

УДК 541.1; 519.1

**А.Ю. Крюков, В.И. Малинин**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГОРЕНИЯ  
ПОЛИФРАКЦИОННОЙ АЭРОВЗВЕСИ АЛЮМИНИЯ  
С УЧЕТОМ РЕАКЦИИ АЗОТИРОВАНИЯ**

Представлена математическая модель горения полифракционной аэровзвеси порошка алюминия с учетом реакции азотирования, предназначенная для описания процессов воспламенения и сгорания смесей металла и воздуха в прямоточных камерах технологических и энергетических установок. Модель включает описание взаимодействия алюминия и воздуха, причем рассматривается образование не только оксида, но и нитрида. Исследуется одномерный квазистационарный процесс движения полифракционной аэровзвеси частиц алюминия с переменной скоростью, температурой, плотностью частиц и газа, давлением, концентрацией кислорода, азота и продуктов химических реакций. В структуру модели входит система нелинейных дифференциальных уравнений, отражающая законы сохранения массы, энергии и импульса реагирующих компонентов, уравнения движения фаз, выражения для определения скоростей химических реакций и фазовых переходов. Особенностью модели является то, что реакция окисления и реакция азотирования алюминия рассматриваются как параллельные совместно протекающие реакции. Причем на поверхности сгорающих частиц металла учитывается диффузионно-кинетический характер процессов, а в объеме потока – только кинетика процессов. Принимаются в расчет кинетические ограничения на скорости химических реакций, неравновесность процессов, особенности накопления оксида на поверхности частиц и в объеме потока. Принципы построения этой модели являются универсальными, позволяют учитывать специфику образования как оксида, так и нитрида. Модель предназначена для численных исследований и анализа процессов горения аэровзвесей алюминия с учетом одновременного образования оксида и нитрида металла.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, горение, течение, аэровзвесь, алюминий, реакция окисления, реакция азотирования, кинетика, неравновесная термодинамика, ультрадисперсная фракция.

**A.Yu. Kryukov, V.I. Malinin**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**MATHEMATICAL MODEL OF BURNING  
OF POLYFRACTIONATING AIR SUSPENSION OF ALUMINIUM  
TAKING INTO CONSIDERATION A NITRATION REACTION**

In the paper the mathematical model of burning of polyfractionating air suspension of aluminium taking into consideration a nitration reaction is presented. The model is intended for description of ignition and combustion processes of mixtures of metal and air in straight flow chambers of process and power installations. The model includes description of an interaction aluminium and air with taking into

account not only oxide forming but also nitride formation. The one-dimensional quasi-steady process of motion of polyfractionating air suspension of aluminium particles is considered. This air suspension flow is characterized by alternating velocity, temperature, density of gas and particles, pressure, concentration of oxide, nitrogen and chemical reactions products. The parts of model structure are: system of nonlinear differential equations showing conservation laws of mass, energy and impulse of interacting components; equations of phase motion, expression for definition of rates of chemical reactions and changes of phase. The distinctive feature of the model lies in the consideration of aluminium oxidation and aluminium nitration as parallel simultaneously proceeding reactions. It is taken into account the diffusion-kinetic nature of processes on the surface of burning metal particles and only kinetics of processes in the flow volume. Kinetic limitations for chemical reactions rates, processes nonequilibrium, particular features of oxide accumulation on the particles surface and in the flow volume are taken into consideration. The principles of construction of the model are multi-purpose and they allow to take into account specific character of both the oxide and the nitride. This model is intended for numerical researches and analysis of processes of burning of aluminium air suspensions with calculations of oxide formation simultaneously with metal nitride formation.

**Keywords:** mathematical modelling, combustion, flow, air suspension, aluminium, oxidation reaction, nitration reaction, kinetics, nonequilibrium thermodynamics, ultrafine fraction.

## Введение

Построение адекватных математических моделей воспламенения и сгорания аэрозвесей металлических порошков является актуальным направлением современной теории горения, имеющим большое прикладное значение для управления внутрикамерными процессами в технологических установках получения ультрадисперсных материалов и в энергоустановках на порошковом металлическом горючем [1].

В настоящей работе представлена математическая модель, включающая описание взаимодействия алюминия и воздуха, причем рассматривается образование не только оксида, но и нитрида. Необходимость учета азотирования определяется данными экспериментальных исследований [2], показывающих надежное воспламенение и устойчивое горение аэрозвесей алюминия при малых значениях коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  (вплоть до  $\alpha = 0,04$ ).

Построение модели выполнено на основе модернизации модели образования оксида при горении порошка алюминия, представленной в работе [1], которая отличается тем, что учитывает кинетические ограничения на скорости химических реакций, неравновесность процессов, особенности накопления оксида на поверхности частиц и в объеме потока. Принципы построения этой модели являются универсальными, позволяют учитывать специфику образования как оксида, так и нитрида. Новая модель получается добавлением к исходной [1] соотношений, определяющих вклад азотирования в процессы горения.

В работе [3] автором впервые была предложена математическая модель горения одиночной частицы Al, учитывающая накопление ок-

сида на частице и кинетику поверхностных процессов. Модель предлагалась для описания процесса горения частиц размером менее 40 мкм в воздухе при давлении 0,1 МПа. Для соответствующих условий были выполнены расчеты параметров процесса горения алюминия, которые показали необходимость учета кинетического фактора. В исследованиях [1, 4] разработанная в статье [3] модель была усовершенствована, что позволило рассчитывать горение полифракционной взвеси частиц Al в многокомпонентных газовых смесях.

Ниже описана математическая модель горения полифракционной аэровзвеси частиц Al в высокоскоростном потоке, учитывающая кинетику процессов и на поверхности частиц, и в объеме потока, температурную и скоростную неравновесность между частицами и газом. За основу принята модель горения одиночной частицы Al [3], учитывающая накопление оксида на частице, кинетику испарения и поверхностных химических реакций. Описание аэродисперсной системы выполнено так же, как и в монографии [1]. Процессы горения многофазных и многокомпонентных потоков вещества рассмотрены в рамках модели *взаимопроникающих* движений сплошных сред. Совместно с кинетическими ограничениями, в отличие от всех предыдущих моделей, учтены и термодинамические соотношения (на поверхности частиц и в потоке), которые существенны для переобогащенных смесей ( $\alpha < 1$ ) и при высоких температурах среды ( $> 3500$  K). Соответственно, в модели к другим газовым компонентам добавлены субоксиды алюминия ( $Al_2O$  и  $AlO$ ), которые возникают при горении Al в обедненной кислородом смеси или при высоких температурах среды. Также учтено образование нитрида алюминия, поскольку из выводов работы [2] следует, что эта реакция имеет место при низких  $\alpha$ .

### Основные положения и допущения

Рассматривается течение реагирующей смеси частиц и газа (рисунок). Поток характеризуется следующими переменными параметрами: скоростью, температурой, плотностью частиц и газа, давлением, концентрацией кислорода, азота, продуктов испарения и химических реакций, количеством крупно- и ультрадисперсной конденсированной фазы. Крупнодисперсная фаза состоит из алюминия и оксида, накопившегося на поверхности частиц в процессе горения. Ультрадисперсная фаза – из оксида и нитрида, которые образуются в объеме потока

в результате газофазных реакций. Продукты испарения – из газообразного алюминия и субоксидов алюминия ( $Al_2O$  и  $AlO$ ). Учитывается скоростная, температурная и химическая неравновесность между крупнодисперсной фазой и газом. Ультрадисперсная фаза находится в скоростном и тепловом равновесии с газом, но не находится в химическом равновесии. Крупнодисперсная фаза представлена совокупностью определенного числа монофракций. Для ультрадисперсной фазы в каждой точке потока определяется удельная поверхность, соответственно – средний по поверхности размер ее частиц.

***Задача решается при следующих основных допущениях:***

1. Рассматривается одномерный, квазистационарный процесс.
2. Потери тепла в стенку, как путем теплообмена, так и радиационным путем, не учитываются.
3. Диффузионный перенос массы, кондуктивный и радиационный перенос тепловой энергии между разными поперечными сечениями потока аэрозвеси не учитывается.
4. Не учитывается механическое взаимодействие частиц друг с другом.
5. Предполагается, что частицы оксида алюминия и нитрида алюминия, образующиеся в объеме газового потока в результате газофазных реакций, малы и поэтому находятся в тепловом и скоростном равновесии с газовым потоком.
6. Вязкость учитывается только при взаимодействии между газом и частицами алюминия.
7. Реакция азотирования алюминия на свободной поверхности и реакция азотирования паров алюминия (разложения нитрида) на поверхности исходных частиц, покрытой нитридом, не учитываются, поскольку удельная поверхность наночастиц нитрида много больше, чем удельная поверхность исходных частиц металла, и площадь окисленной поверхности много больше, чем площадь азотированной.

В данной работе за основу принята уточненная модель горения одиночной частицы  $Al$  [4]. В модели приняты представления и допущения работы [5], кроме предположения о термодинамическом равновесии на поверхности частицы. Пренебрежение образованием субоксида  $Al_2O$  вносит гораздо меньшую погрешность в расчет, чем его учет в соответствии с локальным термодинамическим равновесием. Но в общем случае необходимо учитывать образование субоксидов  $Al_2O$

и AlO, например в случае горения газозвеси частиц Al при недостатке окислителя ( $\alpha < 1$ ) и высоких температурах ( $T > 3500$  К).

В соответствии с уточненной моделью были рассмотрены процессы, протекающие на поверхности частиц и в объеме потока.

**На поверхности частиц алюминия протекают следующие процессы:**

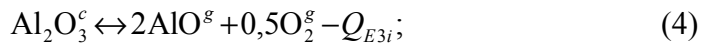
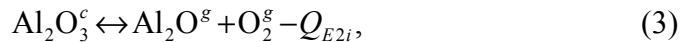
1) испарение (конденсация) алюминия на свободной от оксида и нитрида поверхности (далее по тексту – свободной поверхности):



2) реакция окисления алюминия на свободной поверхности:



3) испарение (конденсация) на внешней поверхности оксида, покрывающего частицу (далее по тексту – окисленной поверхности):



4) реакция окисления паров алюминия (разложения оксида) на окисленной поверхности:

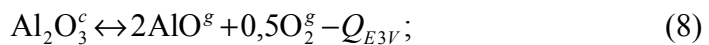
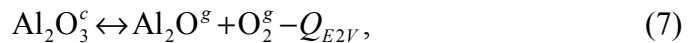


**В объеме потока на поверхности частиц ультрадисперсного оксида и нитрида протекают следующие процессы:**

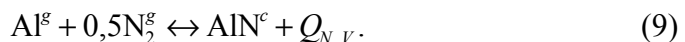
1) реакция окисления паров алюминия (разложения) оксида:



2) испарение (конденсация) оксида:



3) реакция азотирования паров алюминия (разложения) нитрида:



При записи реакций процессов приняты следующие обозначения:  $Q_{ox,ji}$  – теплота реакций окисления и теплота испарения оксида;  $Q_{E2V}$ ,  $Q_{E3V}$  – теплота процессов испарения (конденсации) оксида;  $Q_{ox,V}$  – теплота реакции окисления в объеме потока;  $Q_{N,V}$  – теплота реакции азотирования в объеме потока. Соответственно, значения индексов следующие:  $j$  – индекс поверхности ( $j = 1$  – свободная поверхность,  $j = 2$  – поверхность, покрытая оксидом);  $i$  – номер фракции;  $e$  – испарение;  $V$  – процессы в объеме потока;  $ox$  – процессы окисления;  $N$  – процессы азотирования.

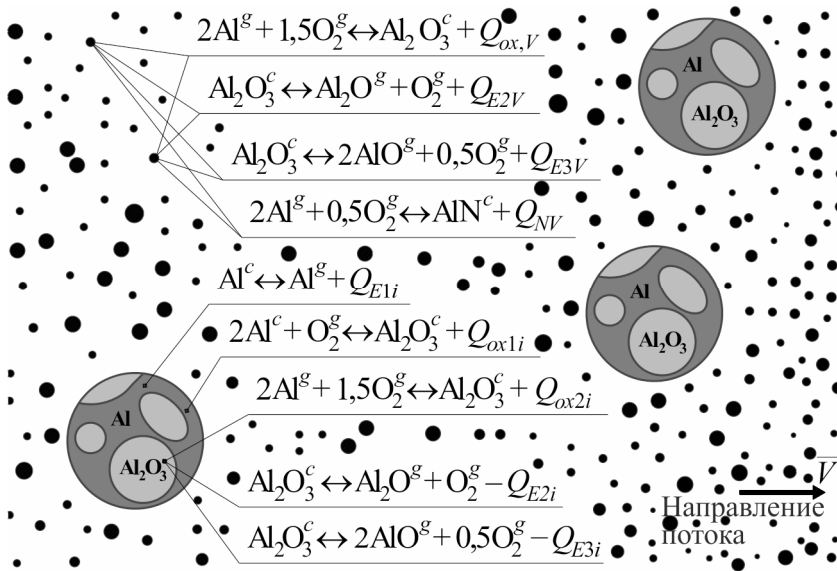


Рис. Схема процессов горения частиц полифракционной аэрозвеси алюминия

### Система уравнений

В соответствии с процессами (1)–(9), принятым подходом, допущениями и законами сохранения массы, энергии и импульса составлена система уравнений и начальных условий, описывающая воспламенение и горение потока аэрозвеси частиц полифракционного алюминия. Система состоит из дифференциальных уравнений баланса масс алюминия, продуктов реакций – оксида и нитрида, числа частиц, энтальпии и импульса, записанных для каждой фракции частиц. Для газового потока записаны уравнения баланса масс газа, газовых компонент, ультрадисперсного оксида и ультрадисперсного нитрида, баланса энергии и импульса. Система дополнена уравнениями состояния идеального газа для каждой компоненты и законом Дальтона.

## 1. Уравнения баланса для частиц $i$ -й фракции:

1.1. Массы алюминия, отнесенной к ее начальному значению:

$$V_i \frac{d m_{A,i}}{dx m_{A,i}^0} = - \frac{3r_i^2 (2W_{oxli} + W_{Eli}) M_A}{r_{0i}^3 \rho_A^0}. \quad (10)$$

1.2. Массы оксида на частице, отнесенной ко всей массе оксида, образующегося при полном сгорании частицы алюминия:

$$V_i \frac{d m_{c,i}}{dx m_{c,i}^F} = \frac{6r_i^2 (W_{oxli} + W_{ox2i} - W_{E2i} - W_{E3i}) M_A}{r_{0i}^3 \rho_A^0}. \quad (11)$$

1.3. Энтальпии (алюминий в твердой или жидкой фазе):

$$V_i \frac{dT_i}{dx} = \frac{1}{r_{0i}^3 \rho_A^0} \times \frac{3r_i^2 [W_{oxli} Q_{oxli} + W_{ox2i} Q_{ox2i} - W_{Eli} Q_{Eli} - W_{E2i} Q_{E2i} - W_{E3i} Q_{E3i} - \alpha_i (T_i - T_g)]}{[(m_{A,i}/m_{A,i}^0) C_{p,A,i} + (m_{c,i}/m_{c,i}^F) C_{p,c,i} (M_c/2M_A)]}, \quad (12)$$

$$T_i \neq 934 \text{ K}, f_i = 0 \text{ или } f_i = 1.$$

1.4. Энтальпии (алюминий плавится):

$$V_i \frac{df_i}{dx} = \frac{3r_i^2 [W_{oxli} Q_{oxli} + W_{ox2i} Q_{ox2i} - W_{Eli} Q_{Eli} - W_{E2i} Q_{E2i} - W_{E3i} Q_{E3i} - \alpha_i (T_i - T_g)]}{r_{0i}^3 \rho_A^0 (m_{A,i}/m_{A,i}^0) q_f}, \quad (13)$$

$$T_i = 934 \text{ K}, 0 < f_i < 1.$$

1.5. Уравнение сохранения числа частиц  $i$ -й фракции:

$$\frac{d}{dx} (V_i N_i) = 0. \quad (14)$$

## 2. Уравнения баланса для газового потока:

2.1. Массы кислорода:

$$\frac{d}{dx} (\rho_{ox} V_g) = -(J_{ox}^1 + J_{ox}^2 + J_{ox}^V). \quad (15)$$

2.2. Массы азота:

$$\frac{d}{dx}(\rho_N V_g) = -J_N^V. \quad (16)$$

2.3. Массы паров алюминия:

$$\frac{d}{dx}(\rho_{V1} V_g) = J_{V1}^1 - J_{V1}^V - J_{V1N}^V. \quad (17)$$

2.4. Массы Al<sub>2</sub>O:

$$\frac{d}{dx}(\rho_{V2} V_g) = J_{V2}^2 - J_{V2}^V + J_{V3}^V. \quad (18)$$

2.5. Массы AlO:

$$\frac{d}{dx}(\rho_{V3} V_g) = J_{V3}^2 - J_{V3}^V. \quad (19)$$

2.6. Массы ультрадисперсного оксида, образовавшегося в объеме потока:

$$\frac{d}{dx}(\rho_C^V V_g) = J_{ox}^V + J_{V1}^V + J_{V2}^V. \quad (20)$$

2.7. Массы ультрадисперсного нитрида, образовавшегося в объеме потока:

$$\frac{d}{dx}(\rho_N^V V_g) = J_N^V + J_{V1N}^V. \quad (21)$$

2.8. Массы газа, включая массу ультрадисперсного оксида и нитрида (здесь и далее значком «\*» обозначены параметры, определенные с учетом ультрадисперсных частиц):

$$\frac{d}{dx}(\rho_g^* V_g) = -J_{ox}^1 - J_{ox}^2 + J_{V1}^1 + J_{V2}^2 M_c / M_{V2} + J_{V3}^2 M_c / M_{V3}. \quad (22)$$

2.9. Энергии газа:

$$V_g \frac{dT_g}{dx} = \frac{J_Q}{C_{p,g}^* \rho_g^*} - \frac{V_g^2}{C_{p,g}^*} \frac{dV_g}{dx} - \sum_i \frac{\rho_i V_i^2}{C_{p,g}^* \rho_g^*} \frac{dV_i}{dx}. \quad (23)$$



### 3. Уравнения движения

3.1. Частиц  $i$ -й фракции:

$$V_i \frac{dV_i}{dx} = \frac{3}{8} \frac{\rho_g r_i^2 C_{D,i} (V_g - V_i) |V_g - V_i|}{r_{0i}^3 \rho_A \left[ (m_{A,i}/m_{A,i}^0) + (m_{c,i}/m_{c,i}^F)(M_c/2M_A) \right]}. \quad (24)$$

3.2. Газа (индекс « $k$ » относится к газовым компонентам):

$$(1-M^2) \frac{dV_g}{dx} = \frac{J_Q}{\rho_g^* C_{p,g}^* T_g} + \frac{1}{\rho_g} \sum_k \frac{M_g}{M_k} \frac{d(\rho_k V_k)}{dx} + \sum_i \frac{\rho_i V_i V_g}{p} \left( 1 - \frac{V_i}{V_g} \frac{R_g^*}{C_{p,g}^*} \right) \frac{dV_i}{dx}. \quad (25)$$

### 4. Начальные условия

При  $x = 0$

$$\begin{aligned} m_{A,i} &= m_{A,i}^0, \quad m_{c,i} = m_{c,i}^0, \quad m_{N,i} = m_{N,i}^0, \quad T_i = T_{0i}, \quad f_i = 0, \\ V_i N_i &= (V_i N_i)_0, \quad \rho_{ox} V_g = (\rho_{ox} V_g)_0, \\ \rho_N V_g &= (\rho_N V_g)_0, \quad \rho_{V1} V_g = (\rho_{V1} V_g)_0, \quad \rho_{V2} V_g = (\rho_{V2} V_g)_0, \\ \rho_{V3} V_g &= (\rho_{V3} V_g)_0, \quad \rho_c^V V_g = (\rho_c^V V_g)_0, \\ \rho_{N,c}^V V_g &= (\rho_{N,c}^V V_g)_0, \quad \rho_g^* V_g = (\rho_g^* V_g)_0, \quad T_g = T_{g0}, \quad V_i = V_{i0}, \quad V_g = V_{g0}. \end{aligned} \quad (26)$$

### 5. Уравнения состояния и замыкающие соотношения

Система (1)–(26) должна быть дополнена:

5.1. Уравнением состояния идеального газа, которое должно быть записано для каждой газовой компоненты

$$p_k = \rho_k R_k T_g, \quad k = 1, 2, \dots, m. \quad (27)$$

5.2. Законом Дальтона:

$$p = \sum_k p_k. \quad (28)$$

В системе уравнений (1)–(28) использованы следующие обозначения:

5.3. Радиус частиц  $i$ -й фракции

$$r_i = \begin{cases} r_{0i}, & T_i \leq 2327 \text{ K}, \\ r_{0i} \left[ \frac{\rho_A^0}{\rho_{A,i}} \left( \frac{m_{A,i}}{m_{A,i}^0} + \frac{m_{c,i}}{m_{c,i}^F} \frac{\rho_{A,i}}{\rho_{c,i}} \frac{M_c}{2M_A} \right) \right]^{1/3}, & 2327 \text{ K} < T_i < 2700 \text{ K}, \end{cases} \quad (29)$$

где  $\rho_A$ ,  $\rho_c$  – значения в зависимости от температуры плотности алюминия и его оксида соответственно (определены по данным [4]).

#### 5.4. Плотность $i$ -й фракции в потоке

$$\rho_i = \frac{4}{3} \pi r_{0i}^3 \rho_A^0 \left( \frac{m_{A,i}}{m_{A,i}^0} + \frac{m_{c,i}}{m_{c,i}^0} \frac{M_c}{2M_A} \right) N_i. \quad (30)$$

5.5. Теплоемкость газовой смеси при постоянном давлении (с учетом ультрадисперсного оксида и ультрадисперсного нитрида):

$$C_{p,g}^* = \sum_k \frac{\rho_k}{\rho_g^*} C_{p,k} + \frac{\rho_c^V}{\rho_g^*} C_p^V + \frac{\rho_{N,c}^V}{\rho_g^*} C_{N,p}^V. \quad (31)$$

5.6. Число Маха  $M$ , скорость звука  $a$  в потоке и показатель адиабаты  $k$  газовой смеси:

$$M = \frac{V_g}{a}, \quad a = \sqrt{k R_g^* T_g}, \quad k = \frac{C_{p,g}^*}{C_{p,g}^* - R_g^*} \quad (32)$$

5.7. Газовая постоянная и молекулярная масса газовой смеси:

$$R_g^* = (R/M_g)(\rho_g/\rho_g^*), \quad M_g = \sum_k M_k p_k / p. \quad (33)$$

### 6. Скорости химических реакций и фазовых переходов

Для замыкания системы (1)–(33) необходимо определить скорости химических реакций и фазовых переходов  $W_{ji}^l$  на свободной и окисленной поверхности и поверхности ультрадисперсных частиц в газовом потоке. Соответственно, необходимо определить интенсивности массо- и теплообмена между газовой и конденсированной фазами в единице объема потока  $J_k^l$  и  $J_Q$  ( $l = 1, 2, V$ ).

При выводе вычислительных формул для определения потоков массы и тепла к поверхности и от поверхности частиц будем исходить из следующих положений:

1. Частицы оксида и нитрида отдельно не рассматриваем, поскольку процессы окисления и азотирования могут протекать на любой твердой или жидкой поверхности и их разделение в пространстве в рамках используемой физической модели не представляется возможным.

2. Скорости процессов на поверхности крупно- и ультрадисперсной фракции должны описываться похожими математическими выражениями, но в выражении для скоростей на поверхности ультрадисперсных частиц из-за их малого размера можно пренебречь диффузионным сопротивлением по сравнению с кинетическим.

3. Скорости процессов на всех поверхностях должны ограничиваться числом ударов молекул (атомов) о поверхность в единицу времени.

4. Процессы, описываемые уравнениями (1) и (3)–(9), обратимы и могут идти как в прямом, так и в обратном направлении со скоростями, выражаемыми одинаковыми формулами.

5. Равновесные значения давлений компонентов у поверхности связаны известными термодинамическими соотношениями с избыточным давлением компонентов у поверхности. Избыточное давление определяется стехиометрией мольных потоков компонентов у поверхности. Скорости процессов у поверхности определяются следующим образом.

6.1. Мольные скорости реакций образования оксида (рассчитаны на единицу площади поверхности):

$$W_{ox1i} = k_{ox1i} \frac{P_{ox,i}^s}{RT_i} \text{ – на свободной поверхности;}$$

$$W_{ox2i} = k_{ox2i} \frac{P_{ox,i}^s - P_{ox,i}^e}{RT_i} \text{ – на окисленной поверхности;}$$

$$W_{ox,V} = k_{ox,V} \frac{P_{ox} - P_{ox}^e}{RT_g} \text{ – на поверхности ультрадисперсных частиц в потоке.}$$

6.2. Мольные скорости реакций образования нитрида (рассчитаны на единицу площади поверхности):

$$W_{N,V} = k_{N,V} \frac{P_N - P_N^e}{RT_g} \text{ – на поверхности ультрадисперсных частиц}$$

в потоке.

6.3. Константы скорости реакций окисления и азотирования:

$$k_{ox1i} = \frac{1}{6} U_{ox,i} \beta_i \varphi_1 \text{ – на свободной поверхности;}$$

$$k_{ox2i} = \frac{1}{6} U_{ox,i} (1 - \beta_i) \varphi_2 \text{ – на окисленной поверхности;}$$

$k_{ox,V} = \frac{1}{6} U_{ox} \varphi_2$  – окисления на поверхности ультрадисперсных частиц

в потоке;

$k_{N,V} = \frac{1}{2} U_{N,V} \varphi_N$  – азотирования на поверхности ультрадисперсных частиц

в потоке.

Здесь  $U_{ox,i}$ ,  $U_{ox}$  – средние скорости молекул кислорода у поверхности частиц и в потоке;  $U_{N,V}$  – средняя скорость молекул азота в объеме потока;  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_N$  – коэффициенты эффективности соударений в химических реакциях (коэффициенты аккомодации) – на поверхности алюминия и оксида, на поверхности алюминия и нитрида в потоке соответственно;  $\beta_i$  – доля поверхности, свободной от оксида.

6.4. Доля поверхности частиц  $i$ -й фракции, свободной от оксида, в соответствии с допущениями, указанными выше и в работе [1], определяется следующим образом:

$$\beta_i = \begin{cases} A_0 e^{-A_i/T_i}, & T_i < T_{ign,i} < T_{c,f}, \\ 0,5, & T_{ign,i} < T_i \leq T_{c,f}, \\ \frac{\omega_i^{2/3}}{1 + \omega_i^{2/3}}, & T_i > T_{c,f}, \end{cases} \quad (34)$$

где  $\omega_i$  – отношение объемов алюминия и оксида на  $i$ -й частице;  $T_{ign,i}$  – температура воспламенения  $i$ -й частицы;  $T_{c,f}$  – температура плавления оксида.

6.5. Отношение объемов алюминия и оксида на  $i$ -й частице:

$$\omega_i = \frac{(m_{A,i}/m_{A,i}^0)(\rho_{c,i}/\rho_{A,i})}{(m_{c,i}/m_{c,i}^F)(M_c/2M_A)}, \quad (35)$$

где  $M_c$  – молярная масса оксида;  $M_A$  – молярная масса алюминия;  $\rho_c$  – плотность оксида;  $\rho_A$  – плотность алюминия.

Температура воспламенения является функцией радиуса частицы  $r_i$  и мольной доли кислорода в среде  $m_{ox}$ . Вид зависимости  $T_{ign,i}(r_i, m_{ox})$  получается интерполяцией экспериментальных результатов [6].

6.6. Мольные скорости испарения (конденсации) (рассчитаны на единицу площади поверхности):

$$W_{E1i} = \frac{W_{E1i}^K - 2W_{ox2i}}{1+B_1} + 2W_{ox2i} \text{ – алюминия на свободной поверхности;}$$

$$W_{E2i} = \frac{W_{E2i}^K}{1+B_2} \text{ – Al}_2\text{O на окисленной поверхности;}$$

$$W_{E3i} = \frac{W_{E3i}^K}{1+B_3} \text{ – AlO на окисленной поверхности;}$$

$$W_{E,V2} = W_{E,V2}^K \text{ – Al}_2\text{O на поверхности ультрадисперсных частиц;}$$

$$W_{E,V3} = W_{E,V3}^K \text{ – AlO на поверхности ультрадисперсных частиц.}$$

6.7. Кинетические скорости испарения (конденсации):

$$W_{E1i}^K = \frac{1}{4} \alpha_{E1} U_{V1i} \beta_i \frac{p_{V1i}^{e1} - p_{V1}}{RT_i} \text{ – Al на свободной поверхности;}$$

$$W_{E2i}^K = \frac{1}{4} \alpha_{E2} U_{V2i} (1-\beta_i) \frac{p_{V2i}^e - p_{V2}}{RT_i} \text{ – Al}_2\text{O на окисленной поверхности;}$$

$$W_{E3i}^K = \frac{1}{4} \alpha_{E3} U_{V3i} (1-\beta_i) \frac{p_{V3i}^e - p_{V3}}{RT_i} \text{ – AlO на окисленной поверхности;}$$

$$W_{E,V2}^K = \frac{1}{4} \alpha_{E2} U_{V2} \frac{p_{V2}^e - p_{V2}}{RT_g} \text{ – Al}_2\text{O на поверхности ультрадисперсных}$$

частиц;

$$W_{E,V3}^K = \frac{1}{4} \alpha_{E3} U_{V3} \frac{p_{V3}^e - p_{V3}}{RT_g} \text{ – AlO на поверхности ультрадисперсных}$$

частиц.

Здесь  $B_1$ ,  $B_2$  и  $B_3$  – параметры, характеризующие соотношение между интенсивностью фазового перехода и интенсивностью отвода продуктов испарения от поверхности в среду;  $U_{V1i}$ ,  $U_{V2i}$ ,  $U_{V3i}$ ,  $U_{V1}$ ,  $U_{V2}$ ,  $U_{V3}$ ,  $U_{N,V}$  – средние скорости атомов Al, молекул  $\text{Al}_2\text{O}$ , AlO и молекул азота у поверхности частиц и в потоке соответственно;  $\alpha_{E1}$ ,  $\alpha_{E2}$  и  $\alpha_{E3}$  – коэффициенты испарения (конденсации) Al,  $\text{Al}_2\text{O}$ , AlO и AlN.

### 7. Массовые потоки компонентов и тепла

$$J_{ox}^1 = 1,5M_{ox} \sum_i 4\pi r_i^2 N_i W_{ox,1i} \text{ – кислорода к свободной поверхности частиц;}$$

$$J_{ox}^2 = 1,5M_{ox} \sum_i 4\pi r_i^2 N_i W_{ox,2i} \text{ – кислорода к окисленной поверхности частиц;}$$

$J_{ox}^V = (1,5W_{ox,V} + W_{E,V2} + 0,5W_{E,V3})M_{ox}F_{c,N}^V$  – кислорода к поверхности ультрадисперсных частиц;

$J_{V1}^1 = M_{V1} \sum_i 4\pi r_i^2 N_i W_{E1i}$  – паров Al от свободной поверхности частиц;

$J_{V1}^V = 2M_{V1}W_{ox,V}F_{c,N}^V$  – паров Al к поверхности ультрадисперсных частиц для реакции окисления;

$J_{V1N}^V = M_{V1}W_{N,V}F_{c,N}^V$  – паров Al к поверхности ультрадисперсных частиц для реакции азотирования;

$J_{V2}^2 = M_{V2} \sum_i 4\pi r_i^2 N_i W_{E2i}$  – Al<sub>2</sub>O от окисленной поверхности частиц;

$J_{V3}^2 = M_{V3} \sum_i 4\pi r_i^2 N_i W_{E3i}$  – AlO от окисленной поверхности частиц;

$J_{V2}^V = M_{V2}W_{E,V2}F_{c,N}^V$  – Al<sub>2</sub>O к поверхности ультрадисперсных частиц;

$J_{V3}^V = 2M_{V3}W_{E,V3}F_{c,N}^V$  – AlO к поверхности ультрадисперсных частиц;

$J_N^V = 0,5M_NW_{N,V}F_{c,N}^V$  – азота к поверхности ультрадисперсных частиц;

$J_Q = \sum_i 4\pi r_i^2 N_i \alpha_i (T_i - T_g)(W_{ox,V}Q_{ox,V} + W_{E,V2}Q_{E2V} + W_{E,V3}Q_{E3V} + Q_{N,V}W_{N,V})F_{c,N}^V$  – поток тепла от конденсированной фазы к газу.

Площадь поверхности ультрадисперсных частиц в единице объема потока аэрозвеси  $F_{c,N}^V$  можно выразить через плотности оксида и нитрида в потоке  $\rho_c^V$  и  $\rho_N^V$ , удельную поверхность ультрадисперсных частиц после полного сгорания алюминия  $F_{s,p}$  (которую можно определить в эксперименте по сжиганию аэрозвеси частиц Al) и параметр  $S_{c,N}^V$ , который характеризуют накопление оксида и нитрида в объеме потока в текущий момент времени  $F_{c,N}^V = (\rho_c^V + \rho_N^V)F_{s,p} / (S_{c,N}^V)^{1/3}$ .

### 8. Параметры, характеризующие накопление оксида в текущий момент времени на частицах металла

$S_{c,i} = m_{c,i} / m_{c,i}^F$  – на поверхности частиц Al  $i$ -й фракции;

$S_C = \sum_i S_{c,i} n_i$  – на поверхности всех частиц Al ( $n_i$  – массовая доля частиц  $i$ -й фракции в исходном порошке Al).

**9. Параметры, характеризующие накопление оксида и нитрида в текущий момент времени в объеме потока**

$$S_{c,N}^V = \frac{(\rho_c^V + \rho_N^V)V_g}{\sum_i (4/3)\pi r_{o,i}^3 \rho_A^0 (N_i V_i)_0 \left( \frac{M_c}{2M_A} z_c + \frac{M_N}{M_A} z_N \right)}, \quad (36)$$

где  $z_c$  – доля оксида в ультрадисперсных частицах;  $z_N$  – доля нитрида в ультрадисперсных частицах;  $M_N$  – молярная масса азота.

**10. Определение равновесных значений параметров на поверхности частиц и в объеме потока**

Введем новые параметры – локальные коэффициенты избытка окислителя, который характеризует избыток окислителя у окисленной поверхности частиц  $i$ -й фракции ( $\alpha_{2i}$ ), у поверхности ультрадисперсных частиц в потоке для реакции окисления  $\alpha_V$  и у поверхности ультрадисперсных частиц в потоке для реакции азотирования  $\alpha_{V,N}$ :

$$\begin{aligned} \alpha_{2i} &= (4/3)(J_{ox,i}^s / J_{V1i}^s) = (4/3)(U_{ox,i} / U_{V1i})(p_{ox,i}^s / p_{V1i}^s), \\ \alpha_V &= (4/3)(J_{ox}^{s,V} / J_{V1}^{s,V}) = (4/3)(U_{ox} / U_{V1})(p_{ox} / p_{V1}), \\ \alpha_{V,N} &= 2(J_N^{s,V} / J_{V1}^{s,V}) = 2(U_{N,V} / U_{V1})(p_N / p_{V1}). \end{aligned} \quad (37)$$

Здесь  $U_{V1}$  – средняя скорость паров алюминия в потоке;  $J_{ox,i}^s$ ,  $J_{V1i}^s$ ,  $J_{ox}^{s,V}$ ,  $J_{V1}^{s,V}$ ,  $J_N^{s,V}$ ,  $J_{V1}^{s,V}$  – мольные потоки кислорода, азота и паров алюминия к поверхности частиц  $i$ -й фракции и ультрадисперсных частиц для реакций окисления и азотирования соответственно.

В зависимости от значения локального коэффициента избытка окислителя у частиц и в потоке возможны 3 ситуации:

1. Если  $\alpha_{2i} = 1$  ( $\alpha_V = 1$  и  $\alpha_{V,N} = 1$ ) – ни один из компонентов у поверхности (в потоке) не находится в избытке.
2. Если  $\alpha_{2i} < 1$  ( $\alpha_V < 1$ ,  $\alpha_{V,N} < 1$ ) – у поверхности (в потоке) в избытке пары алюминия.
3. Если  $\alpha_{2i} > 1$  ( $\alpha_V > 1$ ,  $\alpha_{V,N} > 1$ ) – у поверхности (в потоке) в избытке кислород и азот.

Равновесные давления компонентов у поверхности частиц и в потоке зависят от избытка давления кислорода, азота или паров алюми-

ния. Избыточные давления кислорода и паров алюминия у поверхности частиц ( $p_{ox,i}^{sur}$ ,  $p_{V1i}^{sur}$ ) и в потоке ( $p_{ox}^{sur}$ ,  $p_{V1}^{sur}$  и  $p_N^{sur}$ ) определяются через локальные коэффициенты избытка окислителя:

$$\begin{aligned}
 p_{ox,i}^{sur} &= p_{ox,i}^s (1-1/\alpha_{2i}) = p_{ox,i}^s - (3/4)(U_{V1i}/U_{ox,i})p_{V1i}^s, \\
 p_{V1i}^{sur} &= p_{V1i}^s (1-\alpha_{2i}) = p_{V1i}^s - (4/3)(U_{ox,i}/U_{V1i})p_{ox,i}^s, \\
 p_{ox}^{sur} &= p_{ox} (1-1/\alpha_V) = p_{ox} - (3/4)(U_{V1}/U_{ox})p_{V1}, \\
 p_{V1}^{sur} &= p_{V1} (1-\alpha_V) = p_{V1} - (4/3)(U_{ox}/U_{V1})p_{V1}, \\
 p_N^{sur} &= p_N (1-1/\alpha_{V,N}) = p_N - (1/2)(U_{V1}/U_N)p_{V1}.
 \end{aligned}
 \tag{38}$$

Если у окисленной поверхности частиц и в потоке в избытке пары алюминия или стехиометрическое отношение компонентов ( $\alpha_{2i} \leq 1$ ,  $\alpha_V \leq 1$  и  $\alpha_{V,N} \leq 1$ ), то соблюдаются термодинамические соотношения

$$\begin{aligned}
 (p_{V1i}^{sur} + p'_{V1i})^2 (p'_{ox,a,i})^3 &= k_{3i}, \\
 (p_{V1}^{sur} + p'_{V1})^2 (p'_{ox,a})^3 &= k_6, \\
 (p_N^{sur} + p'_{V1})^1 (p'_{N,a})^1 &= k_9,
 \end{aligned}
 \tag{39}$$

где  $p'_{V1i}$ ,  $p'_{V1}$ ,  $p'_{ox,a,i}$ ,  $p'_{ox,a}$ ,  $p'_{N,a}$  – давление паров алюминия, атомарного кислорода и атомарного азота (соответственно над окисленной поверхностью и в потоке), образовавшихся в результате разложения оксида;  $k_{3i}$ , и  $k_6$  и  $k_9$  – константы равновесия химических реакций (3), (6) и (9) соответственно. Давления  $p'_{V1i}$  и  $p'_{ox,a,i}$  (соответственно  $p'_{V1}$  и  $p'_{ox,a}$ ,  $p'_{V1}$  и  $p'_N$ ) связаны стехиометрическим отношением мольных потоков у поверхности:

$$\begin{aligned}
 p'_{V1i} U_{V1i} &= 1,5 p'_{ox,a,i} U_{ox,a,i}, \\
 p'_{V1} U_{V1} &= 1,5 p'_{ox,a} U_{ox,a}, \\
 p'_{V1} U_{N,V} &= (1/2) p'_N U_N,
 \end{aligned}
 \tag{40}$$

где  $U_{ox,a,i}$ ,  $U_{ox,a}$ ,  $U_N$  – средние скорости атомов кислорода у поверхности частиц, средние скорости атомов кислорода и азота в потоке.

Решив трансцендентные уравнения (40) относительно  $p'_{V1i}$  и  $p'_{V1}$ , можно определить равновесные давления паров Al, атомарного кислорода и атомарного азота у окисленной поверхности и в потоке:



$$\begin{aligned}
 p_{V1i}^{e2} &= p_{v1i}^{sur} + p'_{V1i}, & p_{ox,a,i}^e &= p'_{ox,a,i} = (2/3)(U_{V1i}/U_{ox,a,i})p'_{V1i}, \\
 p_{V1}^e &= p_{V1}^{sur} + p'_{V1}, & p_{ox,a}^e &= p'_{ox,a} = (2/3)(U_{V1}/U_{ox,a})p'_{V1}, \\
 p_N^e &= p_N^{sur} + p'_{V1}, & p_N^e &= p'_N = (1/2)(U_{V1}/U_N)p'_{V1}.
 \end{aligned} \tag{41}$$

Равновесные давления кислорода  $p_{ox,i}^e$  и  $p_{ox}^e$  и азота  $p_N^e$  легко определяются через равновесные давления атомарного кислорода и атомарного азота:

$$p_{ox,i}^e = 0,5 p_{ox,a,i}^e, p_{ox}^e = 0,5 p_{ox,a}^e, p_{N_2}^e = 0,5 p_{N,a}^e. \tag{42}$$

Равновесные давления молекулярного кислорода у поверхности частиц ( $p_{ox,m,i}^e$ ) и в потоке ( $p_{ox,m}^e$ ) в этом случае равны 0.

Если у окисленной поверхности частиц и в потоке в избытке кислород и азот ( $\alpha_{2i} > 1$ ,  $\alpha_V > 1$ ,  $\alpha_{V,N} > 1$ ), то соблюдаются термодинамические соотношения

$$\begin{aligned}
 (p'_{V1i})^2 (p'_{ox,a,i} + p_{ox,a,i}^{sur})^3 &= k_{3i}, \\
 (p'_{V1})^2 (p'_{ox,a} + p_{ox,a}^{sur})^3 &= k_6, \\
 (p'_{V1})(p'_N + p_N^{sur}) &= k_9,
 \end{aligned} \tag{43}$$

где  $p_{ox,a,i}^{sur}$ ,  $p_{ox,a}^{sur}$  и  $p_N^{sur}$  – избыток давления атомарного кислорода (соответственно над окисленной поверхностью и в потоке) и атомарного азота в потоке определяется через  $p_{ox,i}^{sur}$ ,  $p_{ox}^{sur}$  и  $p_{N_2}^{sur}$  с помощью термодинамического соотношения, связывающего давления атомарного и молекулярного кислорода. Решив уравнения (43) относительно  $p'_{ox,a,i}$  и  $p'_N$ , получим, как и в предыдущем случае, значения равновесных давлений  $p_{ox,a,i}^e$ ,  $p_{ox,a}^e$ ,  $p_{V1i}^{e2}$ ,  $p_{V1}^e$ ,  $p_{ox,m,i}^e$ ,  $p_{ox,m}^e$ ,  $p_{ox,i}^e$ ,  $p_{ox}^e$ ,  $p_N^e$ .

Равновесное давление Al на свободной поверхности  $p_{V1}^{e1}$  известно из справочной литературы, а равновесные давления  $Al_2O$  и  $AlO$  на окисленной поверхности  $p_{V2i}^e$ ,  $p_{V3i}^e$  и в потоке  $p_{V2}^e$ ,  $p_{V3}^e$  определяются через равновесные давления алюминия и атомарного кислорода ( $p_{V1i}^{e2}$  и  $p_{ox,a,i}^e$  – на окисленной поверхности,  $p_{V1}^e$  и  $p_{ox,a}^e$  – в потоке) с помощью известных термодинамических соотношений. Определив скоро-

сти химических реакций и испарения, можно рассчитать интенсивности массо- и теплообмена между газовой и конденсированной фазами в единице объема аэрозвеси.

Давление компонентов у поверхности частиц определяется путем сложения кинетического и диффузионного сопротивлений. При определении давления кислорода  $p_{ox,i}^s$  и паров алюминия  $p_{V1i}^s$  у поверхности частиц необходимо учесть выделение кислорода при испарении  $Al_2O$  и  $AlO$  с окисленной поверхности и поглощение паров  $Al$  при реакции образования оксида на окисленной поверхности.

### 11. Коэффициенты переноса

Коэффициенты переноса (теплопроводности, диффузии, вязкости) определялись для средних температур газовой смеси вокруг горящих частиц металла так же, как и в модели одиночной частицы [1]:

$$\lambda_i = \lambda_i(\bar{T}_i), \quad D_{jk}^i = D_{jk}^i(\bar{T}_i), \quad \mu_i = \mu_i(\bar{T}_i), \quad (44)$$

где  $\bar{T}_i = (T_i + T_g)/2$ .

Коэффициенты переноса определены в соответствии с данными, приведенными в справочнике [7]. Значения теплот плавления, испарения и химических реакций, удельных теплоемкостей компонентов при постоянном давлении, константы равновесия определены в соответствии с данными справочника [8].

### Методика расчета

При разработке алгоритма решения задачи должны использоваться численные методы интегрирования дифференциальных уравнений. Исходный порошок алюминия по размерам частиц разбивается на несколько монофракций.

Система обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка (10)–(26) интегрируется методом Рунге–Кутты IV порядка точности по продольной координате потока  $x$ . Интегрирование выполняется от нулевой координаты  $x_0$  до  $x_F$ , которая соответствует моменту окончания горения всех частиц  $Al$

$$\sum_i (m_i / m_i^0) n_i \leq \delta, \quad (45)$$

где  $n_i$  – массовая для  $i$ -й фракции;  $\delta$  – малое число (в данных расчетах  $\delta = 0,001$ ).

Отдельная  $i$ -я фракция считается выгоревшей, если ее полнота сгорания  $\varphi_{com,i} \geq 0,999$ .

$$\varphi_{com,i} = 1 - m_{Al,i} / m_{Al,i}^0 \quad (46)$$

В этом случае на поверхности частиц этой фракции скорости реакций  $W_{oxli}$  и испарения алюминия  $W_{Eli}$  считаются равными нулю. Масса свободного алюминия в оксидном остатке, оставшемся от сгоревшей частицы, тоже равна нулю. Но уравнения баланса энтальпии, массы оксида, массы нитрида, движения оксидных остатков, уравнения сохранения числа оксидных остатков продолжают численно интегрироваться до конца расчета.

При интегрировании наряду с прочими параметрами дополнительно вычислялись:

– время пребывания в потоке частиц  $i$ -й фракции

$$\tau_i = \int_0^x \frac{dx}{V_i},$$

– время пребывания в потоке выделенного объема газа

$$\tau_g = \int_0^x \frac{dx}{V_g},$$

– температура заторможенного потока газа

$$T_g^* = T_g [1 + (k-1)M^2 / 2],$$

– давление заторможенного потока газа

$$p^* = p [1 + (k-1)M^2 / 2]^{\frac{k}{k-1}}.$$

Интегрирование системы (10)–(26) дает возможность определить к моменту окончания горения долю оксида, накопившегося на частицах Al  $i$ -й фракции  $\sigma_i$ , на всех частицах –  $\sigma$ , долю ультрадисперсных частиц в объеме потока аэровзвеси  $\sigma_V$ ; описать изменение характерных параметров в процессе горения, установить особенности механизма горения частиц алюминия с учетом реакции азотирования с определением количества оксида и нитрида в продуктах сгорания.

**Доля оксида, накопившегося к моменту окончания горения**

$\sigma_i = S_{Ci} |_{t = t_{com}}$  – на поверхности частицы  $i$ -й фракции;

$\sigma = S_C |_{t = t_{com}}$  – на поверхности всех частиц.

**Доля ультрадисперсных частиц, накопившихся к моменту окончания горения в объеме потока**

$$\sigma_V = S_C^V + S_N^V |_{t = t_{com}}.$$

Для упрощения расчетов приняли равными эффективности соударений в химических реакциях как на поверхности алюминия, так и на поверхности оксида,  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_s$ .

Значение  $\varphi_s$  можно принять равным 0,1, так как при таком значении лучше согласуются результаты расчетов с результатами эксперимента [1].

В результате экспериментов по сжиганию аэрозвеси частиц Al в экспериментальной установке [1, 9] был получен ультрадисперсный порошок  $Al_2O_3$  ( $d < 0,5$  мкм), пробы которого подвергались дисперсному анализу, который позволил определить удельную поверхность  $F_{s,p}$ . В расчетах величину  $F_{s,p}$  будем принимать равной  $14 \text{ м}^2/\text{г}$ .

Значения коэффициентов аккомодации  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  и коэффициента испарения  $Al_2O$  с поверхности оксида  $\alpha_{E2}$ , естественно, требуют уточнения (должны определяться из экспериментов). Кинетические ограничения скоростей процессов должны сохраняться и при предельных значениях коэффициентов аккомодации и испарения.

**Заключение**

1. Разработана математическая модель горения высокоскоростного потока полидисперсной переобогащенной аэрозвеси частиц алюминия, учитывающая кинетику и неравновесную термодинамику процессов горения, особенности накопления оксида на поверхности частиц и оксида и нитрида – в объеме потока. Модель предназначена для численного исследования и анализа динамических процессов горения аэрозвесей алюминия в околзвуковых и сверхзвуковых потоках, при пониженных давлениях с учетом одновременного образования оксида и нитрида металла в условиях, при которых нельзя пренебречь кинетическими ограничениями скоростей процессов.

2. Использование представленной модели позволит рационально проектировать двигательные и технологические установки: выполнять оценку совершенства разрабатываемых технических решений с точки зрения возможности их реализации в заданных пределах изменения величины параметров внутрикамерных процессов и габаритов элементов конструкции [1, 10].

3. Главные направления дальнейшего развития исследований:

– доработка программы расчета процессов горения и течения металловоздушной смеси с целью учета реакции азотирования;

– проведение вариантных расчетов с различными коэффициентами соударений, которые должны получаться на основании экспериментальных данных;

– сравнение данных моделирования с данными термодинамических расчетов для подтверждения адекватности модели: определение равновесных значений температуры газовой фазы, молекулярной массы смеси, газовой постоянной, доли конденсированной фазы, доли оксида и нитрида в продуктах сгорания;

– точное определение коэффициентов аккомодации (эффективности соударений) по данным независимых экспериментов;

– расчет конкретных задач (определение параметров металловоздушной смеси при конкретных начальных условиях).

### Библиографический список

1. Малинин В.И. Внутрикамерные процессы в установках на порошкообразных металлических горючих. – Екатеринбург; Пермь: Изд-во УрО РАН, 2006. – 262 с.

2. Роль реакции азотирования в распространении пламени по переобогащенным металловоздушным смесям / Д.А. Ягодников, А.В. Сухов, В.И. Малинин, И.М. Кирьянов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. – 1990. – № 1. – С. 121–124.

3. Модель горения частицы алюминия с учетом кинетического фактора / И.М. Кирьянов, В.И. Малинин, Е.И. Котельникова, А.В. Сухов // Химическая физика. – 1990. – Т. 9, № 12. – С. 1606–1610.

4. Malinin V.I., Kolomin Ye.I., Antipin I.S. A Combustion model for a high-velocity flow of suspended aluminum particles taking into account the kinetics of the processes and peculiarities of oxide // Chem. Phys. Reports. – 1998. – Vol. 17(10). – P. 1909–1926.

5. Гремячкин В.М., Истратов А.Г., Лейпунский О.И. Модель горения мелких капель металла с учетом образования конденсированной окиси // Горение и взрыв. – М.: Наука, 1977. – С. 329–334.

6. Гуревич М.А., Лапкина К.И., Озеров Е.С. Предельные условия воспламенения частицы алюминия // Физика горения и взрыва. – 1970. – Т. 6, № 2. – С. 172–176.

7. Физические величины: справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 563 с.

8. Термодинамические свойства индивидуальных веществ / под ред. В.П. Глушко. – М.: Наука, 1981. – Т. 3, кн. 2. – 400 с.

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

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

### References

1. Malinin V.I. Vnutrikamernye protsessy v ustanovkakh na poroshkoobraznykh metallicheskih goryuchikh [Work processes in the combustion chambers in installations on the powder fuel]. Ekaterinburg-Perm: Uralskoe otdelenie rossiyskoy akademii nauk, 2006. 262 p.

2. Yagodnikov D.A., Sukhov A.V., Malinin V.I., Kiryanov I.M. Rol reaktsii azotirovaniya v rasprostraneni plameni po pereobogashchennym metallovozdushnym smesyam [The role of nitration reaction in the flame spreading on overrich mixtures of metals and air]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baumana. Mashinostroenie*, 1990, no. 1, pp. 121-124.

3. Kiryanov I.M., Malinin V.I., Kotelnikova E.I., Sukhov A.V. Model gorenija chastitsy alyuminiya s uchetom kineticheskogo faktora [Model of aluminium particle combustion taking into account kinetic factor]. *Khimicheskaya fizika*, 1990, vol. 9, no. 12, pp. 1606-1610.

4. Malinin V.I., Kolomin Ye.I., Antipin I.S. A Combustion model for a high-velocity flow of suspended aluminum particles talking into account the kinetics of the processes and peculiarities of oxide. *Chem. Phys. Reports*, 1998, vol. 17(10), pp.1909-1926.

5. Gremyachkin V.M., Istratov A.G., Leypunskiy O.I. Model gorenija melkikh kapel metalla s uchetom obrazovaniya kondensirovannoy okisi [Model of combustion of fine aluminium droplets taking into account formation of condensed oxide]. *Gorenje i vzryv*. Moscow: Nauka, 1977. pp. 329-334.

6. Gurevich M.A., Lapkina K.I., Ozerov E.S. Predelnye usloviya vosplamneniya chastitsy alyuminiya [Ignition limits of aluminum particles]. *Fizika gorenija i vzryva*, 1970, vol. 6, no. 2, pp. 172-176.

7. Fizicheskie velichiny: Spravochnik [Physical magnitudes: Reference book]. Eds. I.S. Grigoryev, E.Z. Meylikhov. Moscow: Energoatomizdat, 1991. 563 p.

8. Termodinamicheskie svoystva individualnykh veshchestv [Thermodynamic properties of individual substance]. Ed. V.P. Glushko. Moscow: Nauka, 1981, vol. 3, book 2. 400 p.

9. Malinin V.I., Kolomin E.I., Antipin I.S. Vosplamnenie i gorenje aerovzvesi alyuminiya v reaktore vysokotemperaturnogo sinteza poroshkoobraznogo oksida alyuminiya [Ignition and combustion of aluminum-air suspensions in a reactor for high-temperature synthesis of alumina powder]. *Fizika gorenija i vzryva*, 2002, vol. 38, no. 5, pp. 525-534.

10. Kryukov A.Yu. Adaptatsiya vnutrikamernykh protsessov i elementov konstruksii energoustanovok na poroshkovom goryuchem k tekhnologiyam polucheniya ultra- i nanodispersnykh materialov [Adaptation of work processes in the combustion chambers and construct features of energy installations on the powder fuel to techniques of ultrafine and nanoscale materials manufacture]. Permskiy natsionalnyy issledovatel'skiy politekhnicheskiy universitet, 2011. 236 p.

### Об авторах

**Крюков Алексей Юрьевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: alexkryukov@list.ru).

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

### **About the authors**

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

**Malinin Vladimir Ignatyevich** (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., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: malininvi@mail.ru).

Получено 21.01.2014