирование ФК опытно-промышленной установки за счет процесса транспирационного охлаждения пористой оболочки камеры такими охладителями, как вода, воздух и керосин. Вода и воздух для алюминия являются окислителями. В литературе [10] для охлаждения стенок камеры сгорания рекомендовано применять окислитель, если коэффициент избытка окислителя $\alpha > 1$, и горючее, если $\alpha < 1$. В форкамере установки синтеза дисперсных оксидов α всегда меньше и даже много меньше единицы [2], поэтому для охлаждения необходимо использовать горючие или химически нейтральные по отношению к алюминию компоненты. Стоит отметить, что H_2O и воздух, вместо того чтобы охлаждать стенки форкамеры, будут их нагревать, так как эти компоненты вступят в экзотермическую реакцию с алюминием и продуктами его первичного горения (газообразный алюминий и субоксиды алюминия AlO , Al_2O). Керосин не является окислителем и его можно использовать, но продукты разложения керосина загрязнят конечный продукт (нанооксид алюминия). В работе [11] в качестве охладителя при транс-

пирационном охлаждении стенок предлагается использовать аргон, благодаря которому обеспечивается наименьшее количество примесей в целевом продукте, непрерывная работа установки и снижение суммарной доли конденсированной фазы. Однако в работе [11] не рассмотрены такие характеристики, как доля алюминия находящегося в K -фазе в ФК ($K_{air,f}$) и экономические показатели эффективности. Также нет сравнения с другими смесями и конкретно со смесью $Al + \text{воздух}$.

Учитывая вышеуказанное, делаем вывод о том, что охладителями в ФК могут быть инертные и горючие вещества. Они не должны разлагаться под воздействием высокой температуры и взаимодействовать с алюминием и продуктами его первичного горения. В данной работе в качестве охладителей рассмотрим водород, гелий и аргон.

На основании вышеописанного формулируем задачи настоящего исследования:

- снижение температуры протекания реакции;
- уменьшение доли конденсированной фазы (K -фаза);
- уменьшение доли алюминия, преобразованного в оксид алюминия.

Для решения поставленных задач рассмотрим следующие металлוגазовые смеси: $Al + O_2 + H_2$; $Al + O_2 + He$; $Al + O_2 + Ar$ – для сравнения с предыдущими – $Al + \text{воздух}$.

Давление в ФК принято такое же, как и в работе [2] для опытно-промышленной установки, $p = 2,5$ атм.

В данной работе применяется многоцелевой программный комплекс АСТРА.4¹, предназначенный для определения характеристик равновесия, фазового и химического состава произвольных систем. Для описания самой системы как материального объекта необходимо знать лишь содержание образующих ее химических элементов.

Проводим термодинамический расчет, определяем характеристики равновесия исследуемых металлугазовых смесей и содержание компонентов смеси.

С помощью математических формул определяются:

- коэффициент избытка окислителя

¹ Трусов Б.Г. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах (АСТРА.4). Препринт МГТУ, 1991. 30 с.

$$\alpha = \frac{G_{\text{ок}}}{G_{\text{Al}} L_0},$$

где $G_{\text{ок}}$ – расход окислителя; G_{Al} – расход алюминия; L_0 – стехиометрический коэффициент окислителя;

– доля алюминия в K -фазе в форкамере

$$K_{\text{air},f} = \left(\frac{2M_{\text{Al}}}{M_{\text{Al}_2\text{O}_3}} Z_{\text{Al}_2\text{O}_3} + Z_{\text{Al}} \right) \frac{G_{\Sigma}}{G_{\text{Al}}}.$$

При расчете $K_{\text{air},f}$ воздуха учитывается нитрид алюминия:

$$K_{\text{air},f} = \left(\frac{2M_{\text{Al}}}{M_{\text{Al}_2\text{O}_3}} Z_{\text{Al}_2\text{O}_3} + Z_{\text{Al}} + Z_{\text{AlN}} \frac{M_{\text{Al}}}{M_{\text{AlN}}} \right) \frac{G_{\Sigma}}{G_{\text{Al}}},$$

где M_{Al} – молекулярная масса алюминия; M_{AlN} – молекулярная масса AlN; $M_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ – молекулярная масса Al_2O_3 ; $Z_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ – массовая доля конденсированной фазы Al_2O_3 ; Z_{Al} – массовая доля конденсированной фазы алюминия; Z_{AlN} – массовая доля конденсированной фазы AlN; G_{Σ} – суммарный расход компонентов; G_{Al} – расход алюминия.

В расчетах изменяется отношение расхода окислителя и охлаждающих компонентов к алюминию ($G_{\text{ок}}/G_{\text{Al}}$, $G_{\text{комп}}/G_{\text{Al}}$). На основе термодинамических и математических расчетов построены графики зависимостей суммарной массовой доли конденсированной фазы (Z_{Σ}), температуры (T) и доли алюминия в K -фазе в ФК ($K_{\text{air},f}$) от коэффициента избытка окислителя (α), представленные на рис. 1–4. Зависимости на рис. 1 представлены для случая, когда охладитель – H_2 , окислитель – O_2 , соответственно на рис. 2 – $\text{He} - \text{O}_2$, рис. 3 – $\text{Ar} - \text{O}_2$, рис. 4 – воздух – воздух.

Проанализировав кривые зависимости Z_{Σ} , T и $K_{\text{air},f}$ от α (рис. 1–4), стоит отметить, что у каждой из кривых существует минимум. Точки, в которых Z_{Σ} минимальное, имеют соотношение расхода компонентов смеси, при котором меньше веществ налипают на стенки ФК и она лучше охлаждается. Те точки, в которых значение $K_{\text{air},f}$ минимальное, имеют соотношение расхода компонентов смеси, при котором максимальное количество газообразного алюминия поступит в камеру сгорания для дальнейшего синтеза.

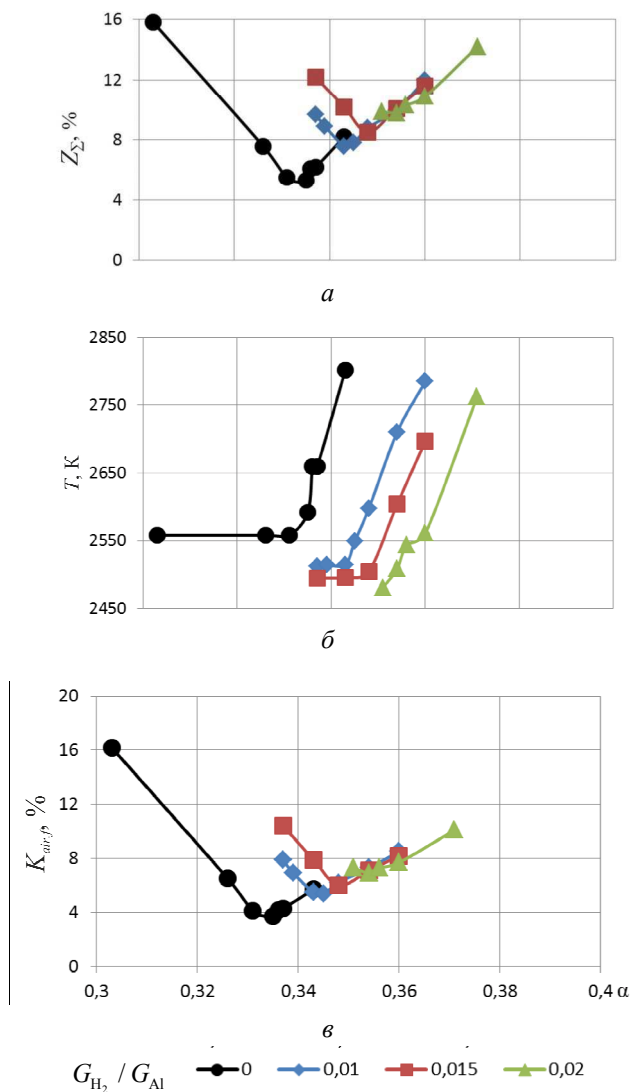


Рис. 1. Зависимости: *a* – суммарной доли конденсированной фазы; *б* – температуры; *в* – доли алюминия в *K*-фазе от коэффициента избытка окислителя при разном отношении расходов водорода и алюминия

Анализ кривых зависимости T от α показывает, что в большинстве случаев точки, обладающие приемлемой температурой для формкамеры, совпадают с точками, в которых $Z_{\Sigma} - \min$ и $K_{air,f} - \min$. Значит, можно сделать вывод о том, что точки, в которых Z_{Σ} , T и $K_{air,f} - \min$, обладают оптимальным соотношением расхода компонентов металлогазовой смеси.

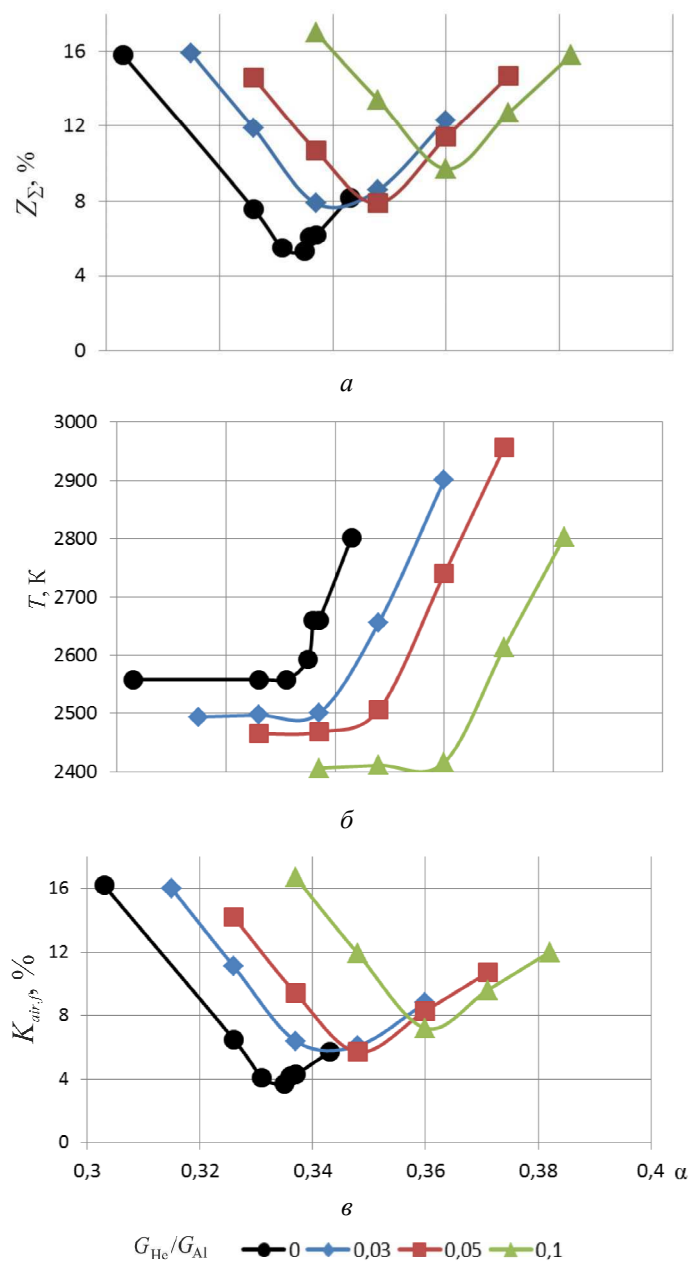


Рис. 2. Зависимости: *a* – суммарной доли конденсированной фазы; *б* – температуры; *в* – доли алюминия в *K*-фазе от коэффициента избытка окислителя при разном отношении расходов гелия и алюминия

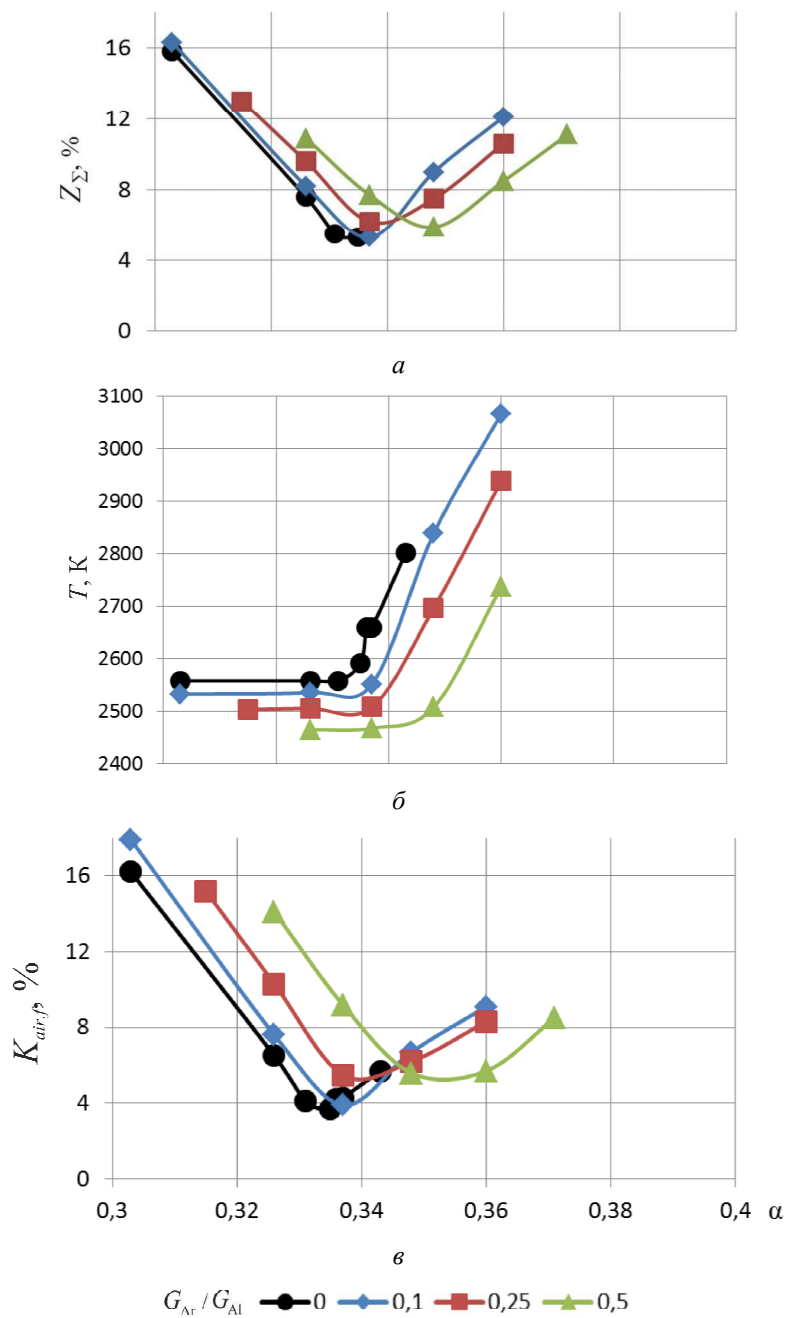


Рис. 3. Зависимости: a – суммарной доли конденсированной фазы; b – температуры; c – доли алюминия в K -фазе от коэффициента избытка окислителя при разном отношении расходов аргона и алюминия

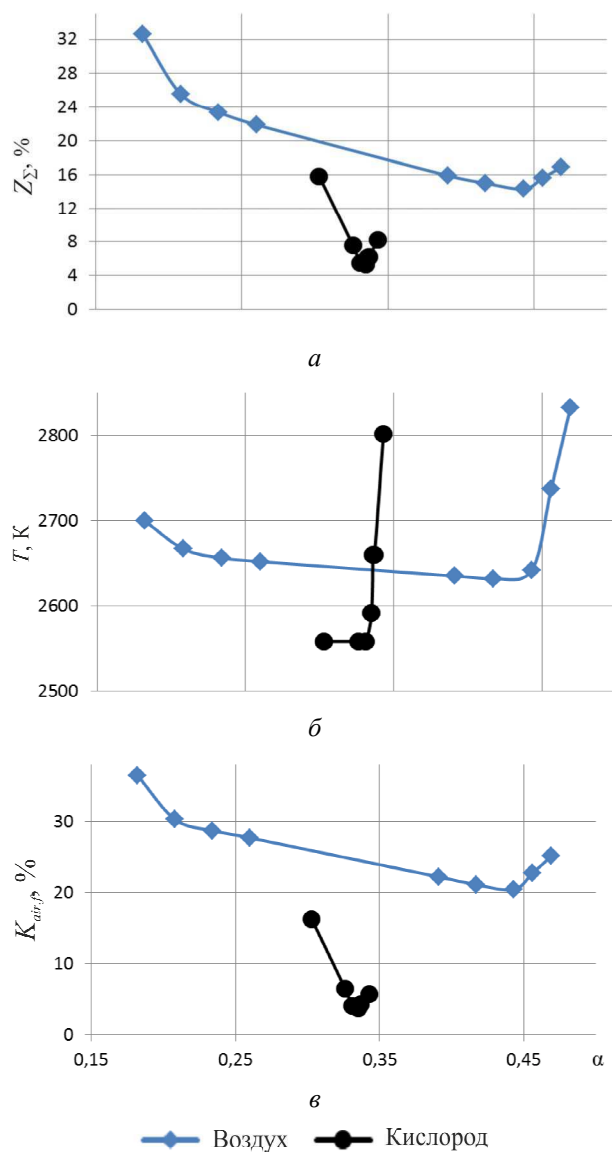


Рис. 4. Зависимости: *a* – суммарной доли конденсированной фазы; *б* – температуры; *в* – доли алюминия в *K*-фазе от коэффициента избытка окислителя (смесь Al + воздух, для сравнения смесь Al + O₂)

Результаты исследования металлогазовых смесей приведены в табл. 1, которая отображает основные характеристики металлогазовых смесей, наиболее подходящих для получения нанодисперсного оксида алюминия в опытно-промышленной установке. Расходы охлаждающих

компонентов выбраны оценочно, из условия минимально необходимого их количества для транспирационного охлаждения стенки форкамеры.

Таблица 1
Параметры металлогазовых смесей

Компонент	$\alpha_{\text{опт}}$	$G_{\text{комп}}/G_{\text{Al}}$	$Z_{\Sigma}, \%$	T, K	$K_{\text{air},f}, \%$
Водород	0,34–0,35	0,01–0,015	7,5–8,5	2500	5–6
Гелий	0,34–0,35	0,03–0,05	7,5–8	2450–2550	5,5–6
Аргон	0,34–0,35	0,25–0,5	6–7	2450–2500	5–5,5
Воздух	0,40–0,50	1,5–1,9	14–20	2650–2900	20–30

Сравнивая полученные результаты, отображенные в табл. 1, с основными характеристиками смеси Al + воздух, стоит отметить снижение суммарной массовой доли конденсированной фазы в 2–3 раза, доли алюминия в конденсированной фазе в 3–6 раз и температуры продуктов сгорания более чем на 200 К.

Исследуемые компоненты не токсичны, но некоторые из них взрывопожароопасны. Гелий и аргон безопасны, а водород опасен и предполагает соблюдение повышенных мер безопасности (табл. 2).

Таблица 2
Экономическая эффективность и взрывопожаробезопасность охладителей

Компонент	Цена 1 кг компонента, руб.	Расход компонента, кг/с	Цена расхода компонента, руб/с	Взрывопожаробезопасность
Водород	3300	0,001–0,0015	3,3–5	Да
Гелий	3000	0,003–0,005	9,0–15,0	Нет
Аргон	70	0,025–0,050	1,75–3,5	Нет

Некоторые компоненты нецелесообразно использовать с экономической точки зрения, поэтому надо учесть стоимость и расход компонентов. Стоимость 1 кг компонента рассчитана исходя из цены заправки баллона технического газа ($V = 40$ л, $p = 150$ атм), установленной компаниями – поставщиками технических газов в г. Перми. Расход компонентов и соответствующая ему цена рассчитаны относительно расхода алюминия в опытно-промышленной установке, который равен 0,1 кг/с. Данные показатели отображены в табл. 2. Стоит отметить, что

отработанный гелий и аргон можно улавливать из продуктов сгорания и вторично направлять в ФК. Поскольку аргон тяжелый газ, то его уловить легче, чем гелий, и КПД его улавливания может быть значительно выше. Если КПД его улавливания 90 %, то лишь 10 % аргона потребуется добавить к уловленному и направить в форкамеру. В этом случае цена расхода аргона в ФК будет составлять 17,5–35 коп/с.

Учитывая вышеизложенное, рекомендуем для получения нанooksида алюминия в форкамере опытно-промышленной установки применять металлогазовую смесь $Al + O_2 + Ar$. Использование данной смеси позволяет решить поставленные в работе задачи:

- снижения температуры продуктов сгорания;
- уменьшения суммарной доли конденсированной фазы;
- увеличения количества газообразного алюминия, поступающего в камеру сгорания для дальнейшего синтеза;
- решения проблемы охлаждения стенок ФК.

Дополнительно подчеркнем экономическую эффективность применения данной смеси, экологическую и взрывопожарную безопасность. Также выделим то, что использование смеси $Al + O_2 + Ar$ способствует повышению чистоты конечного продукта.

Библиографический список

1. Термодинамический анализ возможности получения ультрадисперсных оксидов Y, Ce и Sr методом сжигания аэрозвесей порошков металлов / В.Н. Анциферов, В.И. Малинин, С.Е. Порозова, А.Ю. Крюков // Аэрокосмическая техника и высокие технологии: тез. докл. VII Всерос. науч.-техн. конф. – 2004 (12–14 апреля 2004 г.) / под ред. Р.В. Бульбовича и А.Н. Аношкина; Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2004. – С. 22.

2. Малинин В.И. Внутрикамерные процессы в установках на порошкообразных металлических горючих. – Екатеринбург; Пермь: Изд-во УрО РАН, 2006.

3. Крюков А.Ю. Адаптация внутрикамерных процессов и элементов конструкции прямоточных воздушно-реактивных двигателей на порошковом горючем для конверсионного использования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2004. – 18 с.

4. Крюков А.Ю., Малинин В.И., Ярушин С.Г. Оценка возможности промышленного производства высокодисперсных порошков мето-

дом сжигания газовзвесей порошковых материалов // Ракетные двигатели и проблемы освоения космического пространства (Космический вызов XXI века). Т. 1 / под ред. И.Г. Ассовского, О.Д. Хайдена. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2005. – С. 433–443.

5. Крюков А.Ю. Адаптация внутрикамерных процессов и элементов конструкции энергоустановок на порошковом горючем к технологиям получения ультра- и нанодисперсных материалов: моногр. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 236 с.

6. Реактор горения порошков металлов в активном газе / В.И. Малинин, Е.И. Коломин, И.С. Антипин, А.А. Обросов // Научно-технические разработки в области СВС: справ. / под общ. ред. акад. А.Г. Мержанова; Ин-т структурной макрокинетики РАН. – Черноголовка, 1999. – С. 184–185.

7. Малинин В.И., Коломин Е.И., Антипин И.С. Воспламенение и горение аэровзвеси алюминия в реакторе высокотемпературного синтеза порошкообразного оксида алюминия // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т. 38, № 5. – С. 41–51.

8. Малинин В.И. Получение оксида с заданными свойствами методом сжигания аэровзвеси порошка алюминия: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2003. – 16 с.

9. Коломин Е.И., Малинин В.И., Обросов А.А. Влияние условий смешения и горения аэровзвеси алюминия на дисперсный состав продуктов сгорания // Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем: сб. материалов междунар. shk.-семинара / Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 1995. – С. 136–141.

10. Алемасов В.Е., Дрегаллин А.Ф., Тишин А.П. Теория ракетных двигателей: учебник для студентов высших технических учебных заведений / под ред. В.П. Глушко. – М.: Машиностроение, 1989. – 268 с.

11. Русинов Г.В., Земерев Е.С. Устройство форкамеры опытно-промышленной установки синтеза наноультрадисперсного оксида алюминия // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2011: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. (15–16 апреля 2011 г., г. Пермь). – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – С. 33–34.

References

1. Antsiferov V.N., Malinin V.I., Porozova S.E., Kryukov A.Yu. *Termodinamicheskiy analiz vozmozhnosti polucheniya ultradispersnykh oksidov Y, Ce i Sr metodom szhiganiya aerovzvesey poroshkov metallov* [Thermodynamic analysis of possibility to obtain ultradisperse oxides Y, Ce and Sr by method of burning of aero suspensions of powders of metals]. *Aerokosmicheskaya tekhnika i vysokie tekhnologii. Tezisy докладов VII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Perm: Permskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2004, p. 22.
2. Malinin V.I. *Vnutrikamernye protsessy v ustanovkakh na poroshkoobraznykh metallicheskiykh goryuchikh* [Intrachamber processes in plants with metallic powder fuel]. Ekaterinburg; Perm: Uralskoe otделение Rossiyskoy akademii nauk, 2006.
3. Kryukov A.Yu. *Adaptatsiya vnutrikamernykh protsessov i elementov konstruksii pryamotochnykh vozdušno-reaktivnykh dvigateley na poroshkovom goryuchem dlya konversionnogo ispolzovaniya* [Adaptation of intrachamber processes and design elements of ramjets with powder fuel for conversion application]. Perm: Permskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2004, 18 p.
4. Kryukov A.Yu., Malinin V.I., Yarushin S.G. *Otsenka vozmozhnosti promyshlennogo proizvodstva vysokodispersnykh poroshkov metodom szhiganiya gazovzvesey poroshkovykh materialov* [Assessment of possibility of industrial production of high-disperse powders by method of gas suspension burning of powder materials]. *Raketnye dvigateli i problemy osvoeniya kosmicheskogo prostranstva*. Moscow: TORUS PRESS, 2005, vol. 1, pp. 433–443.
5. Kryukov A.Yu. *Adaptatsiya vnutrikamernykh protsessov i elementov konstruksii energoustanovok na poroshkovom goryuchem k tekhnologiyam polucheniya ultra- i nanodispersnykh materialov* [Adaptation of intrachamber processes and design elements of power plants with powder fuel to production technologies of ultra- and nanodisperse materials]. Perm: Permskiy natsionalnyy issledovatel'skiy politekhnicheskii universitet, 2011, 236 p.
6. Merzhanov A.G. *Nauchno-tekhnicheskie razrabotki v oblasti samorasprostranyayushchegosya vysokotemperaturnogo sinteza. Spravochnik* [Scientific and technical development in field of self-extending high-temperature synthesis. Handbook]. Chernogolovka, 1999, pp. 184–185.

7. Malinin V.I., Kolomin E.I., Antipin I.S. *Vosplamenenie i gorenie aerovzvesi alyuminiya v reaktore vysokotemperaturnogo sinteza poroshkoo-braznogo oksida alyuminiya* [Ignition and burning of an aero suspension of aluminum in the reactor of high-temperature synthesis of powdery oxide of aluminum]. *Fizika goreniya i vzryva*, 2002, vol. 38, no. 5, pp. 41–51.

8. Malinin V.I. *Poluchenie oksida s zadannymi svoystvami metodom szhiganiya aerovzvesi poroshka alyuminiya* [Obtaining oxide with the specified properties by method of burning of an aero suspension of aluminum powder]. Perm: Permskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2003, 16 p.

9. Kolomin E.I., Malinin V.I., Obrosoy A.A. *Vliyaniye usloviy smesheniya i goreniya aerovzvesi alyuminiya na dispersnyy sostav produktov sgoraniya* [Influence of conditions of mixing and burning of an aero suspension of aluminum on disperse structure of combustion products]. *Vnutrikamernyye protsessy, gorenie i gazovaya dinamika dispersnykh sistem. Mezhdunarodnaya shkola-seminar*. St. Petersburg: Baltiyskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 1995, pp. 136–141.

10. Alemasov V.E., Dregalin A.F., Tishin A.P. *Teoriya raketnykh dvigateley* [Theory of rocket engines]. Ed. V.P. Glushko. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 268 p.

11. Rusinov G.V., Zemerev E.S. *Ustroystvo forkamery opytno-promyshlennoy ustanovki sinteza nanoultradispersnogo oksida alyuminiya* [Apparatus of prechamber of experimental-industrial plant for synthesis of nanoultradisperse aluminum oxide]. *Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii – 2011*. Perm: Permskiy natsionalnyy issledovatel'skiy politekhnicheskiy universitet, 2011, pp. 33–34.

Об авторах

Болховских Денис Александрович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: dentka06@mail.ru).

Малинин Владимир Игнатьевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: malininvi@mail.ru).

Бульбович Роман Васильевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника

и энергетические установки», декан аэрокосмического факультета ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: dekan_akf@pstu.ru).

About the authors

Bolkhovskikh Denis Aleksandrovich (Perm, Russian Federation) – postgraduate student, Department of Rocket and Space Technology, Generating Units, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: dentka06@mail.ru).

Malinin Vladimir Ignatevich (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Department of Rocket and Space Technology, Generating Units, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: malininvi@mail.ru).

Bulbovich Roman Vasilyevich (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Rocket and Space Technology, Generating Units, Dean of Aerospace Faculty, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: dekan_akf@pstu.ru).

Получено 3.09.2012