

УДК 544.452

ГОРЕНИЕ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ В АКТИВНЫХ СРЕДАХ

В.А.Бабук

Балтийский государственный технический университет «Военмех»,
190005, Санкт-Петербург, 1-Красноармейская ул. д. 1, Россия

Аннотация

В настоящей статье приводятся результаты исследования процесса горения крупной фракции частиц алюминия (диаметр частиц более 30-40 мкм) в среде продуктов сгорания твердого ракетного топлива. Исследование включало разработку методик экспериментального исследования, получение экспериментальных данных о процессе горения, создание общей физической картины изучаемого процесса, разработку математической модели, обеспечивающей определение характеристик кинетики сгорания и конденсированных продуктов сгорания. Методики экспериментального исследования обеспечивают получение информации как количественного (данные о дисперсности и химическом составе конденсированных продуктов, температура горящих частиц), так и качественного характера (данные визуализации горящих частиц и анализа шлифов отобранных частиц). Физическая картина рассматриваемого процесса горения включает описание совокупности физико-химических превращений, в которых участвуют как конденсированные, так и газообразные продукты. Численный анализ модели позволил сделать вывод о достаточно высоком качестве моделирования. Результаты исследования могут быть использованы для решения ряда практических задач при создании энергетических установок на твердом топливе. К их числу относятся задачи прогнозирования потерь удельного импульса тяги, шлакообразования в камере сгорания и воздействия продуктов сгорания на элементы конструкции.

Ключевые слова: горение, алюминий, топливо, математическая модель, энергия

Введение

Описание горения дисперсного металлического горючего в газовой среде является одной из задач *общей теории горения*. Практическая значимость решения данной задачи связана с широким использованием подобного горючего в разнообразных высокоэнергетических материалах (топливах, взрывчатых веществах, воспламенительных и пиротехнических составах). Учитывая энергетический потенциал и экономические соображения, в качестве металлического горючего, как правило, используется алюминий. Возникает задача определения скорости горения (времени сгорания), а также свойств конденсированных продуктов сгорания (КПС).

В настоящей работе излагаются результаты исследования, выполненного в БГТУ «Военмех», целью которого являлось изучение горения частиц алюминия в среде газообразных продуктов сгорания твердого ракетного топлива (ТРТ). Актуальность подобной работы связана с неполным и подчас противоречивым характером результатов ранее выполненных работ [1-13 и др.].

Исследование включало разработку методик экспериментального исследования, получение и анализ экспериментальных данных, создание общей физической картины процесса горения, математическое моделирование этого процесса.

Методики экспериментального исследования

Разработанные методики включали [14-15]:

1. Обор конденсированных продуктов на различных расстояниях от поверхности горящего топлива с их последующим всесторонним анализом.

2. Визуализацию горящих частиц при использовании скоростной киносъемки.

3. Измерение температуры с помощью методов пирометрии.

Отличительными особенностями созданного экспериментального комплекса являлось следующее:

- возможность анализа частиц с размерами от десятков нанометров до сотен микрометров;

- высокая массовая представительность анализа (осуществляется отбор не менее 95% по массе всех конденсированных продуктов,

поставляемых с поверхности горящего топлива);

- возможность получения информации как количественного, так и качественного характера.

С поверхности горящего топлива конденсированные продукты поставляются в газовую фазу в составе двух фракций: агломератов и высокодисперсного оксида (ВДОК) [16]. Если агломераты являются продуктом слияния конденсированных веществ в поверхностном слое горящего топлива, то частицы ВДОК – продукт сгорания металла в поверхностном слое топлива и в надповерхностной зоне газовой фазы. Было принято решение проводить анализ частиц отдельно для указанных фракций.

Получаемую количественную информацию можно определить следующим образом:

$f(D)$ – массовая функция плотности распределения агломератов по размерам;

$f(d)$ – массовая функция плотности распределения частиц ВДОК по размерам;

D_{43} – среднемассовый размер агломератов;

d_{43} – среднемассовый размер частиц ВДОК;

Z_m – доля активного металла в составе агломератов к его исходному количеству;

η – доля оксида в составе агломератов;

T – температура поверхности агломерата или зоны его горения.

В качестве информации качественного характера выступают данные визуализации горящих частиц и шлифов отобранных частиц.

Результаты экспериментального исследования

Дадим краткую характеристику полученного экспериментального материала.

С поверхности горящего топлива частицы крупной фракции (агломераты) поставляются горящими в газовой фазе. Отчетливо фиксируется поток газообразных продуктов, оттекающий от поверхности металла свободной от окиси (рис. 1). Взаимодействие этого потока с несущей газовой фазой приводит к формированию своеобразного «шлейфа» (рис. 1), параметры которого зависят от условий обтекания частицы.

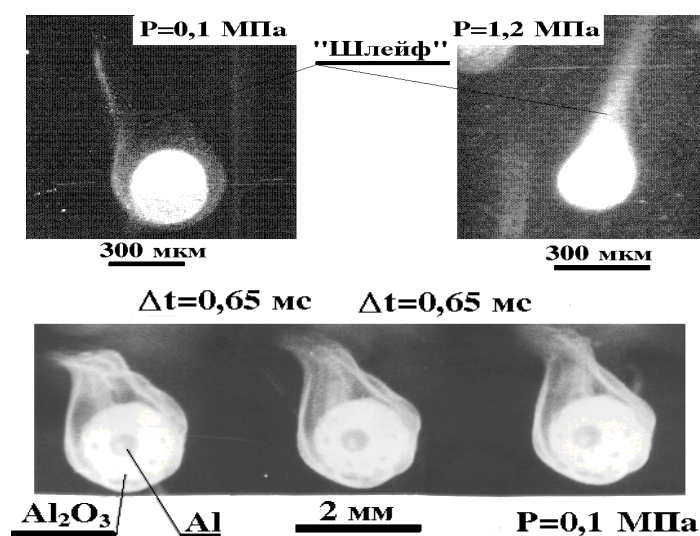


Рис. 1 – Результаты визуализации агломератов в газовой фазе

В «шлейфе» происходит образование частиц ВДОК, которые поставляются в несущую газовую фазу. Оптическая плотность «шлейфа» зависит от давления. Если при давлениях близких к атмосферному он является практически прозрачным, то при более высоких давлениях он экранирует поверхность частицы (рис. 1). Температура частицы несколько

ниже температуры равновесного испарения алюминия при данном давлении.

Агломераты состоят из капель металла и оксида и могут иметь газовые включения. Их строение близко к равновесному, при котором поверхностная энергия на границах раздела фаз минимальна (рис. 2). Частицы ВДОК являются сплошными и имеют правильную сферическую форму (рис. 3) [17].

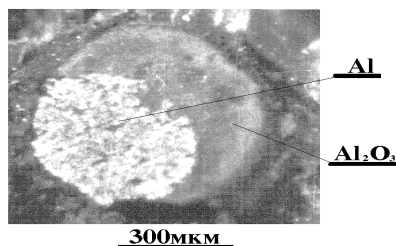


Рис. 2 – Шлиф отобранного агломерата

В процессе движения конденсированных продуктов имеет место изменение количества активного металла и оксида в составе агломератов, их структуры, а также дисперсности как агломератов, частиц ВДОК.

Для описания процесса горения был получен набор данных для целого ряда ситуаций, отличающихся начальными свойствами конденсированных продуктов, а также свойствами газовой фазы [15].

На рис. 4 приведены зависимости, характеризующие этот процесс, для одного из составов ТРТ.

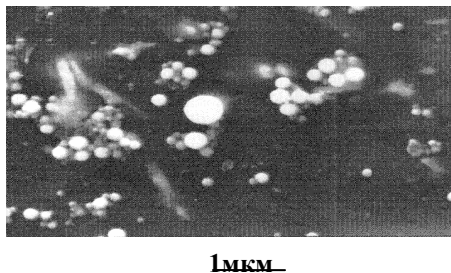


Рис. 3 – Отобранные частицы ВДОК

Было установлено, что в определенных условиях реализуется своеобразное явление уноса окиси агломератов, заключающееся в уменьшении количества оксида в составе агломератов в процессе их движения в потоке.

Общая физическая картина процесса горения

Полученные экспериментальные данные позволили сформулировать общую физическую картину процесса горения совокупности частиц крупной фракции (агломератов) при их движении в среде газообразных продуктов сгорания топлива. Этот процесс получил название эволюции конденсированных продуктов сгорания топлива в газовой фазе [15]. Он включает в себя целый ряд физико-химических превращений, в которых участвуют как конденсированные, так и газообразные

продукты. Можно определить следующий ряд явлений.

1. Агломераты состоят из металла и оксида, которые находятся в жидком состоянии, и могут иметь газовые включения. Поверхностные силы обеспечивают строение, соответствующее равновесному состоянию.

2. Между конденсированными металлом и оксидом возможно химическое взаимодействие с образованием газообразных продуктов. Эти продукты формируют газовые полости. В определенных условиях данные полости достигают внешней поверхности агломерата, и происходит вынос газообразных продуктов в окружающую среду, т.е. реализуется явление уноса окиси из агломерата.

3. Тепловое состояние агломерата таково, что горение металла осуществляется в газофазном режиме. В зоне горения посредством реализации явления конденсации происходит «рождение» частиц ВДОК.

4. Структура области горения в газовой фазе зависит от характера взаимодействия потока, оттекающего от поверхности агломерата, и потока, обтекающего агломерат. В формирующемся «шлейфе» продуктов сгорания имеет место эволюция частиц ВДОК: на этих частицах продолжается процесс конденсации и происходит их коагуляция.

5. Частицы ВДОК несущей газовой фазы имеют возможность осаждаться на агломерате.

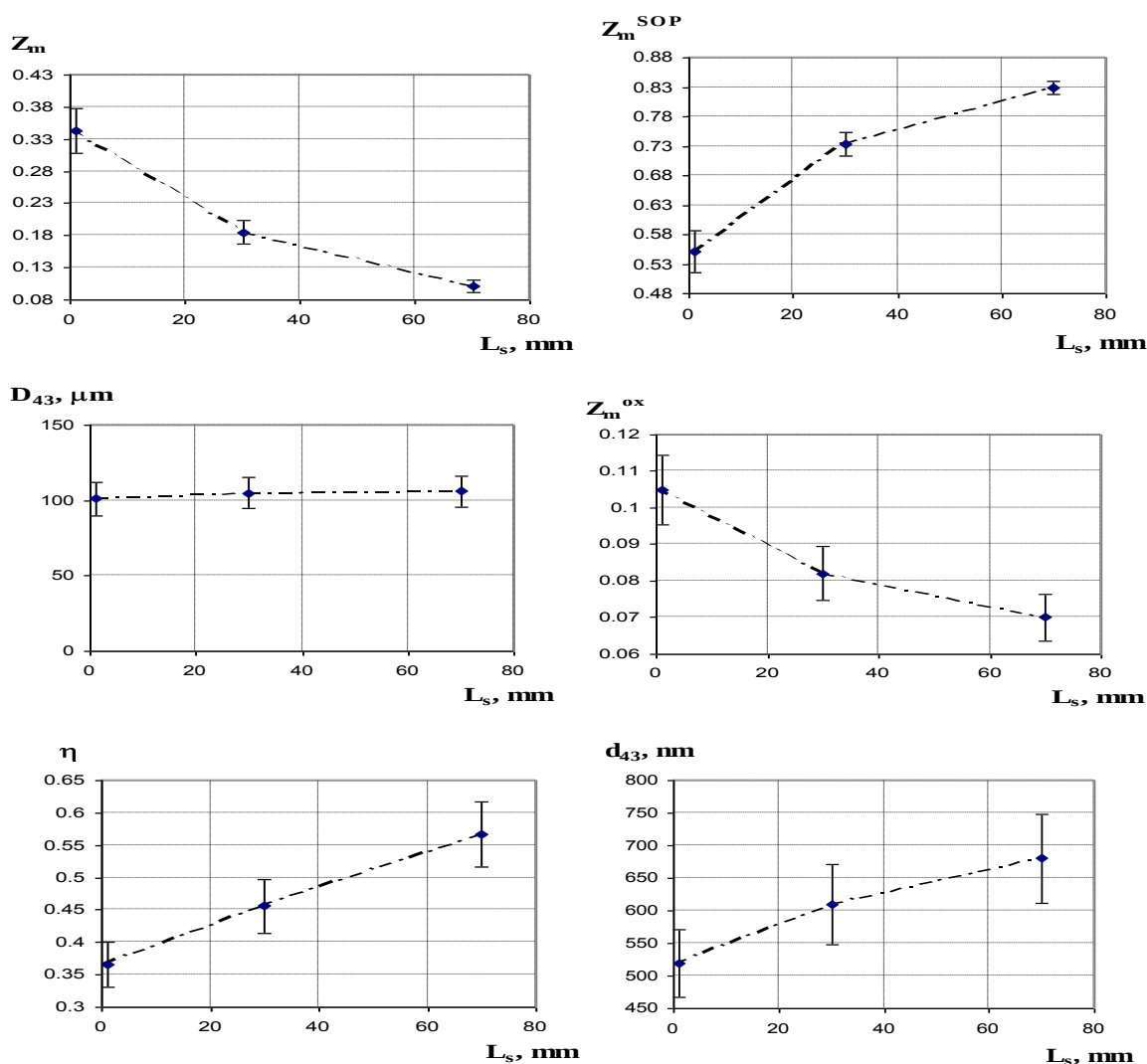
6. Положение агломерата в несущем потоке и скорость его движения зависят от его внутреннего строения и химического состава.

7. Следствием реализации процесса эволюции является изменение химического состава и температуры несущего потока.

Совершенно естественно, что данные явления взаимосвязаны и оказывают влияние друг на друга.

Математическое моделирование

Моделирование рассматриваемого процесса базируется на модели эволюции одиночного агломерата. Использование этой модели для совокупности частиц обеспечивает описание эволюции всего потока продуктов сгорания.



L_s – расстояние от поверхности горящего топлива в условиях одномерного потока;
 Z_m^{SOP} – доля исходного металлического горючего, формирующего ВДОК;
 Z_m^{ox} – доля исходного металлического горючего, формирующего оксид агломератов

Рис. 4 – Зависимости, описывающие изменение характеристик потока конденсированных продуктов

При создании модели эволюции одиночного агломерата используется подход, в соответствии которым осуществляется декомпозиция сложного процесса на отдельные явления, разрабатываются модели этих явлений (частные модели) и в дальнейшем проводится синтез частных моделей.

Рассмотрим разработанные частные модели.

Горение металла агломерата [18-19]

Разработанная модель базируется на следующих положениях.

1. Влияние обдува внешним газовым потоком учитывается в приближении «приведенной пленки» [20].

2. Испарение металла происходит только с поверхности свободной от окиси. Этот процесс является равновесным.

3. На поверхности контакта между металлом и оксидом агломерата (поверхность G рис. 5) осуществляется химическое взаимодействие, следствием чего является появление источника потребления тепла.

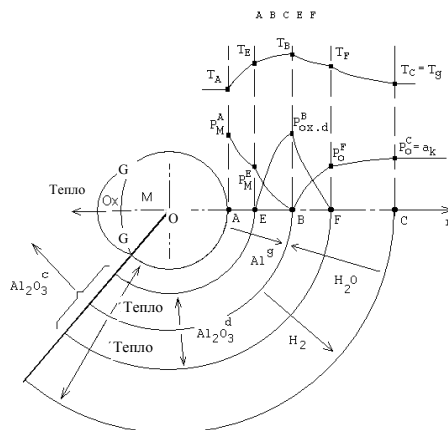


Рис. 5 – Схема, иллюстрирующая процесс горения металла агломерата

4. Скорость химических реакций намного превышает скорость диффузии компонентов. В результате этого химические реакции, протекающие в газовой фазе, являются равновесными. Учитывается взаимодействие паров металла и окислителя с образованием конденсированного оксида и его диссоциация. Зона горения (EF, рис. 5) в общем случае имеет конечные размеры.

5. Окисляющим компонентом внешней среды являются пары воды. (В продуктах сгорания топлива H_2O выполняет роль основного окисляющего компонента, поскольку содержание других активных веществ, включая углекислый газ, сравнительно мало.)

6. Продукты испарения оксида алюминия представляют собой псевдовещество - псевдопар $Al_2O_3^d$, обладающий дуализмом свойств:

- с одной стороны, испарение 1 молекулы $Al_2O_3^c$ происходит с образованием нескольких молекул газообразных веществ (то есть, псевдопар - это смесь различных веществ).
- с другой стороны, продукты испарения одной молекулы неделимы и составляют единое целое, то есть компоненты, образующие смесь продуктов диссоциации, лишены индивидуальности и существуют только в составе псевдовещества $Al_2O_3^d$.

7. Коэффициенты переноса в характерных зонах определяются осредненными значениями параметров состава и температуры.

8. Высокодисперсный оксид не оказывает влияния на диффузию газообразных веществ.

9. Бинарные коэффициенты диффузии всех газообразных компонентов равны в каж-

дой характерной зоне, температурная диффузия отсутствует.

10. Наличие распределенных источников вещества и энергии в зоне EF (рис. 5) учитывается посредством введения эффективных потоков.

11. Образовавшиеся в зоне горения EF частицы ВДОК под воздействием газодинамических сил со стороны окружающей среды выносятся в «шлейф» (рис. 5).

12. Температура в пределах капли металла постоянна.

Кроме того, делаются достаточно традиционные допущения:

- число Льюиса равно единице;
- процесс горения является квазистационарным, изобарическим и центрально-симметричным.

Математическая модель представляет собой совокупность уравнений, описывающих перенос вещества и энергии в характерных зонах (рис. 5).

Уравнение массопереноса любого i -го компонента газовой смеси имеет следующий общий вид:

$$J_i = -\Omega \cdot \left(\frac{\lambda}{c_p} \right) \cdot \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^N J_j}{P_i} \right)^{-1} \frac{dP_i}{dr} \quad (1)$$

где: c_p – мольная теплоемкость при постоянном давлении;

λ – коэффициент теплопроводности;

J_i – мольный поток i -того компонента;

P_i – парциальное давление i -того компонента;

P – полное давление; $\overline{P_i} = \frac{P_i}{P}$;

N – количество компонентов, перенос массы которых осуществляется через сечение площадью Ω , включая i -й компонент.

Интегрирование уравнений вида (1) с учетом следующих граничных условий:

$$r = R_A : \quad \overline{P_M} = \overline{P_M^A}$$

$$r = R_E : \quad \overline{P_M} = \overline{P_M^E} ; \quad \overline{P_{ox,d}} = \overline{P_{ox,d}^E}$$

$$r = R_B : \quad \overline{P_M} = 0 ; \quad \overline{P_O} = 0 ; \quad \overline{P_{ox,d}} = \overline{P_{ox,d}^B}$$

$$r = R_F : \quad \overline{P_O} = \overline{P_O^F} ; \quad \overline{P_{ox,d}} = \overline{P_{ox,d}^F}$$

$r = R_C : \quad \overline{P_O} = \overline{P_O^C} = a_k$ - окисляющий потенциал окружающей среды позволяет записать 6 уравнений диффузии компонентов в характерных зонах, а именно:

- два уравнения диффузии паров металла (в зонах АЕ и ЕF),

- два уравнения диффузии водяного пара (в зонах ВF и FС),

- два уравнения диффузии диссоциированного оксида (в зонах ВЕ и ВF).

Тепловую обстановку в характерных зонах описывают четыре уравнения сохранения энергии, имеющие следующий общий вид:

$$\sum_{i=1}^n J_i^{in} H_i - \sum_{j=1}^m J_j^{out} H_j + Q_{sp} + Q_c^{in} - Q_c^{out} + Q_R^{in} - Q_R^{out} = 0 \quad (2)$$

где: H_i – мольная энтальпия i -того компонента;

Q_c – кондуктивный тепловой поток;

Q_R – лучистый тепловой поток;

Q_{sp} – интенсивность теплопоглощения на поверхности контакта металл-оксид в агломерате.

Интегрирование уравнений вида (2) при следующих граничных условиях:

$$r = R_A : \quad T = T_A,$$

$$r = R_E : \quad T = T_E,$$

$$r = R_B : \quad T = T_B,$$

$$r = R_F : \quad T = T_F,$$

$$r = R_C : \quad T = T_C$$

позволяет записать уравнения теплового баланса для зон АЕ, ЕВ, ВF и зоны В.

В соответствии с допущением о равновесном характере продуктов испарения металла и диссоциации оксида парциальные давления P_M^A , $P_{ox,d}^E$, $P_{ox,d}^F$, $P_{ox,d}^B$ связаны с температурами T_A , T_E , T_B , и T_F уравнением Клаузиуса - Клапейрона.

Для парциальных давлений диссоциированного оксида на границах зоны горения ЕF было принято: $P_{ox,d}^E = P_{ox,d}^F = 0,01 \cdot P$.

В окончательном виде модель процесса горения металла агломерата представляет собой систему десяти алгебраических трансцендентных уравнений тепломассообмена в характерных зонах, которые можно записать в

следующем общем виде: $F_i = 0$ ($i = 1, 2, \dots, 10$). Решение системы уравнений производится с помощью оптимизационной процедуры Нелдера-Мида [21] посредством минимизации целевой функции вида:

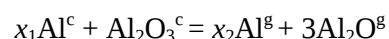
$$\Delta_F = \sum_{i=1}^{10} \left(\frac{F_i}{f_i} \right)^2$$

(f_i – масштабный фактор функции F_i).

Созданная модель обеспечивает определение таких важных характеристик горения, как температура частицы металла (T_A) и скорость горения (J_M).

Химическое взаимодействие конденсированных металла и оксида агломерата [18-19]

Результаты термодинамического анализа свидетельствуют о возможности протекания химического взаимодействия между конденсированными Al и Al_2O_3 . Это взаимодействие может быть описано следующим уравнением.



$$\text{где: } x_1 = \frac{\overline{P_{Al_2O}} + 3}{P_{Al_2O}};$$

$$x_2 = \frac{3 \cdot \left(\overline{P_{Al_2O}} - \overline{P_{Al_2O}} \right)}{P_{Al_2O}} \quad (\text{рис. 6})$$

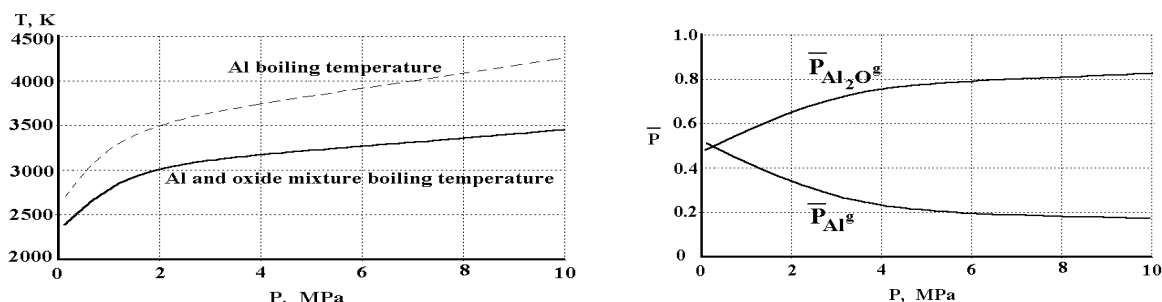


Рис. 6 – Результаты термодинамического анализа

Следствием химического взаимодействия может быть реализация явления уноса окиси агломератов. Для описания этого явления были сделаны следующие допущения:

- процесс начинается при определенной температуре;
- газообразные продукты образуют пузыри, которые имеют возможность сливаться, рост каждого крупного пузыря ограничен областью, которая определяется радиусом – R_f ;
- в пузырях, размер которых превышает размер адсорбционного слоя, осуществляется процесс конденсации;

- размер пузыря определяется конкуренцией процессов испарения и конденсации;
- если поверхность пузыря достигнет внешней поверхности окиси, происходит разрушение пузыря и выброс газообразных продуктов в окружающую среду;
- пузыри имеют сферическую форму;
- температура постоянна в пределах агломерата;
- газообразные продукты являются идеальным газом.

Скорость испарения описывается следующим выражением:

$$w_1 = A_1 \exp \left\{ -\frac{E_a}{R_0 T_A} \right\} \frac{1}{\sqrt{T_A}} (P_s - P), \quad \frac{\text{mole of Al}_2\text{O}_3^c}{\text{m}^2 \cdot \text{sec}} \quad (3)$$

где: A_1 – некоторый множитель, зависящий от свойств “испаряющегося вещества”;

E_a – энергия активации процесса;

P_s – давление насыщающих паров при температуре T_A ,

R_0 – универсальная газовая постоянная.

Выражение для скорости конденсации принимается в следующем виде:

$$w_2 = A_1 \exp \left\{ -\frac{E_a}{R_0 T_A} \right\} \frac{1}{\sqrt{T_A}} (P - 0), \quad \frac{\text{mole of Al}_2\text{O}_3^c}{\text{m}^2 \cdot \text{sec}} \quad (4)$$

Результирующая скорость расходования Al_2O_3^c при росте пузыря:

$$w_\Sigma = w_1 \Omega_1 - w_2 \Omega_2 \quad (5)$$

где: Ω_1 – площадь зоны подпитки;

Ω_2 – площадь внутренней поверхности пузыря, на которой происходит конденсация продуктов реакции.

Соотношение для скорости роста пузыря имеет следующий вид.

$$\frac{dV_b}{dt} = \frac{R_0 T}{P} w_\Sigma (3 + x_2) \quad (6)$$

Время роста единичного крупного пузыря до момента его разрушения:

$$t = \int_0^{R_b^{\max}} 4\pi R_b \frac{P}{R_0 T_A} \cdot \frac{1}{w_\Sigma (3 + x_2)} dR_b \quad (7)$$

где: $R_b^{\max}$ – максимальный радиус пузыря, при котором происходит его разрушение.

Скорость удаления продуктов реакции с единицы площади поверхности контакта $\text{Al}^c - \text{Al}_2\text{O}_3^c$ в агломерате (W):

$$W = \frac{V_b^{\max}}{t\pi R_f^2}, \quad \frac{\text{m}^3 \text{ of the reaction products}}{\text{m}^2 \cdot \text{sec}} \quad (8)$$

Окончательное выражение для определения скорости уноса:

$$J_{ox} = \frac{P}{R_0 T_A} W \frac{1}{3+x_2} \Omega_{M-ox}, \frac{\text{mole of Al}_2\text{O}_3}{\text{sec}} \quad (9)$$

где: Ω_{M-ox} – площадь поверхности контакта $\text{Al}^c - \text{Al}_2\text{O}_3^c$ в агломерате.

Разработанная модель содержит ряд параметров, точное значение которых определить в высшей степени затруднительно. К ним следует отнести величины A_1 , E_a , R_b , Ω_2 . Данные параметры рассматриваются, как коэффициенты согласования.

Осаждение частиц ВДОК на агломерат [18]

Скоростная неравновесность двухфазного потока продуктов сгорания обуславливает возможность осаждения частиц ВДОК несущей газовой фазы на агломератах, что должно приводить к изменению параметров их состояния.

При описании данного явления принимается:

- газ является вязким и несжимаемым;
- частицы ВДОК имеют одинаковый размер, равный среднемассовому.

Рассчитываются параметры газовой фазы, обтекающей агломерат, а затем решается следующая систем уравнений.

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{V}_p}{dt} &= \vec{F}_p \\ \frac{d\vec{l}_p}{dt} &= \vec{V}_p \end{aligned} \quad (10)$$

где: $\vec{V}_p$ – скорость частицы ВДОК;
 $\vec{F}_p$ – аэродинамическая сила, действующая на частицу ВДОК со стороны газовой фазы;

l_p – пространственные координата частицы ВДОК.

Интегрирование системы уравнений (10) обеспечивает определение коэффициента захвата частиц ВДОК агломератом (K_{dep}).

Структура агломерата [19]

В основе моделирования структуры агломерата лежит предположение о том, что в каждый момент времени он представляет собой дисперсную систему, находящуюся в состоянии равновесия, для которой известны температура (T_A), поверхностные свойства и количества входящих веществ.

Для определения структуры агломерата (рис. 7) используется система уравнений следующего вида.

$$\begin{cases} V_m = f_m(\alpha, \beta, R) \\ V_{ox} = f_{ox}(\alpha, \beta, R) \\ V_g = f_g(\beta, R) \end{cases} \quad (11)$$

где: V_m , V_{ox} , V_g – объем металла, оксида и газовой полости.

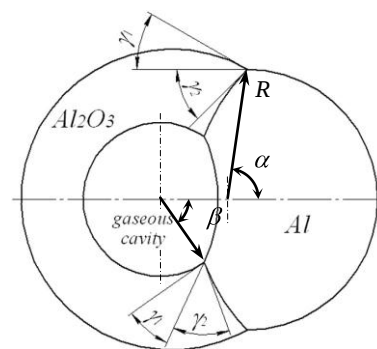


Рис. 7 – Схема строения агломерата

Значения углов находятся из условия равновесия на границах раздела фаз. Поверхностные натяжения на этих границах приведены в работе [18].

Движение агломерата

Уравнения движения агломерата в векторной форме имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{V}_a}{dt} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{C_{drag} S_a \rho_g \Delta V}{M_a} \Delta \vec{V} + \vec{F}_m + \frac{K_{dep} \cdot \varphi_{SOP} \cdot S_a \cdot \Delta V}{M_a} \Delta \vec{V} \\ \frac{d\vec{l}_a}{dt} &= \vec{V}_a \end{aligned} \quad (12)$$

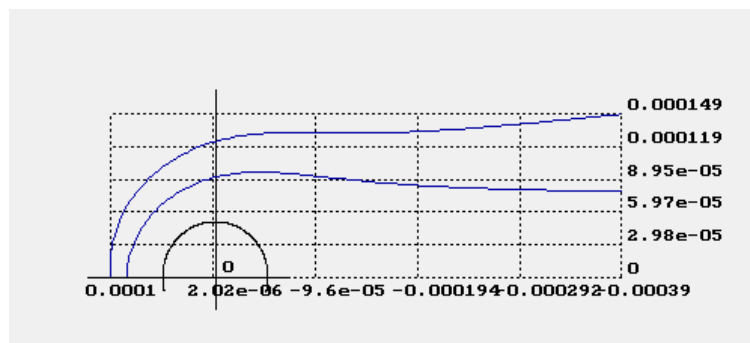
где: $\vec{V}_a$ – скорость агломерата,
 C_{drag} – коэффициент аэродинамического сопротивления;
 S_a – площадь сечения агломерата;
 ρ_g – несущей газовой фазы;
 ΔV – отличие скоростей несущей газовой фазы и агломерата;
 M_a – масса агломерата;
 $\vec{F}_m$ – массовая сила;
 φ_{SOP} – массовая доля ВДОК в несущей газовой фазе.

Интегрирование системы уравнений (12) обеспечивает определение положения агломерата в пространстве.

Формирование частиц ВДОК [22]

Определяются параметры пограничного слоя (ПС), возникающего при взаимодействии продуктов испарения агломерата и обтекающего агломерат потока. Использование при-

ближения пограничного слоя позволяет получать структуры, которые близки по своим свойствам к экспериментально фиксируемому «шлейфу» продуктов сгорания (рис. 8).



$R_A = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м};$
 относительная скорость обдува = 0,5 м/с;
 скорость длува с поверхности = 0,4962 м/с

Рис. 8 – Пространственные характеристики ПС

По длине ПС осуществляется изменение дисперсности ВДОК и в конечном итоге формирование высокодисперсного оксида, поставляемого в несущую газовую фазу. Основными явлениями, составляющими данный процесс, являются конденсация «паров» Al_2O_3 и коагуляция частиц оксида.

В рассматриваемом процессе можно говорить как о гомогенной, так и гетерогенной конденсации. Источником второго вида конденсации являются ВДОК и частицы сажи, содержащиеся в несущей газовой фазе.

Принимаются следующие допущения:

- Преимущественным видом конденсации является гетерогенная конденсация, этот процесс считается «быстрым» процессом.
- Коагуляция частиц обусловлена броуновским движением.

Для описания эволюции совокупности взаимодействующих частиц в пределах ПС используется непрерывный подход, в соответствии с которым одни процессы приводят к изменению массы частиц некоторой фракции при сохранении их индивидуальности (вещество продолжает принадлежать к той же фракции), а другие - к изменению количества частиц данной фракции.

Изменение массы частицы i -ой фракции во времени определяется следующим выражением:

$$\frac{dm_i}{dt} = \sum_{j=1}^{i-1} K_{ij} \cdot n_j \cdot m_j + \Omega_i \cdot I_\Omega \quad (13)$$

где: n - количество фракций;

Ω_i - площадь поверхности i -ой частицы ВДОК;

$$I_\Omega = \frac{I_\Sigma}{\sum_1^n n_i \cdot \Omega_i};$$

K_{ij} - коэффициент коагуляции частиц i -той и j -той фракций;

I_Σ - поток «паров» Al_2O_3 , поступающий в единицу объема при горении.

Изменение во времени количества частиц i -фракции связано с коагуляцией с более крупными частицами и с появлением новых центров конденсации.

$$\frac{dn_i}{dt} = -n_i \cdot \sum_{j=i}^n K_{ij} \cdot n_j + \dot{N}_i - \frac{n_i}{n_i^{vn}} \cdot \dot{N}_i \quad (14)$$

где: $\dot{N}_i$ - количество частиц i -ой фракции в единицу объема, поступающих из внешнего потока в единицу времени;

n_i^{vn} - количество частиц i -ой фракции в единицу объема несущей газовой фазы;

V_{vn} - проекция вектора скорости внешнего потока на нормаль к площадке, через которую ВДОК попадает в пограничный слой.

Масса i -той фракции в единице объема находится с помощью очевидного соотношения ($g_i = m_i \times n_i$), тогда:

$$\frac{dg_i}{dx} = \frac{1}{V_x^{cp}} \left(m_i \frac{dn_i}{dt} + n_i \frac{dm_i}{dt} \right) \quad (15)$$

где: $V_x^{cp}(x) = \frac{\int_0^\delta V_x(y) dy}{\delta}$ - среднее значение

составляющей скорости газа - V_x по сечению пограничного слоя при некотором значении криволинейной координаты x .

Для отыскания параметров дисперсности частиц ВДОК в произвольном сечении ПС осуществляется интегрирование системы обыкновенных дифференциальных уравнений вида (15) для всех фракций (с учетом уравнений (13-14) по длине пограничного слоя.

Дальнейшее развитие модели и собственно ее валидация осуществлялись посредством сравнения расчетных и экспериментальных данных, описывающих эволюцию конденсированных продуктов для случая одномерного потока.

В качестве подобных данных использовались параметры конденсированных продуктов: количество, характеристики дисперсности и химического состава. Модель эволюции КПС представляла собой совокупность связанных между собой моделей эволюции агломератов, принадлежащих различным фракциям. Данные о характеристиках КПС у поверхности горящего топлива, используемые при проведении расчетов, были найдены экспериментально. Была использована оптимизационная процедура, в которой в качестве варьируемых параметров выступали согласующие коэффициенты частных моделей, а в качестве целевой функции применялся параметр Δ_Σ , представляющий собой относительное рассогласование экспериментальных и расчетных данных, характеризующих процесс эволюции, полученных в различных сечениях потока для всех исследованных топлив.

$$\Delta_\Sigma = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum_1^N \left(\frac{X_i^{\mathcal{E}} - X_i^M}{X_i^{\mathcal{E}}} \right)^2 \right)}$$

где: $X_i^{\mathcal{E}}, X_i^M$ - значения i -того параметра, полученного в эксперименте и с помощью модели;

N - количество сравниваемых значений.

Структура параметра Δ_Σ такова, что он включает и погрешность моделирования, и погрешность получения комплекса экспериментальных данных, используемых при согласовании.

Получено, что величина Δ_Σ составляет 5,5%. При этом относительная погрешность этого значения при доверительной вероятности 0,997 равна ~14%, т. е. $\Delta_\Sigma = (5,5 \pm 0,8)\%$.

Данный результат дает основание говорить о сравнительно высоком качестве как получения экспериментальной информации, так и моделирования эволюции КПС. Следует подчеркнуть, что этот результат отличается достаточно высоким уровнем доверия, поскольку использован большой объем экспериментальной информации ($N \sim 100$).

Заключение

Результаты выполненной работы позволили создать описание процесса горения крупной фракции частиц алюминия (агломератов) в среде продуктов сгорания ракетного топлива. Разработанная модель обеспечивает определение разнообразных характеристик конденсированных продуктов (параметров дисперсности, химического состава и структуры). Она может быть использована решения ряда практических задач, связанных с созданием ракетных двигателей на твердом топливе. К их числу относятся задачи прогнозирования:

- потерь удельного импульса тяги;
- шлакообразования в камере сгорания;
- теплового воздействия продуктов сгорания на элементы конструкции.

Следует подчеркнуть, что адекватность моделирования подтверждена для условий, в которых проводилось экспериментальное исследование. Можно ожидать, например, что при горении рассматриваемых частиц металла в низкотемпературных средах возрастет роль кинетики химического взаимодействия. Таким образом, целесообразно проведение дополнительных исследований с целью определения возможности использования разработанной модели в других условиях.

Кроме того, рассматривается горение совокупности сравнительно крупных частиц ($D > 30-40$ мкм). Закономерности горения более мелких частиц существенно отличаются [17, 23]. Очевидна необходимость решения задачи создания непротиворечивого описания процесса горения подобных частиц.

Литература

1. Похил П.М., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. - М.: Наука, 1972, -294 с.
2. Клячко Л.А. Горение неподвижной частицы легкокипящего металла // Физика горения и взрыва. -1969. -№3 (5). -С. 404-413.
3. Клячко Л.А. Горение частицы легкокипящего металла, движущегося относительно газообразного окислителя // Физика горения и взрыва. -1971. - №2(7). -С. 236-241.
4. Воронецкий А.В., Сухов А.В., Шпаро А.П. О механизме влияния давления на горение частиц металлов // Вопросы двигателестроения. Сб. тр. МВТУ. -1978. №290. -С. 28-35.
5. Гремячкин В.М., Истратов А.Г., Лейпунский О.И. Об образовании конденсированных частиц окиси при горении мелких частиц металла // Прикладная механика и техническая физика. -1974. -№4. -С. 70-78.
6. Гремячкин В.М., Истратов А.Г., Лейпунский О.И. Модель горения мелких капель металла // Физика горения и взрыва. -1975. -№3(11). -С. 366-373.
7. Гремячкин В.М., Истратов А.Г., Лейпунский О.И. К теории горения мелких капель металла // Прикладная механика и техническая физика. -1976. - №2. -С. 47-53.
8. Гладун В.Д., Фролов Ю.В., Кашпоров Л.Я. Агломерация частиц порошкообразного металла при горении смесевых конденсированных систем. - Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1977, 39 с.
9. Brooks K.P. and Beckstead M.W. Dynamics of Aluminum Combustion // Proceedings of 30th JANNAF Combustion Meeting. -1993. -P. 337-356.
10. Olsen S.E. and Beckstead M.W. Burn Time Measurements of Single Aluminum Particles in Steam and Carbon Dioxide Mixtures // Intra-chamber Processes Combustion and Gas Dynamics of Dispersed System. International Seminar. St. Petersburg, Book of Lectures. -1995. -P. 6-35.
11. Yongjun Liang and Merrill W. Beckstead. Numerical Simulation of Quasi-Steady, Single Aluminum Particle Combustion in Air. AIAA Paper 98-0254. -1998.
12. Price E.W. Combustion of metallized propellant // Progress in Astronautics and Aeronautics. Fundamentals of solid propellant combustion. V. 90, AIAA, New York. -1972. -P. 479-523.
13. Hermesen R.W. Aluminum Combustion Efficiency in Solid Rocket Motors. AIAA Paper 81-0038. -1981.
14. Babuk, V.A., Vasilyev, V.A., and Sviridov, V.V. Formation of Condensed Combustion Products at the Burning Surface of Solid Rocket Propellant // Progress in Astronautics and Aeronautics. Solid Propellant Chemistry, Combustion, and Motor Interior Ballistics. V. 185, AIAA, New York. -2000. -P. 749-776.
15. Babuk, V.A., Vasilyev, V.A., and Naslednikov, P.A. Experimental Study of Evolution of Condensed Combustion Products in Gas Phase of Burning Solid Rocket Propellant // "Combustion of Energetic Materials", edited by K. Kuo and L. De Luca, N.Y. -2002. -P. 412-426.
16. Babuk, V.A., Vasilyev, V.A., and Malakhov, M.S., Condensed Combustion Products at the Burning Surface of Aluminized Solid Propellant // Journal of Propulsion and Power. -1999. -No. 6(15). - P. 783-794.
17. Бабук В.А. Проблемы исследования образования высокодисперсного оксида при горении алюминизированных твердых топлив // Физика горения и взрыва. -2007. -№1(43). -С. 45-53.
18. Babuk, V.A. and Vasilyev, V.A., Model of Aluminum Agglomerate Evolution in Combustion Products of Solid Rocket Propellant // Journal of Propulsion and Power. -2002. -No. 4(18). - P. 814-824.
19. Valery A. Babuk, Ildar N. Dolotkazin, and Alexander A. Nizyaev. Analysis and Synthesis of Solutions for the Agglomeration Process Modeling // EUCASS Book Series Advances in Aerospace Sciences Vol. 4 – Progress in Propulsion Physics, EUCASS, Torus Press, EDP Sciences, Paris. – 2013. - P. 33-58
20. Основы практической теории горения. / Под ред. В. В. Померанцева. -Л.: -Энергоатомиздат, 1986. -309 с.
21. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. -М.: Мир, 1975. - 534 с.
22. Бабук В.А., Васильев В.А., Карпин Д.В. Моделирование горения капель AL-AL₂O₃ в активном высокотемпературном газовом потоке // Сборник докладов Третьей Международной конференции по внутрикамерным процессам и горению в установках на твердом топливе и ствольным системам (ICOC-99). Ижевск. -1999. -С. 761-781.

23. Patrick Lynch, Giovanni Fiore, Herman Krier, and Nick Glumac. Gas-Phase Reaction in Nanoaluminum Combustion // Combustion

Science and Technology. -2010. No. 7(182). –P. 842-857.

BURNING OF ALUMINIUM PARTICLES IN ACTIVE ENVIRONMENTS

V.A. Babuk

Baltic State Technical University
1, First Krasnoarmeyskaya Str., St.-Petersburg, 190005, Russia

Abstract

Results of research of burning process of coarse fraction of metal particles (diameter of particles more than 30-40 μm) in the environment of combustion products of solid rocket propellant are resulted in the present article. Research included working out of techniques of an experimental research, obtaining of experimental data about burning process, creation of the general physical picture of studied process, working out of the mathematical model providing definition of characteristics of kinetics combustion and condensed combustion products. Experimental research techniques provide obtaining of the information of quantitative character (the data about dispersion and a chemical composition of the condensed products, temperature of burning particles), and also qualitative character (the data of visualization of burning particles and the analysis microsections of collected particles). The physical picture of considered burning process includes the description of set of physical and chemical transformations in which participate both condensed and gaseous products. Numerical the model analysis has allowed to draw a conclusion on high enough quality of modeling. Results of research can be used for the decision of some practical problems at creation of propulsion system on solid propellant. Problems of forecasting of losses of a specific impulse, slag formation in the combustion chamber and influence of combustion products on construction elements concern their number.

БЕЛСЕНДІ БАҚ АЛЮМИНИЙ БӨЛШЕКТЕР ЖАНУ

В.А.Бабук

Балтық мемлекеттік техникалық университеті «Военмех»
190005, Санкт-Петербург, 1-Қызыл Армия көшесі. г. 1, Ресей

Аннотация

Бұл мақала қатты зымыран отыны жану өнімдерінің қоршаған ортаға алюминий бөлшектер (бөлшектердің диаметрі 30-40 мм) үлкен фракциясының жану процесінің зерттеу нәтижелерін ұсынады. Зерттеу, жану процесінде эксперименттік деректер алу, кинетика және қоюландырылған жану, өнімдерінің жану сипаттамасы қамтамасыз математикалық моделін, дамуын зерттеу бойынша процесінің жалпы физикалық сурет құру эксперименттік тергеу әдістерін дамыту кіреді. Эксперименттік зерттеу әдістері (таңдалған бөлшектердің жұқа учаскелерін бөлшектер жағу деректер визуализация және талдау) (ықшамдалған өнімдерін деректер дисперсиясы және химия, жанып бөлшектердің температурасы) сандық және сапалық жағынан ақпаратты қамтамасыз етеді. Жану процесінің физикалық сурет ықшамды және газ тәріздес өнімдер екі қатысуымен физикалық және химиялық өзгерістердің жиынтығында сипаттамасын қамтиды. Сандық моделі талдау жеткілікті жоғары сапалы модельдеу қорытындыға әкелді. Нәтижелері қатты отынға электр стансаларын жасау кезінде кейбір практикалық міндеттерді шешу үшін пайдаланылуы мүмкін. Бұл нақты серпін жоғалуын болжау проблемасын, жану камерасында қож қалыптастыру және құрылыс элементтері жану өнімдерінің салдары кіреді.