

DOI: 10.15593/2224-9982/2019.56.01

УДК 541.1; 51-74

**А.Ю. Крюков, В.И. Малинин**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

## **РАСЧЕТ ДИНАМИКИ ВЫГОРАНИЯ ПОЛИФРАКЦИОННОЙ АЭРОВЗВЕСИ АЛЮМИНИЯ, УЧИТЫВАЮЩИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СУБОКСИДА АЛО С ПОВЕРХНОСТЬЮ ЧАСТИЦ, НЕ ПОКРЫТОЙ ОКСИДОМ**

Выполнено математическое моделирование горения полифракционной аэровзвеси порошка алюминия АСД-1 с учетом кинетики взаимодействия молекул субоксида АЛО с поверхностью частиц. Произведены расчеты процесса выгорания полифракционной аэровзвеси алюминия порошка АСД-1. Выполнена оценка динамики изменения температуры, доли свободной от оксида поверхности частиц, относительных значений давления субоксидов АЛО,  $Al_2O$ , паров алюминия и кислорода у поверхности частиц в зависимости от доли выгоревшей массы металла. С помощью математического моделирования проведены параметрические исследования и сравнительный анализ параметров и режимов горения на одинаковых стадиях выгорания частиц разных фракций. Также выполнена оценка влияния реакции взаимодействия молекул субоксида АЛО с поверхностью на динамику выгорания частиц. Коэффициент  $\alpha_{E31}$  эффективности соударений молекул АЛО с поверхностью частиц металла (коэффициент аккомодации), обозначающий отношение числа молекул, взаимодействующих с поверхностью, к общему числу молекул, оседающих на нее, принимал значения  $0 \leq \alpha_{E31} \leq 1$ ; коэффициент избытка воздуха принимал значения  $0,5 \leq \alpha \leq 1,0$ , учитывалась неравновесная термодинамика процессов горения. Установлено, что реальные значения  $\alpha_{E31}$  лежат в интервале  $[0, 1]$  и наиболее вероятная величина  $\alpha_{E31} \sim 0,03$ . Полученные результаты позволяют сравнивать параметры и режимы выгорания различных фракций исходного порошка металла, оценивать влияние кинетических факторов на образование субоксидов.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, горение, аэровзвесь, алюминий, динамика выгорания, коэффициент эффективности взаимодействия, субоксид, кинетика реакции.

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

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **COMPUTATION OF DYNAMICS OF POLYFRACTIONAL ALUMINUM AIR-SUSPENSION BURNOUT, WITH TAKING INTO ACCOUNT OF SUBOXIDE ALO INTERACTION WITH PARTICLES SURFACE NOT COVERED BY OXIDE**

Modeling of combustion of polyfractional aluminium powder ASD-1 air-suspension is implemented, with taking into account kinetics of interaction of suboxide ALO molecules with particles surface. Calculations of burnout process of polyfractional aluminium powder ASD-1 air-suspension are carried out. The estimation of dynamics of changes is executed for temperature, part of particles surface free from oxide, relative pressure of suboxide ALO and  $Al_2O$ , aluminium vapor and oxygen near particles surface. The estimation is executed in form of dependencies of mentioned parameters on part of burned out metal mass. Parametric investigations and comparative analysis of parameters and regimes of combustion for the same stage of burning out of different particles fractions are implemented by mathematical modelling. Also evaluation of influence of reaction of suboxide ALO interaction with particles surface on particles burn-out dynamics is done. Coefficient  $\alpha_{E31}$  of ALO molecules impingement efficiency with metal particles surface (accommodation coefficient) possessed the value  $0 \leq \alpha_{E31} \leq 1$ , excess air coefficient possessed the value  $0,5 \leq \alpha \leq 1,0$ . The coefficient  $\alpha_{E31}$  is ratio of ALO molecules number interacting with particle surface to total ALO molecules number settling on the particle. Nonequilibrium thermodynamics of processes is taken into consideration. Real values of  $\alpha_{E31}$  are established to be in the range  $[0, 1]$  and most probable value is  $\alpha_{E31} \sim 0,03$ . The obtained results allow to compare parameters and regimes of burnout of different fractions of metal powder and to estimate influence of kinetic factors on suboxide formation.

**Keywords:** mathematical modelling, combustion, air-suspension, aluminium, burnout dynamics, interaction efficiency coefficient, suboxide, reaction kinetics.

### **Введение**

Математическое моделирование воспламенения и сгорания аэровзвесей металлических порошков, в частности порошков алюминия, имеет большое прикладное значение в проектиро-

вании технологических и энергетических установок на порошкообразном металлическом горючем [1–6].

При этом в расчетах процессов горения необходимо учитывать образование не только основного, конечного продукта реакции – оксида  $Al_2O_3$ , но и промежуточных – субоксидов  $Al_2O$  и  $AlO$ , которые при определенных условиях могут оказывать влияние на образование основного продукта сгорания – оксида  $Al_2O_3$  – через промежуточные реакции на поверхности частиц и в потоке.

Образование субоксидов алюминия учитывается во многих моделях горения алюминия, например в работах [1, 2, 6, 7], где выполнены исследования горения как одиночных частиц [7], так и полифракционных порошков [1, 2, 6].

В частности, в работах [2, 6] проанализировано горение порошка АСД-1 в диапазоне изменения значений коэффициента избытка воздуха  $\alpha = 0,1 \dots 0,5$ . При данном коэффициенте избытка воздуха в основном образуется субоксид  $Al_2O$ , а количество  $AlO$  достаточно мало, и его влияние на физико-химические процессы можно не учитывать. Но при более высоких  $\alpha$  содержание  $AlO$  может быть достаточно велико и его образованием пренебрегать нельзя. Таким образом, представляет интерес процесс моделирования (обобщение работ) при достаточно больших  $\alpha$ .

Процессы образования субоксидов могут идти на поверхности ультрадисперсных частиц оксида, на поверхности частиц металла, покрытой оксидом [6], и на поверхности частиц металла, свободной от оксида, что показывает, например, анализ, проведенный в работе [7].

Следовательно, необходимо было усовершенствовать модель, использованную для анализа процессов горения аэрозвесей алюминия в работах [2, 6] с целью учета реакций взаимодействия субоксида  $AlO$  с поверхностью частиц, что и было выполнено в работе [1]. Преимуществом указанной модели является учет кинетики и неравновесной термодинамики процессов на поверхности частиц металла и в объеме потока, температурной и скоростной неравновесности между частицами и газом.

В работе [7] учтена реакция на поверхности, свободной от оксида, причем расчет выполнен в предположении, что она протекает только в прямом направлении, но в зависимости от термодинамических параметров может иметь место и обратное направление процесса. Кроме того, данная реакция рассмотрена в диффузионном приближении, т.е. не учтено, что число молекул  $AlO$ , попадающих на поверхность частиц, имеет конечное значение: коэффициенты, обозначающие долю молекул  $AlO$ , вступающих в реакцию, от всего количества, попадающего на поверхность, изменяются в диапазоне значений от 0 до 1. В то же время результаты экспериментальных исследований [8–11] показывают, что субоксид  $AlO$  присутствует в продуктах сгорания и его давление вблизи поверхности частиц отличается от 0. Следовательно, необходимо учитывать и кинетические ограничения для реакций взаимодействия  $AlO$  с поверхностью частиц, а также неравновесную термодинамику процессов, протекающих как в прямом, так и в обратном направлении.

Однако большинство авторов ограничиваются анализом, построенным на допущении термодинамического равновесия процессов у поверхности частиц и в окружающем объеме газа [12–14], а также учитывают только конечный продукт – оксид  $Al_2O_3$  – в описании химических реакций [3]. Более же точный анализ горения должен учитывать, по крайней мере, образование не только основного, конечного продукта реакции – оксида  $Al_2O_3$ , но и промежуточных – субоксидов  $Al_2O$  и  $AlO$ , которые выявлены в экспериментальном изучении горения алюминия [8–11]. Они могут оказывать влияние на параметры рабочих процессов в камерах сгорания.

Исходя из изложенного выше целью настоящей работы является анализ горения полифракционной аэрозвеси частиц алюминия с использованием модели [1], позволяющей учитывать реакции взаимодействия  $AlO$  с поверхностью частиц с соответствующими кинетическими ограничениями.

Основные задачи работы следующие:

- уточненный с учетом взаимодействия АЮ с поверхностью частиц расчет динамики процесса выгорания порошкообразного металла;
- расчет динамики изменения значений температуры, доли поверхности, свободной от оксида, значений давления паробразных компонентов у поверхности для частиц различных фракций в процессе выгорания;
- оценка режимов горения в зависимости от размера частиц и динамики изменения термодинамических параметров;
- оценка влияния коэффициентов эффективности взаимодействия АЮ с поверхностью частиц и коэффициента избытка воздуха на динамику изменения термодинамических параметров в процессе выгорания;
- определение реального порядка и величины коэффициента эффективности взаимодействия молекул субоксида АЮ с поверхностью частиц, не покрытой оксидом.

### Физическая модель и химические процессы

Основные положения и допущения соответствуют принятым в модели, описанной в работах [1, 2]. На поверхности частиц алюминия протекают следующие процессы:

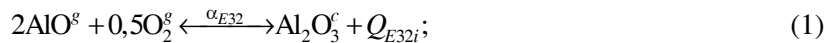
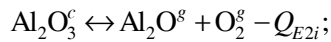
- испарение (конденсация) алюминия на свободной от оксида поверхности (далее по тексту – свободной поверхности):



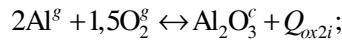
- реакция окисления алюминия на свободной поверхности:



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



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



- реакция взаимодействия субоксида АЮ со свободной поверхностью частиц:



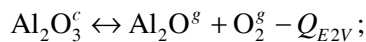
Индексы *c* и *g* обозначают конденсированные и газообразные компоненты соответственно, а  $\alpha_{E31}$  – коэффициент аккомодации (эффективности взаимодействия АЮ со свободной поверхностью), который входит в константу скорости реакции и учитывает долю молекул АЮ, оседающих на поверхность частицы из всего числа молекул, соударяющихся с ней;  $\alpha_{E32}$  – коэффициент аккомодации (эффективности взаимодействия АЮ с окисленной поверхностью).

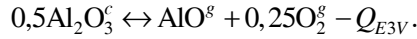
В объеме потока на поверхности частиц ультрадисперсного оксида протекают следующие процессы:

- реакция окисления паров алюминия (разложения) оксида:



- испарение (конденсация) оксида:





При записи реакций процессов приняты следующие обозначения:  $Q_{E1i}$  – теплота испарения алюминия;  $Q_{oxji}$ ,  $Q_{Eji}$  – значения теплоты реакций окисления алюминия и теплоты испарения оксида на поверхности частиц;  $Q_{E31i}$ ,  $Q_{E32i}$  – значения теплоты реакций взаимодействия субоксида AlO со свободной и окисленной поверхностями частиц;  $Q_{oxV}$  – теплота реакции окисления в объеме потока;  $Q_{E2V}$ ,  $Q_{E3V}$  – значения теплоты процессов испарения (конденсации) оксида в объеме потока. 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.

Математическая модель горения потока аэрозвеси алюминия подробно описана в работах [1, 2]. При этом использование реакции (2) требует учета соответствующих скоростей процессов, которые определяются следующим образом.

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

$$W_{E21i} = \frac{W_{E21i}^K}{1 + B_2} \text{ – образование } \text{Al}_2\text{O} \text{ на свободной поверхности;}$$

$$W_{E22i} = \frac{W_{E22i}^K}{1 + B_2} \text{ – образование } \text{Al}_2\text{O} \text{ на окисленной поверхности;}$$

$$W_{E31i} = \frac{W_{E31i}^K}{1 + B_3} \text{ – взаимодействие AlO со свободной поверхностью;}$$

$$W_{E32i} = \frac{W_{E32i}^K}{1 + B_3} \text{ – взаимодействие AlO с окисленной поверхностью.}$$

*Кинетические скорости испарения (конденсации):*

$$W_{E21i}^K = \frac{1}{4} \alpha_{E21} U_{V2i} (1 - \beta_i) \frac{p_{V2i}^e - p_{V2}}{RT_i} \text{ – Al}_2\text{O} \text{ на окисленной поверхности;}$$

$$W_{E22i}^K = \frac{1}{4} \alpha_{E22} U_{V2i} (1 - \beta_i) \frac{p_{V2i}^e - p_{V2}}{RT_i} \text{ – Al}_2\text{O} \text{ на окисленной поверхности;}$$

$$W_{E31i}^K = \frac{1}{4} \alpha_{E31} U_{V3i} \beta_i \frac{p_{V3i}^e - p_{V3}}{RT_i} \text{ – скорость испарения (конденсации) субоксида AlO на}$$

свободной поверхности;

$$W_{E32i}^K = \frac{1}{4} \alpha_{E32} U_{V3i} (1 - \beta_i) \frac{p_{V3i}^e - p_{V3}}{RT_i} \text{ – скорость испарения (конденсации) субоксида AlO}$$

на окисленной поверхности.

Полагаем равными скорости прямой и обратной реакций (1) и (2) так же, как и в модели [2]. Также считаем, что скорость реакций  $W_{E31i} = W_{E21i}$ .

Здесь  $B_1$ ,  $B_2$  и  $B_3$  – параметры, характеризующие соотношение между интенсивностью фазового перехода и интенсивностью отвода продуктов испарения от поверхности в среду;  $U_{V1i}$ ,  $U_{V2i}$ ,  $U_{V3i}$ ,  $U_{V1}$ ,  $U_{V2}$ ,  $U_{V3}$  – средние скорости атомов Al, молекул Al<sub>2</sub>O, AlO у поверхности частиц и в потоке;  $\alpha_{E1}$ ,  $\alpha_{E21}$  и  $\alpha_{E22}$ ,  $\alpha_{E31}$  и  $\alpha_{E32}$  – коэффициенты испарения (конденсации) Al, Al<sub>2</sub>O, AlO соответственно; полагаем  $\alpha_{E21} = \alpha_{E31}$  и  $\alpha_{E22} = \alpha_{E32}$ .

### Исходные данные, определяемые параметры процессов и методика расчета

Методика расчета аналогична представленной в работах [1, 2, 6]. Система дифференциальных уравнений, описывающих физико-химические процессы горения, интегрируется по

продольной координате потока, при проведении параметрических исследований определяются зависимости термодинамических параметров от выбранного показателя динамики выгорания, величины, определяющей интенсивность взаимодействия субоксида AlO с поверхностью частиц (коэффициента аккомодации  $\alpha_{E31}$ ), коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  и размера частиц.

Исследования процессов горения выполнены для промышленного порошка алюминия марки АСД-1 в диапазоне изменения значений коэффициента избытка воздуха  $\alpha = 0,5...1,0$ ; коэффициенту  $\alpha_{E31}$  придавали два крайних значения 0 и 1 с целью показать качественные отличия результатов расчетов с применением реакции (2) и при ее отсутствии, а также определить предельные значения содержания AlO у поверхности частиц и оценить необходимость ввода реакции (2) в математическую модель. Общее давление смеси  $p$  принималось равным 0,25 МПа, так как это соответствует давлению в камерах сгорания технологических установок получения ультрадисперсных материалов [2]. Остальные исходные данные для расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Начальные значения параметров

Параметр	Дисперсная фаза										Газовая фаза
	Номер воспламеняющейся фракции $i$										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Массовая доля фракций	0,05	0,05	0,1	0,15	0,15	0,15	0,1	0,1	0,1	0,05	–
Радиус частиц, мкм	2,6	4,2	5,7	8,0	11,0	14,2	18,0	22,0	26,5	31,2	–
Температура, К	1250	300	300	300	300	300	300	300	300	300	1250
Скорость, м/с	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	20

Сравнивать динамику горения частиц разных фракций по зависимостям параметров от времени непосредственно достаточно сложно, поскольку значения времени горения частиц мелких и крупных фракций отличаются на 2–3 порядка. Ввиду этого предлагается анализировать динамику выгорания по изменению параметров горения в зависимости от доли выгоревшей массы частиц металла  $\eta_{Al}$ , которая определяется текущей массой частиц  $i$ -й фракции  $m_{Al_i}$  и начальной массой частиц  $i$ -й фракции  $m_{Al_i}^0$ :  $\eta_{Al} = 1 - m_{Al_i} / m_{Al_i}^0$ .

В зависимости от параметра  $\eta_{Al}$  рассчитана динамика изменения значений температуры частиц отдельных фракций, доли свободной от оксида поверхности частиц, относительных значений давления субоксидов AlO, Al<sub>2</sub>O, паров алюминия и кислорода у поверхности частиц.

### Результаты расчетов

Результаты исследований представлены на рис. 1–4. На всех рисунках индекс  $i$  – номер фракции исходного порошка (на рис. 1 обозначен также цифрами рядом с соответствующими графиками), индекс  $s$  – значение параметра у поверхности частиц.

На рис. 1 отражена динамика выгорания аэровзвеси без учета реакции (2) ( $\alpha_{E31} = 0$ ). Далее на рис. 2–4 представлены результаты сравнительного анализа выгорания аэровзвеси с учетом и без учета реакции (2). При этом зависимости приведены только для динамики относительных значений давления субоксидов AlO и Al<sub>2</sub>O у поверхности частиц, поскольку учет данной реакции и, соответственно, изменение коэффициента  $\alpha_{E31}$  не должны оказывать существенного влияния на изменение температуры, доли свободной поверхности частиц и относительных значений давления паров металла и кислорода. Графики приведены только для фракций с номерами 5–10, поскольку для мелких частиц указанные значения давления практически равны 0. В расчетах также варьировался и коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ , который, как было установлено ранее [6], также может оказывать заметное влияние на количество субоксидов в смеси.

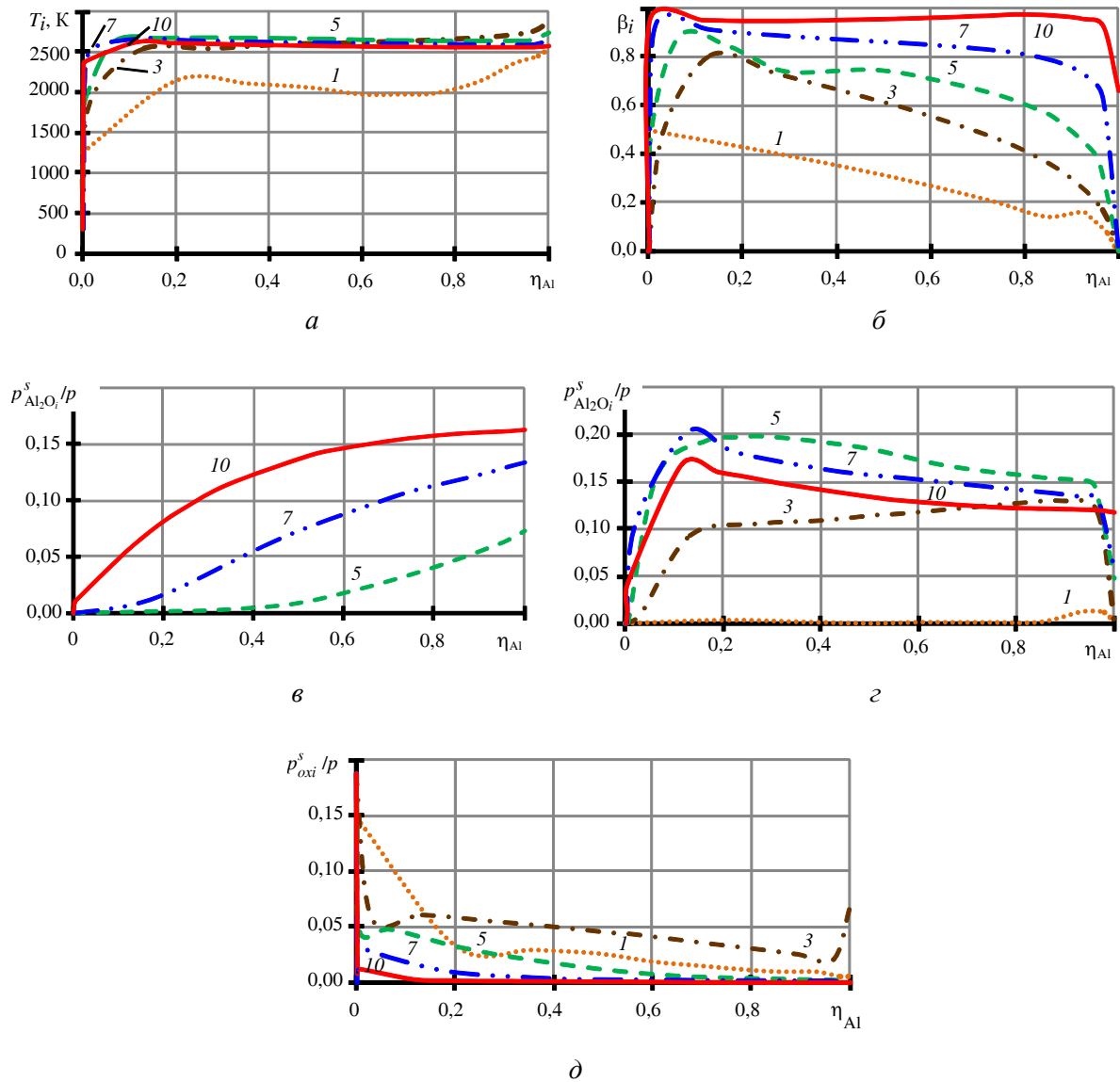


Рис. 1. Динамика выгорания аэрозвеси:  $p = 0,25$  МПа,  $\alpha = 0,5$ ,  $\alpha_{E31} = 0$

На рис. 1, *a* показана зависимость значений температуры частиц от  $\eta_{Al}$ . Температура частиц мелких фракций 1–3 ниже, чем температура частиц крупных фракций на одинаковых стадиях выгорания. Значения температуры частиц крупных фракций не сильно отличаются друг от друга, при прогреве и до воспламенения их температура возрастает, далее же изменяется достаточно мало. Для частиц фракций 5–10 практически обеспечивается квазистационарный режим горения. В конце выгорания значения температуры частиц всех фракций возрастают, приближаясь к температуре газа.

На рис. 1, *б* показана зависимость доли поверхности частиц, свободной от оксида  $\beta$ , от  $\eta_{Al}$ . Для частиц мелких фракций 1, 2  $\beta$  везде меньше 0,5, для 3-й фракции  $\beta$  сначала возрастает до величины 0,8 и затем быстро уменьшается. Для более крупных фракций, начиная с 5-й, существенная доля поверхности частиц (от 75 до 97 %) остается свободной в течение большей части процесса выгорания. Можно сделать вывод, что чем крупнее частицы, тем больше значение  $\beta$  на одинаковых стадиях выгорания. При этом величина  $\beta$  для крупных частиц уменьшается медленнее, чем для частиц мелких фракций. Для частиц же самой крупной фракции практически обеспечивается квазистационарный режим выгорания.

На рис. 1, в–д представлены зависимости относительных значений давления газообразных компонентов у поверхности частиц от  $\eta_{Al}$ . Показаны значения давления субоксида  $Al_2O$ , Al и кислорода в зависимости от  $\eta_{Al}$ . Значения давления субоксида  $Al_2O$  (см. рис. 1, в) отражены только для фракций с номерами 5–10, поскольку для мелких частиц они практически равны 0. По мере выгорания давление  $Al_2O$  возрастает. При этом чем меньше размер частиц, тем меньше давление  $Al_2O$  у поверхности. Давление паров Al (см. рис. 1, з) для мелких частиц (фракции 1, 2) также практически равно 0, т.е. они горят в гетерогенном режиме. Начиная с 3-й фракции имеет место режим парофазного горения (давление паров алюминия отличается от 0), который выражен достаточно сильно для средних и крупных фракций. Для крупных частиц давление кислорода у поверхности (см. рис. 1, д) близко к 0, что показывает парофазный режим их горения, для частиц же мелких фракций давление кислорода у поверхности существенно отличается от нуля, они горят в гетерогенном режиме.

Результаты исследований, отраженные на рис. 1, показывают следующее.

1. Мелкие частицы горят в нестационарном режиме, а частицы крупных фракций сгорают в квазистационарном режиме. Значения температуры частиц всех фракций в конце процесса выгорания стремятся к температуре газа.

2. Для частиц мелких фракций доля поверхности частиц, свободной от оксида, составляет менее 50 %, у крупных же частиц почти вся поверхность свободна от оксида.

3. Давление всех парообразных компонентов ( $Al_2O$ , Al), кроме кислорода, у поверхности мелких частиц (фракции 1, 2) близко к 0, что является показателем того, что эти частицы горят в гетерогенном режиме.

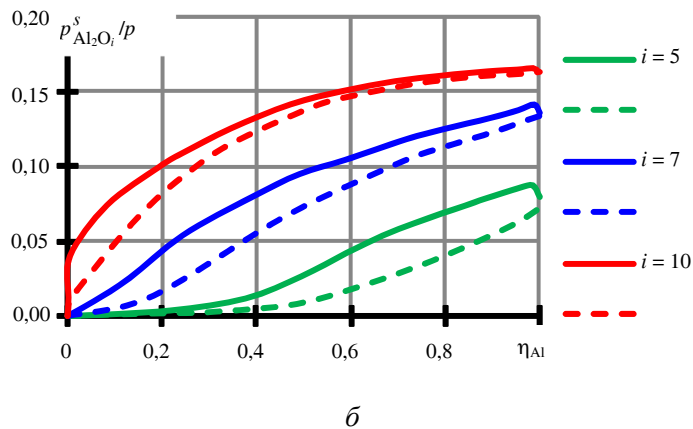
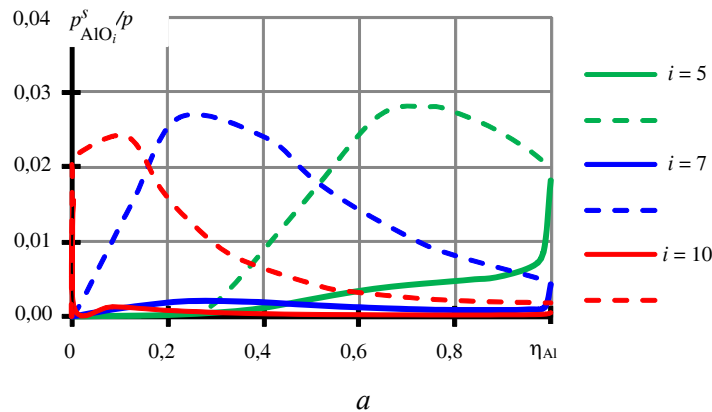


Рис. 2. Зависимость динамики выгорания аэровзвеси от  $\alpha_{E31}$  для относительного давления у поверхности субоксидов AlO (а) и  $Al_2O$  (б):  $p = 0,25$  МПа,  $\alpha = 0,5$ , штриховые линии –  $\alpha_{E31} = 0$ , сплошные линии –  $\alpha_{E31} = 1$

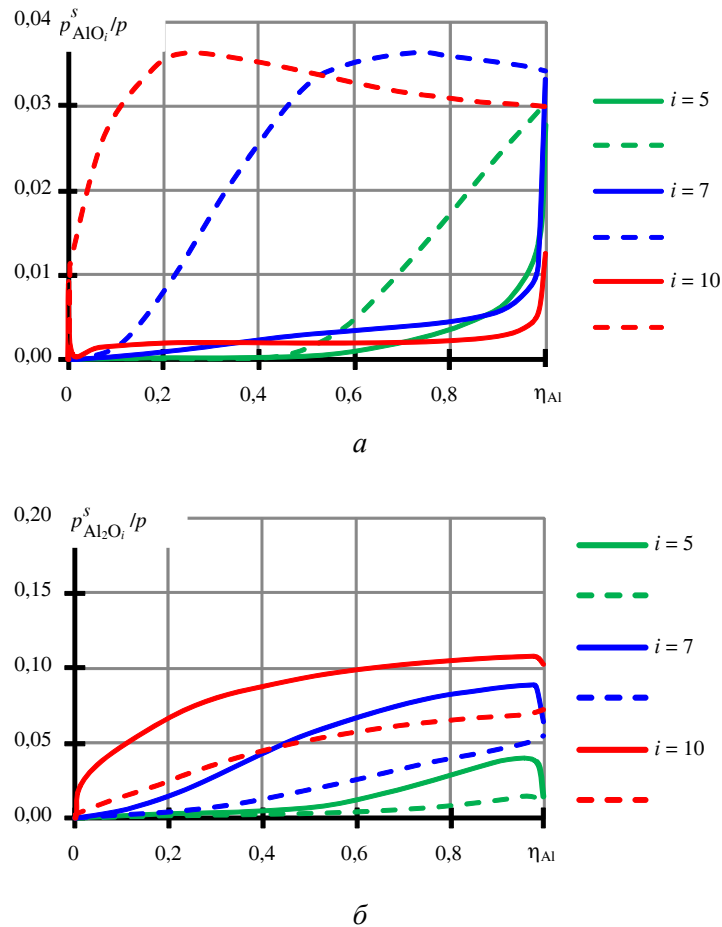


Рис. 3. Зависимость динамики выгорания аэровзвеси от  $\alpha_{E31}$  для относительного давления у поверхности субоксидов AlO (а) и Al<sub>2</sub>O (б):  $p = 0,25$  МПа,  $\alpha = 0,7$ , штриховые линии –  $\alpha_{E31} = 0$ , сплошные линии –  $\alpha_{E31} = 1$

На основании сравнительного анализа динамики выгорания (см. рис. 2–4) можно сделать следующие заключения.

1. При коэффициенте  $\alpha_{E31} = 1$  давление AlO у поверхности частиц почти весь период сгорания частиц близко к 0 для всех значений  $\alpha$  и возрастает только в конце процесса горения, приближаясь к значениям давления при  $\alpha_{E31} = 0$  (см. рис. 2, а; рис. 3, а; рис. 4, а). Это связано с тем, что горение идет в диффузионном режиме – с большими диффузионными ограничениями химической реакции (2). Это характерно не только для крупных частиц, но и для мелких, причем данная особенность для крупных частиц выражена в большей степени, т.е. чем меньше частица, тем выше давление AlO у ее поверхности.

2. При низком значении  $\alpha$  имеет место максимум для кривых динамики изменения относительного давления субоксида AlO (см. рис. 2, а). При этом чем меньше размер частицы, тем на более поздние стадии выгорания приходится максимум давления AlO. При горении крупных частиц максимум субоксида образуется в начале процесса. С увеличением  $\alpha$  различия между значениями давления AlO, полученными с учетом реакции (2) и без ее учета, уменьшаются, но возрастают их абсолютные значения.

3. С учетом реакции (2) при  $\alpha_{E31} = 1$  значения давления субоксида Al<sub>2</sub>O у поверхности частиц выше, чем при  $\alpha_{E31} = 0$ . При этом давление Al<sub>2</sub>O возрастает с уменьшением коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  (см. рис. 2, б; рис. 3, б; рис. 4, б).

Сравнивая известные экспериментальные данные [8, 9] с результатами настоящей работы, можно отметить, что в указанных исследованиях давление субоксида AlO у поверхности



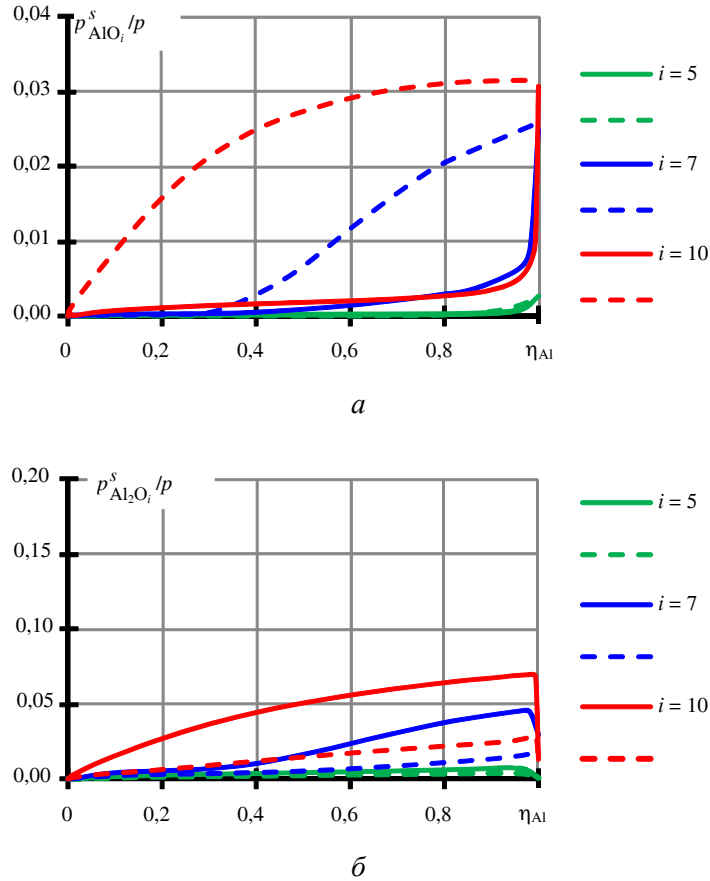


Рис. 4. Зависимость динамики выгорания аэровзвеси от  $\alpha_{E31}$  для относительного давления у поверхности субоксидов AlO (а) и Al<sub>2</sub>O (б):  $p = 0,25$  МПа,  $\alpha = 1,0$ , штриховые линии –  $\alpha_{E31} = 0$ , сплошные линии –  $\alpha_{E31} = 1$

частицы равно примерно половине давления в среде. В таком случае диффузионные ограничения примерно равны кинетическим, поскольку взаимосвязь давления в потоке  $p_{AlO}$  и давления у поверхности частицы  $p_{AlO}^s$  следующая:

$$p_{AlO}^s = \frac{p_{AlO}}{1 + B_3},$$

где  $B_3 = W_{E31i}^K / W_{E31i}^D$ . Здесь  $W_{E31i}^D$  – диффузионная скорость испарения (конденсации) субоксида AlO на свободной поверхности.

Таким образом, по экспериментальным данным [8, 9]  $B_3 \approx 1$ , в представленных же расчетах  $p_{AlO}^s/p_{AlO} \approx 0,1$  (см. рис. 2, а; рис. 3, а; рис. 4, а) и, следовательно,  $B_3 \approx 10$ . Также учтем, что значение  $B_3$  связано с радиусом частиц  $r$  и величиной  $\alpha_{E31}$ :

$$B_3 \sim 2r\alpha_{E31}.$$

Далее оценку реальной величины коэффициента  $\alpha_{E31}$  проведем сопоставлением работ [8, 9] и результатов расчетов, полученных в данной статье для самой крупной фракции ( $r = 30$  мкм), поскольку ее размер наиболее близок к размеру частиц алюминия, используемых в экспериментах ( $r = 115$  мкм). Тогда значение  $B_3$ , соответствующее радиусу частиц 30 мкм, для условий эксперимента можно определить следующим образом:

$$B_3 \sim 30/115 \sim 0,25.$$

С учетом того, что по расчетам настоящей работы  $B_3 \sim 10$ , получим реальный порядок величины  $\alpha_{E31}$ :

$$\alpha_{E31} \sim 0,25 / 10 \sim 0,03.$$

Следовательно, реальные значения коэффициента  $\alpha_{E31}$  будут намного меньше, на 1,5 порядка меньше максимального значения, равного 1.

Здесь определен лишь порядок величины  $\alpha_{E31}$ , поскольку условия расчетов в настоящей работе не совпадали с условием экспериментов [8, 9] по давлению, составу среды и по размеру частиц. Более точно установить величину коэффициента эффективности реакции (2) можно сравнением результатов расчетов при исходных данных, соответствующих указанным экспериментальным исследованиям.

Для условий, при которых проводились расчеты в настоящей работе, образование субоксида AlO можно не учитывать. Поскольку значения давления AlO у поверхности и в потоке при  $\alpha_{E31} = 0$  практически равны, его объемная доля в смеси не превышает 4 % (см. рис. 2, а; рис. 3, а и рис. 4, а). Данный вывод согласуется с результатами работы [6].

Однако в средах, обогащенных кислородом, такой учет может потребоваться. Кроме того, такой учет может потребоваться при расчете горения более тонких мелкодисперсных порошков алюминия, когда основную массу будут составлять мелкие частицы [15], и для них значения относительного давления AlO при реальных значениях  $\alpha_{E31}$  могут быть достаточно высокими.

### Выводы

1. Сравнение и анализ динамики выгорания полифракционной аэрозвеси алюминия показывает, что мелкие частицы ( $r = 3 \dots 6$  мкм) горят гетерогенно, частицы средних фракций ( $r = 8 \dots 14$  мкм) – в переходных режимах, а крупные фракции ( $r = 18 \dots 31$  мкм) – в парофазном режиме.

2. Реальные значения коэффициента эффективности взаимодействия субоксида AlO с поверхностью частиц, не покрытой оксидом,  $\alpha_{E31}$  лежат в интервале [0, 1], и его наиболее вероятная величина  $\alpha_{E31} \sim 0,03$ .

Полученные результаты позволяют сравнивать параметры и режимы выгорания различных фракций исходного порошка металла, оценивать влияние кинетических факторов на образование субоксидов, что дает возможность более детального и полного понимания процессов горения алюминиево-воздушных смесей, расширяя базу возможностей управления составом продуктов сгорания и режимами горения.

### Библиографический список

1. Крюков А.Ю., Малинин В.И. Расчет выгорания полифракционной аэрозвеси алюминия с учетом взаимодействия субоксида AlO с поверхностью частиц // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2018. – № 53. – С. 20–29.
2. Kryukov A.Yu., Malinin V.I. Mathematical modeling of the combustion of an overfueled aluminum-air mixture based on the nonequilibrium thermodynamics of the process // Combustion, Explosion and Shock Waves. – 2018. – Vol. 54, iss. 1. – P. 35–46.
3. Крюков А.Ю., Малинин В.И. Расчет горения полифракционной аэрозвеси частиц алюминия по модели неравновесной термодинамики // Вестник Казанского технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 12. – С. 128–131.
4. Ягодников Д.А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 432 с.
5. Shafirovich E., Varma A. Technology requirements for mars sample return using CO<sub>2</sub>/metal powder propellants // Journal of Propulsion and Power. – 2008. – Vol. 24, no. 3. – P. 385–394.
6. Крюков А.Ю., Малинин В.И. Расчет содержания субоксидов в продуктах сгорания алюминиево-воздушной смеси по модели неравновесной термодинамики // Вестник Пермского национального ис-

следовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2016. – № 1(44). – С. 116–131.

7. Бекстед М.В., Лианг У., Паддуппаккам К.В. Математическое моделирование горения одиночной алюминиевой частицы (обзор) // Физика горения и взрыва. – 2005. – Т. 41, № 6. – С. 15–33.

8. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В. Горение порошкообразных металлов в активных средах. – М.: Наука, 1972. – 149 с.

9. Observations on aluminum particles burning in various oxidizers / P. Bucher, R.A. Yetter, F.L. Dryer [et al.] // 33rd JANNAF Combustion Meeting. V. II. CPIA Publ. – Laurel, MD, 1996. – No. 653. – P. 449–458.

10. Aluminum particle gas-phase flame structure / P. Bucher, R.A. Yetter, F.L. Dryer [et al.] // 34th JANNAF Combustion Meeting. V II. CPIA Pub. – Laurel, MD, 1997. – No. 662. – P. 295–305.

11. Полетаев Н.И., Флорко А.В. Спектральные исследования газового компонента пылевого факела частиц алюминия // Физика горения и взрыва. – 2008. – Т. 44, № 4. – С. 72–79.

12. Золотко А.Н., Полетаев Н.И., Вовчук Я.И. Газодисперсный синтез наночастиц оксидов металлов // Физика горения и взрыва. – 2015. – Т. 51, № 2. – С. 135–143.

13. К теории горения металлических частиц / В.М. Гремячкин, А.Г. Истратов, О.И. Лейпунский // Физические процессы при горении и взрыве. – М.: Атомиздат, 1980. – С. 4–68.

14. Бабук В.А., Васильев В.А., Романов О.Я. Физико-химические превращения капель  $Al-Al_2O_3$  в потоке активного газа // Физика горения и взрыва. – 1993. – Т. 29, № 3. – С. 129–133.

15. Егоров А.Г. Процессы горения порошкообразного алюминия в прямоточных камерах реактивных двигательных установок. – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2004. – 376 с.

#### References

1. Kryukov A.Yu., Malinin V.I. Raschet vygoraniya polifraktsionnoy aerovzvesi alyuminiya s uchetom vzaimodeystviya suboksida  $AlO$  s poverkhnostyu chastits [Computation of burn-out of polyfractional aluminum air-suspension with taking into account of suboxide  $AlO$  interaction with particles surface]. PNRPU Aerospace Engineering Bulletin, 2018, no. 53, pp. 20-29.

2. Kryukov A.Yu., Malinin V.I. Mathematical Modeling of the Combustion of an Overfueled Aluminum–Air Mixture Based on the Nonequilibrium Thermodynamics of the Process. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2018, Vol. 54, Is. 1, pp. 35-46.

3. Kryukov A.Yu., Malinin V.I. Raschet goreniya polifraktsionnoy aerovzvesi chastits alyuminiya po modeli neravnesnoy termodinamiki [Computation of combustion of polyfractional aluminium particles air suspension by model of nonequilibrium thermodynamics]. Bulletin of the Technological University, 2016, Vol. 19, no. 12, pp. 128-131.

4. Yagodnikov D.A. Vosplamneniye i goreniye poroshkoobraznykh metallov [Ignition and combustion of powdery metals]. Moscow: MSTU named by. N.E. Bauman, 2009, 432 p.

5. Shafirovich E., Varma A. Technology Requirements for Mars Sample Return using  $CO_2$ /Metal Powder Propellants. Journal of Propulsion and Power, 2008, Vol. 24, no. 3. pp. 385-394.

6. Kryukov A.Yu., Malinin V.I. Raschet sodержaniya suboksidov v produktakh sgoraniya alyuminiyevovozdushnoy smesi po modeli neravnesnoy termodinamiki [Computation of suboxides in the combustion products of aluminium air mixture by model of nonequilibrium thermodynamics]. PNRPU Aerospace Engineering Bulletin, 2016, no. 44, pp. 116-131.

7. Beksted M.V., Liang U., Paddupakkam K.V. Matematicheskoye modelirovaniye goreniya odinochnoy alyuminiyevoy chastitsy (obzor) [Mathematical modeling combustion of single aluminium particle (review)]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 2005, vol. 41, no. 6, pp. 15-33.

8. Pokhil P.F., Beljaev A.F., Frolov Yu.V. Gorenije poroshkoobraznykh metallov v aktivnykh sredakh [Combustion of powdery metals in active mediums]. Moscow: Nauka, 1972.

9. Bucher P., Yetter R.A., Dryer F.L., et al. Observations on aluminum particles burning in various oxidizers. 33rd JANNAF Combustion Meeting. V. II. CPIA Publ. N 653. Laurel, MD, 1996, P. 449-458.

10. Bucher P., Yetter R.A., Dryer F.L., et al. Aluminum particle gas-phase flame structure. 34th JANNAF Combustion Meeting. V II. CPIA Pub. N 662. Laurel, MD, 1997. P. 295-305.

11. Poletaev N.I., Florko A.V. Spektralnyye issledovaniya gazovogo komponenta pylavogo fakela chastits alyuminiya [Spectral studies of the gas component of an aluminum dust flame]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2015, Vol. 51, Is. 4, pp. 437-443.

12. Zolotko A.N., Poletaev N.I., Vovchuk Y.I. Gazodispersnyy sintez nanochastits oksidov metallov [Gas-disperse synthesis of metal oxide particles]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2015, Vol. 51, Is. 2, pp. 252-268.

13. Gremjachkin V.M., Istratov A.G., Lejpunskij O.I. K teorii gorenija metallicheskih chastits. In book: Fizicheskiye protsessy pri gorenii i vzryve [To the theory of metal particles burning. In book: Physical processes during combustion and explosion]. Moscow.: Atomizdat, 1980. pp. 4-68.

14. Babuk V.A., Vasilev V.A., Romanov O.Ya. Fiziko-khimicheskie prevrashcheniya kapel Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> v potoke aktivnogo gaza [Physicochemical conversion of Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> drops in active gas flow]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 1993, vol. 29, no. 3, pp. 129-133.

15. Egorov A.G. Protsessy gorenija poroshkoobraznogo alyuminiya v pryamotochnykh kamerakh reaktivnykh dvigatelnykh ustanovok [Burning processes of powdery aluminum in straight flow chambers of jet propulsion systems]. Samara: publ. House of Samarskiy nauchnyy tsentr RAS, 2004, 376 p.

#### Об авторах

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

#### About the authors

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

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

Получено 06.12.2018