

DOI: 10.15593/2224-9982/2016.44.07

УДК 541.1:51-74

**А.Ю. Крюков, В.И. Малинин**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

## **РАСЧЕТ СОДЕРЖАНИЯ СУБОКСИДОВ В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ АЛЮМИНИЕВОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ПО МОДЕЛИ НЕРАВНОВЕСНОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ**

Представлены результаты математического моделирования горения полифракционной аэрозвеси алюминия с учетом кинетики химических реакций и неравновесной термодинамики физико-химических процессов. Произведены расчеты содержания субоксидов  $Al_2O$  и  $AlO$  в продуктах сгорания, температуры газовой фазы и объемной доли кислорода в зависимости от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  и времени пребывания  $\tau$  алюминиевовоздушной смеси в камерах сгорания установок на порошкообразном металлическом горючем. Исследования выполнены для  $0,1 \leq \alpha \leq 1,2$  по модели, учитывающей кинетику и неравновесную термодинамику процессов горения. Проанализирована и обоснована необходимость учета образования субоксида  $Al_2O$  в рассматриваемом диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха. Установлено, что объемная доля субоксида  $Al_2O$  на 1–2 порядка превышает долю  $AlO$ . Для предельных значений времени  $\tau \rightarrow \infty$  результаты расчетов неравновесной термодинамики сравнивались с результатами расчетов равновесной, выполненными с использованием программы «Астра». В численных экспериментах в качестве основных исследуемых параметров взяты значения объемных долей субоксидов. В каждый момент времени рассчитывалось их текущее значение и текущее равновесное значение, что позволило оценить действительную степень неравновесности соответствующих физико-химических процессов при реальном времени пребывания реагирующей смеси в камере  $\tau \leq 10$  мс. Анализ всех результатов исследований и их взаимное сопоставление подтверждают корректность описания образования  $Al_2O$  и  $AlO$  и адекватность используемой математической модели. Результаты работы могут быть применены в проектировании соответствующих технологических и энергетических установок для различных условий реализации рабочих процессов.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, горение, аэрозвесь, алюминий, субоксиды, кинетика, равновесная и неравновесная термодинамика, коэффициент избытка воздуха.

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

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **COMPUTATION OF SUBOXIDES IN THE COMBUSTION PRODUCTS OF ALUMINIUM AIR MIXTURE BY MODEL OF NONEQUILIBRIUM THERMODYNAMICS**

The results of mathematical modeling of aluminium air suspension combustion with taking into account of chemical reaction kinetics and nonequilibrium thermodynamics of physical-chemical processes are presented. The calculations of suboxides of  $Al_2O$  and  $AlO$  in the combustion products, tem-

perature of gas phase and inclusion volume fraction of oxygen are implemented according to excess air coefficient  $\alpha$  and residence time  $\tau$  of aluminium air mixture in combustion chambers of units on powder metal fuel. The study are carried out at  $0,1 \leq \alpha \leq 1,2$  according to kinetics and nonequilibrium thermodynamics of burning processes. The necessity of taking into account of suboxide  $Al_2O$  formation in the considered range of excess air coefficient was analyzed and substantiated. It is established that volume fraction of suboxide  $Al_2O$  exceeds  $AlO$  by 1-2 exponents. For  $\tau \rightarrow \infty$  the results of calculations of nonequilibrium thermodynamics are compared with the results of calculations of equilibrium thermodynamics implemented by using of program "Astra". In numerical experiments the inclusion volume fractions of suboxides are taken as main investigated parameters. In every instant of time their current value and equilibrium current value were calculated. The comparison of the values permits to estimate real degree of nonequilibrium of physical-chemical processes at practicable residence time of reactive mixture in the chamber  $\tau \leq 10$  ms. The analysis of all investigation results and their mutual comparison confirm correctness of  $Al_2O$  and  $AlO$  formation description and adequacy of used mathematical model. The outcomes of the work can be applied in the design of appropriate technological and power units for different conditions of operational processes.

**Keywords:** mathematical modeling, combustion, air suspension, aluminium, suboxides, kinetics, equilibrium and nonequilibrium thermodynamics, excess air coefficient.

## Введение

Математическое моделирование воспламенения и сгорания взвесей металлических порошков является актуальным направлением современной теории горения, имеющим большое прикладное значение для анализа внутрикамерных процессов в технологических установках получения ультрадисперсных материалов и в энергоустановках на порошковом металлическом горючем [1–4].

В расчетах процессов горения алюминиевоздушных смесей в камере сгорания технических устройств при определенных условиях нужно учитывать образование не только основного, конечного продукта реакции – оксида  $Al_2O_3$ , но и промежуточных – субоксидов  $Al_2O$  и  $AlO$ , их количество является показателем, например, доли  $Al_2O_3$ , которую возможно получить в ультрадисперсном состоянии.

Образование субоксидов алюминия учитывается во многих моделях, например в работах [5, 6], где выполнены исследования горения одиночных частиц. Однако реальные рабочие процессы в технологических и энергетических установках реализуются при горении промышленных полифракционных порошков металла. Для анализа таких процессов разработана математическая модель, которая учитывает кинетику и неравновесную термодинамику химических реакций на поверхности частиц и в объеме потока, а также температурную и скоростную неравновесность между частицами и газом [7–9].

В представленной работе по результатам математического моделирования произведены расчеты содержания субоксидов в продуктах

сгорания в зависимости от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  и времени пребывания  $\tau$  реагирующей смеси в камере сгорания. Схема физико-химических процессов приведена на рис. 1. При записи процессов приняты следующие обозначения:  $Q_{E1i}$  – теплота испарения Al;  $Q_{oxji}$ ,  $Q_{Eji}$  – теплота реакций окисления алюминия и теплоты испарения  $Al_2O_3$  на поверхности частиц;  $Q_{oxV}$  – теплота реакции окисления в объеме потока;  $Q_{E2V}$ ,  $Q_{E3V}$  – теплоты процессов испарения (конденсации) оксида в объеме потока; индексы:  $j$  – индекс поверхности ( $j = 1$  – свободная поверхность,  $j = 2$  – поверхность, покрытая оксидом);  $i$  – номер фракции;  $E$  – испарение;  $V$  – процессы в объеме потока;  $g$  – газообразные продукты;  $c$  – конденсированная фаза.

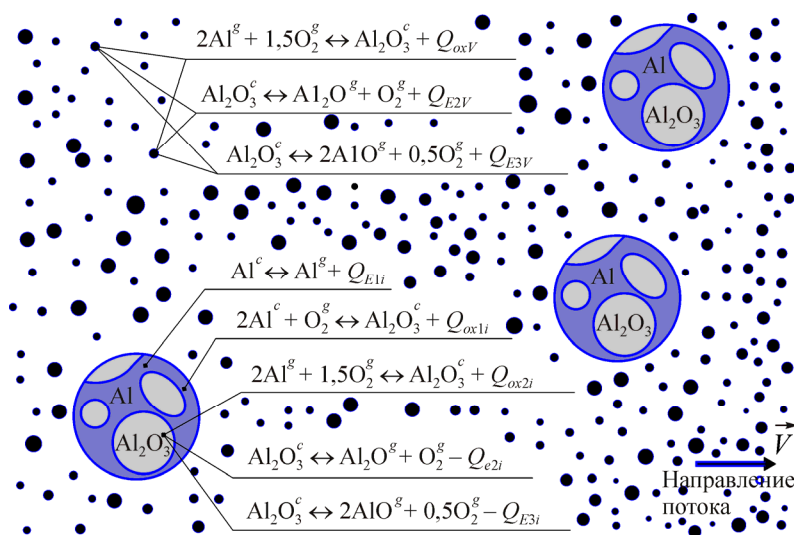


Рис. 1. Схема процессов горения полифракционной аэрозвеси алюминия

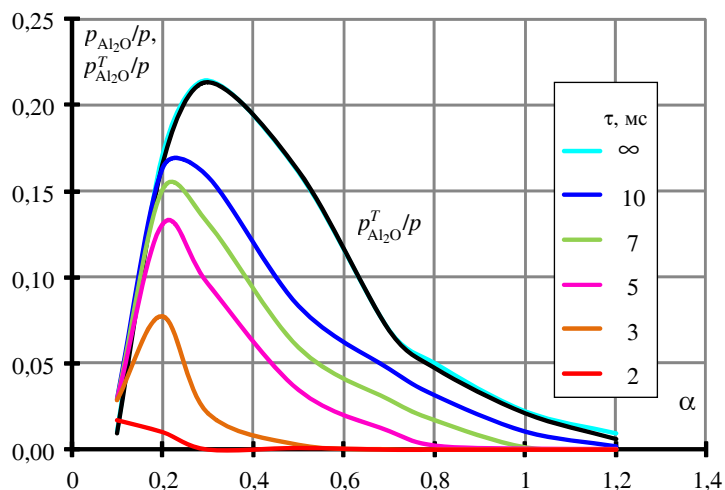
Исследования процессов горения выполнены для значений коэффициента избытка воздуха  $0,1 \leq \alpha \leq 1,2$  с использованием модели неравновесной термодинамики, описанной в работах [6–9], и программы «Астра» [10] для равновесных термодинамических расчетов. Полученные результаты представлены на рис. 2–5. Обозначения на рис. 2–5:  $p = 0,25$  МПа – давление смеси;  $T$  – температура; индексы:  $T$  – термодинамическое значение, рассчитанное по программе «Астра»;  $e$  – текущее равновесное значение, рассчитанное по модели неравновесной термодинамики.

### Определение содержания субоксидов

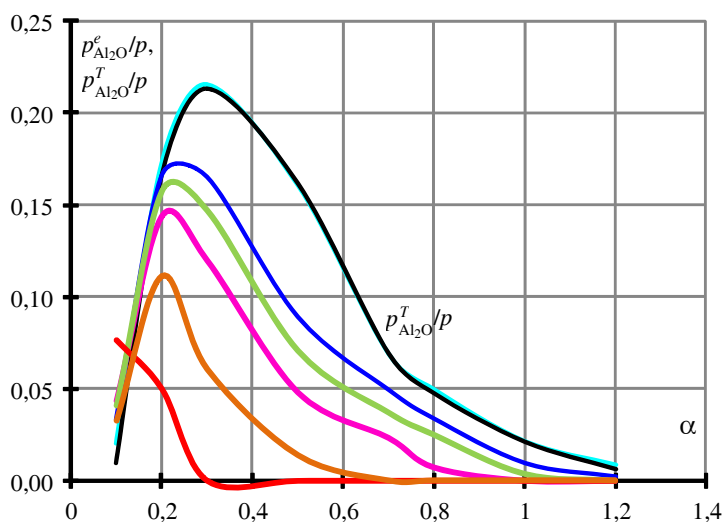
В качестве параметров внутрикамерных процессов, рассчитанных по модели, учитывающей кинетику и неравновесную термодинамику, взяты значения объемных долей субоксидов при длительном времени реализации процессов ( $\tau \rightarrow \infty$ ) и при временах, сравнимых с действительным периодом пребывания реагирующей смеси в камере сгорания ( $\tau \leq 10$  мс). Причем преимущество используемой математической модели [6–9] (и разработанного программного обеспечения соответственно) заключается в том, что в каждый момент времени рассчитывается текущее реальное (неравновесное) значение объемных долей газобразных  $Al_2O$  и  $AlO$  и текущее равновесное значение данных параметров. Появляется возможность сравнивать значения неравновесные и равновесные при действительном времени пребывания реагирующей смеси в камере сгорания и таким образом оценивать динамику степени неравновесности соответствующих физико-химических процессов. Объемные доли компонентов  $r_k$  (в том числе и субоксидов) определялись по отношению парциальных давлений к общему давлению смеси:  $r_k = p_k/p$ .

На рис. 2 представлены зависимости объемной доли субоксида  $Al_2O$  от времени и коэффициента избытка воздуха. Характер зависимостей для неравновесной термодинамики (текущих неравновесных – рис. 2, а) и равновесных значений – рис. 2, б) совпадает. Зависимости имеют экстремальный характер, наибольшие значения содержания субоксида приходятся на диапазон изменения коэффициента избытка воздуха  $0,2 \leq \alpha \leq 0,3$ , причем со временем максимальные для данного текущего времени значения смещаются в область более высоких  $\alpha$  и возрастают по величине. Наибольшее содержание  $Al_2O$ , рассчитанное по неравновесной термодинамике, достигается при  $\alpha \approx 0,3$  и совпадает с рассчитанным по равновесной [10].

Для малого времени пребывания смеси в камере наблюдаются существенные отличия доли  $Al_2O$ , рассчитанной по неравновесной термодинамике, от равновесных термодинамических значений. Причем текущие реальные значения параметра всегда меньше, чем текущие равновесные значения, рассчитанные по неравновесной термодинамике, и значения, рассчитанные по равновесной термодинамике (по программе «Астра»). По мере же развития процесса с течением времени текущие реальные значения параметров приближаются к текущим



*a*



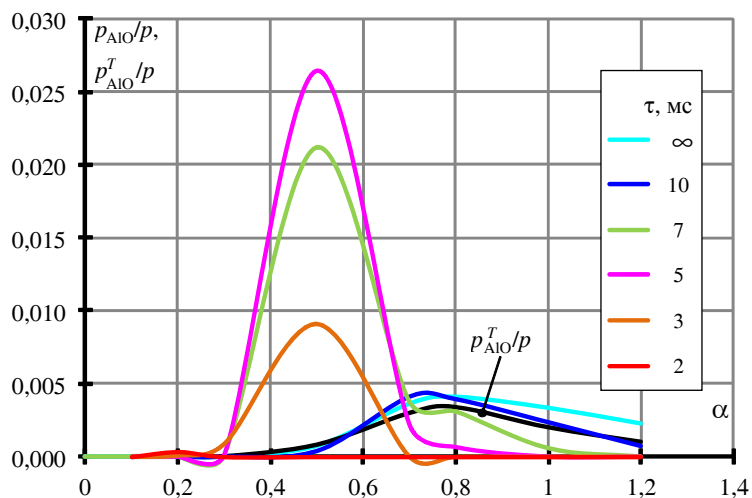
*б*

Рис. 2. Зависимости объемной доли субоксида  $\text{Al}_2\text{O}$  от  $\alpha$  и времени пребывания смеси в камере  $\tau$  для неравновесных (*a*) и равновесных (*б*) текущих значений

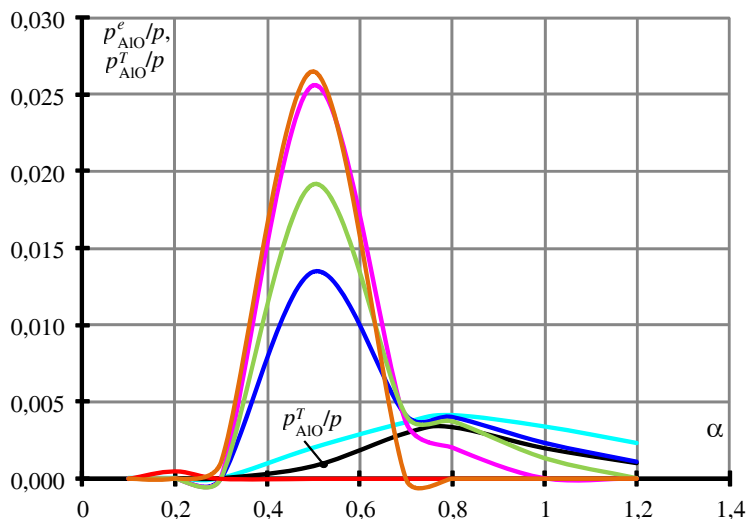
равновесным значениям. При длительных временах пребывания смеси в камере ( $\tau \rightarrow \infty$ ) формы зависимостей содержания субоксида  $\text{Al}_2\text{O}$  от  $\alpha$ , которые дают расчеты по неравновесной термодинамике, соответствуют результатам равновесного термодинамического анализа с применением

программы «Астра». При этом текущее неравновесное содержание субоксида  $\text{Al}_2\text{O}$  совпадает с равновесным термодинамическим значением во всем исследуемом диапазоне коэффициента избытка воздуха.

На рис. 3 представлены зависимости объемной доли субоксида  $\text{AlO}$  от времени и коэффициента избытка воздуха.



*a*



*б*

Рис. 3. Зависимости объемной доли субоксида  $\text{AlO}$  от  $\alpha$  и времени пребывания смеси в камере  $\tau$  для неравновесных (*a*) и равновесных (*б*) текущих значений

Характер зависимостей для неравновесной термодинамики (реальных текущих – рис. 3, а и текущих равновесных значений – рис. 3, б) совпадает. Зависимости имеют экстремальный характер, максимум содержания субоксида приходится на диапазон изменения коэффициента избытка воздуха  $0,5 \leq \alpha \leq 0,8$ , причем со временем максимальные для данного текущего времени значения смещаются в область более высоких  $\alpha$ , как и для  $Al_2O_3$ , но по величине уменьшаются. Максимумы объемной доли  $AlO$ , рассчитанные по неравновесной термодинамике на промежуточных стадиях процесса, смещены относительно максимума объемной доли, полученного по равновесным термодинамическим расчетам [10], в сторону меньших  $\alpha$ , поскольку меньшим временам процесса соответствуют большие превышения текущей концентрации кислорода над равновесной или неравновесной термодинамической при  $\tau \rightarrow \infty$  (см. рис. 4).

Для малого времени пребывания смеси в камере наблюдаются существенные отличия доли  $AlO$ , рассчитанной по неравновесной термодинамике, от равновесных термодинамических значений. Анализируя графики на рис. 3, можно отметить, что максимальное значение доли  $AlO$  может превышать рассчитанное по равновесной термодинамике приблизительно в семь раз, и наибольшие значения приходятся на промежуточное время, а не  $\tau \rightarrow \infty$ . По мере развития процесса с течением времени реальные значения параметров неравновесной термодинамики приближаются к равновесным значениям. При длительных временах пребывания смеси в камере ( $\tau \rightarrow \infty$ ) формы зависимостей содержания субоксида  $AlO$  от  $\alpha$ , которые дают расчеты по неравновесной термодинамике, соответствуют результатам равновесного термодинамического анализа с применением программы «Астра». При этом реальное неравновесное содержание субоксида  $AlO$  совпадает с равновесным значением при  $0,2 \leq \alpha \leq 0,5$  и отличается от равновесного в диапазоне  $0,5 < \alpha \leq 1,2$  не более чем на 50 %. Максимальные значения объемной доли  $AlO$  с течением времени сначала возрастают, а затем убывают и приближаются к равновесному термодинамическому значению.

Особенностью образования  $AlO$  является превышение равновесных значений (при некоторых временах) над реальными (неравновесными) значениями. В этом состоит отличие образования  $AlO$  от  $Al_2O_3$ , выявленное по используемой модели.

В целом совместный анализ зависимостей на рис. 2 и 3 показывает следующее. Количество  $Al_2O$  примерно на 1–2 порядка превышает количество (объемную долю)  $AlO$  во всем диапазоне изменения  $\alpha$  и времени. При  $\alpha > 1,2$  и  $\alpha < 0,1$  содержание субоксидов близко к нулю, при соотношениях же количества металла и воздуха, близких к стехиометрическому или меньших, количество  $Al_2O$  может составлять значительную долю, а количество  $AlO$  всегда мало.

Значение коэффициента избытка воздуха, при котором достигается максимальная объемная доля  $Al_2O$  ( $\alpha \approx 0,3$ ), приблизительно в два раза меньше значения, при котором достигается максимальная объемная доля  $AlO$  ( $\alpha \approx 0,5$ ). Это объясняется тем, что  $Al_2O$  образуется только при концентрации кислорода, близкой к 0 (см. рис. 4). При малых значениях времени, когда кислорода в смеси относительно большое количество, содержание субоксида мало. По мере развития процесса содержание кислорода уменьшается, соответственно, объемная доля  $Al_2O$  увеличивается и достигает максимального значения при  $\alpha \approx 0,3$  (см. рис. 2 и 4). Для образования же  $AlO$  кислорода требуется больше, чем для образования  $Al_2O$ , поэтому максимумы и смещаются в сторону бóльших  $\alpha$ , так как при этом концентрация кислорода повышается (см. рис. 4). При увеличении значения  $\alpha$  более 0,8 концентрация кислорода становится настолько большой, что образование  $AlO$  становится термодинамически невыгодным и образуется в основном  $Al_2O_3$ .

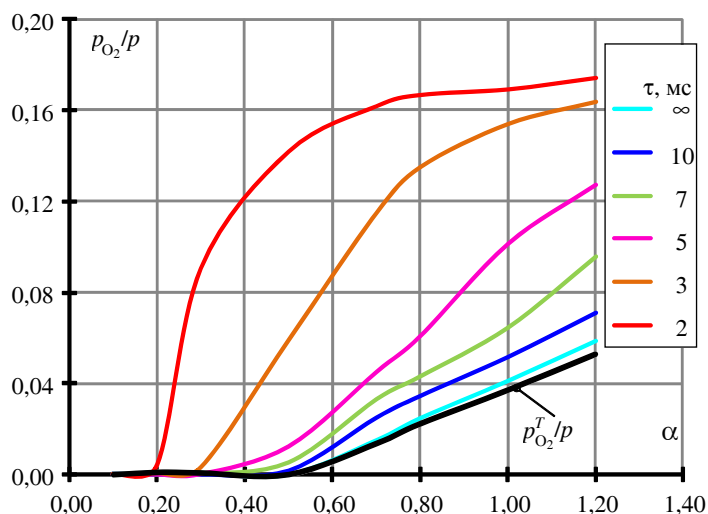


Рис. 4. Зависимости объемной доли кислорода от  $\alpha$  и времени пребывания смеси в камере  $\tau$  для неравновесных текущих значений



Для более детального анализа процессов образования субоксидов рассмотрим полученные зависимости объемной доли кислорода от времени  $\tau$  и  $\alpha$  (см. рис. 4).

С ростом коэффициента избытка воздуха количество кислорода в смеси монотонно возрастает, и при  $\alpha > 0,5$  происходит значительное увеличение его объемной доли по отношению к доле, соответствующей меньшим значениям  $\alpha$ . Следовательно, условия образования субоксидов наиболее благоприятны при низких коэффициентах избытка воздуха ( $0,1 \leq \alpha \leq 0,5$ ), что и подтверждается расчетами, результаты которых представлены и проанализированы выше. Наименьшие значения объемной доли кислорода соответствуют значениям  $\alpha$  от 0,1 до 0,3, на этот же диапазон приходятся наибольшие значения объемной доли  $Al_2O$  (см. рис. 2). На коэффициенты избытка воздуха, соответствующие максимальной доле образования  $AlO$  ( $0,5 \leq \alpha \leq 0,8$ ), приходится большее количество кислорода (см. рис. 3 и 4).

Также можно отметить, что объемная доля кислорода в смеси с течением времени уменьшается, при этом количество субоксида  $Al_2O$  возрастает при данном значении  $\alpha$ , а объемная доля  $AlO$  уменьшается, поскольку кислорода для образования  $AlO$  требуется больше, чем для образования  $Al_2O$ . Таким образом, результаты анализа содержания кислорода в реагирующей смеси соответствуют основным закономерностям образования субоксидов алюминия.

### **Анализ температуры газовой фазы**

На рис. 5 представлены зависимости температуры газовой фазы  $T_g$  от времени  $\tau$  и  $\alpha$ . Зависимости имеют экстремальный характер, наибольшие значения температур приходятся на диапазон изменения коэффициента избытка воздуха  $0,6 \leq \alpha \leq 0,8$ , причем со временем максимальные для данного текущего времени значения смещаются в область более высоких  $\alpha$  и возрастают по величине. Наибольшие температуры, рассчитанные по неравновесной термодинамике, достигаются при  $\alpha \approx 0,75$  и имеют значения, близкие к рассчитанным по равновесной. При увеличении времени пребывания в камере реагирующей смеси ( $\tau \rightarrow \infty$ ) значения температур приближаются к определенным по равновесной термодинамике.

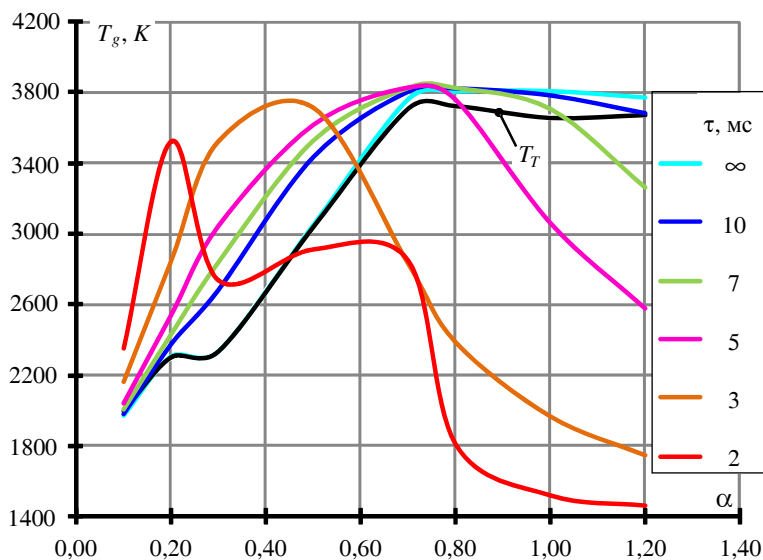


Рис. 5. Зависимости температуры газовой фазы от  $\alpha$  и времени пребывания смеси в камере  $\tau$  для неравновесных текущих термодинамических значений

Максимумы температуры приблизительно соответствуют значениям  $\alpha$ , при которых образуется максимальное количество АЮ для данного времени  $\tau$ . Общий совместный анализ зависимостей, представленных на рис. 2–5, показывает соответствие характера зависимости объемной доли субоксидов и температуры от  $\alpha$  и  $\tau$ , что отражает адекватность описания основных физико-химических процессов их образования в используемой математической модели.

### Заключение

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1. На основании проведенных исследований обоснована адекватность результатов математического моделирования с применением модели [7–9], учитывающей кинетику и неравновесную термодинамику процессов, в части описания термодинамических параметров реагирующей алюминиевоздушной смеси. Динамика процессов показывает, что с течением времени реальные параметры, рассчитанные по неравновесной термодинамике, приближаются к текущим равновесным значениям, а при длительных временах пребывания реагирующей сме-

си в камере ( $\tau \rightarrow \infty$ ) формы зависимостей содержания субоксидов  $Al_2O$  и  $AlO$  от  $\alpha$  соответствуют результатам равновесного термодинамического анализа с применением программы «Астра».

2. Учет образования промежуточных продуктов реакции (субоксидов) является актуальной задачей, и его необходимость определяется на основе сравнения данных равновесных и неравновесных термодинамических исследований и кинетики процессов горения. В частности, в настоящей работе установлено, что при значениях коэффициента избытка воздуха 0,1–1,2 можно не учитывать образование субоксида  $AlO$ , а образование субоксида  $Al_2O$  учитывать необходимо, поскольку объемная доля субоксида  $Al_2O$  многократно (на 1–2 порядка) превосходит долю  $AlO$  во всем исследуемом диапазоне коэффициента избытка воздуха. При  $\alpha > 1,2$  и  $\alpha < 0,1$  содержание как субоксида  $Al_2O$ , так и  $AlO$  близко к нулю, поэтому их можно не учитывать при моделировании горения алюминия в воздухе.

3. Процессы образования субоксидов носят сильно неравновесный характер, поскольку при временах  $\tau \leq 10$  мс, соответствующих реальной длительности пребывания реагирующей смеси в камере сгорания, содержание субоксидов существенно отличается от термодинамического значения. Исходя из этого учет реальной неравновесности необходим для правильного расчета динамики изменения параметров рабочих процессов вдоль оси камеры при всех рассматриваемых значениях коэффициента избытка воздуха.

4. Зависимость содержания субоксидов от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  имеет экстремальный характер, максимум содержания  $Al_2O$  достигается при  $\alpha = 0,2 \dots 0,3$ . Максимум содержания  $AlO$  на начальном этапе горения достигается при  $\alpha \approx 0,5$ . По мере развития процессов горения максимальные значения смещаются в область более высоких  $\alpha$  (при  $\tau \rightarrow \infty$   $\alpha \approx 0,8$ ). При этом сильную неравновесность процессов подтверждает существенное отличие максимальных значений объемных долей субоксидов от равновесных термодинамических значений.

5. Зависимости температуры газовой фазы от коэффициента избытка воздуха и времени пребывания реагирующей смеси в камере сгорания, полученные в работе, также отражают сильно неравновесный характер процессов и соответствуют основным закономерностям образования субоксидов  $Al_2O$  и  $AlO$ .

6. Большая степень неравновесности образования АЮ, которая выражается, в частности, в большом превышении текущего значения объемной доли субоксида над равновесным термодинамическим и сильной зависимости данного параметра от содержания кислорода в смеси, показывает, что при определенных условиях количество АЮ может достигать больших значений. В частности, значение объемной доли может быть достаточно большим при горении в воздухе, обогащенном кислородом, что может происходить в энергетических и технологических установках [11–15]. Анализ образования субоксидов в реагирующей алюминиевоздушной смеси в таких условиях является отдельной самостоятельной задачей, для решения которой требуются дополнительные исследования.

Результаты работы могут быть использованы для обоснования необходимости учета или исключения из расчета образования субоксидов при разработке математических моделей горения смесей алюминия и воздуха при проектировании технологических и энергетических установок для различных условий реализации рабочих процессов.

### Библиографический список

1. 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.

2. Крюков А.Ю. Адаптация внутрикамерных процессов и элементов конструкции энергоустановок на порошковом горючем к технологиям получения ультра- и нанодисперсных материалов // Известия Самар. науч. центра РАН. Спец. вып. «Актуальные вопросы тепло- и массообмена, энергоэффективность, исследование вихревых закрученных потоков». – 2008. – С. 29–38.

3. Крюков А.Ю., Малинин В.И. Математическая модель горения полифракционной аэрозвеси алюминия с учетом реакции азотирования // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 36. – С. 95–118.

4. Егоров А.Г., Кальней А.Д., Шайкин А.П. Стабилизация пламени порошкообразного металлического горючего в турбулентном потоке воздуха // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37, № 5. – С. 28–35.

5. 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.

6. 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.

7. Малинин В.И., Коломин Е.И., Антипин И.С. Модель горения высокоскоростного потока взорвзвеси частиц алюминия, учитывающая кинетику процессов и особенности накопления окисла // Химическая физика. – 1998. – Т. 17, № 10. – С. 80–92.

8. Малинин В.И. Организация внутрикамерных процессов в двигательных и технологических установках на металлических горючих: дис. ... д-ра техн. наук. – Пермь, 2007. – 311 с.

9. Крюков А.Ю., Малинин В.И. Математическое моделирование горения алюминиевоздушной смеси при низких коэффициентах избытка воздуха // Материалы XXIV Всерос. шк.-конф. молодых ученых и студентов, 7–10 сентября 2015 г. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – С. 231–235.

10. Трусов Б.Г. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1991. – 40 с.

11. Болховских Д.А., Малинин В.И., Бульбович Р.В. Исследование составов металлогазовых смесей для получения нанодисперсного оксида алюминия // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2012. – № 33. – С. 109–123.

12. Болховских Д.А., Малинин В.И., Бульбович Р.В. Анализ применения различных алюминиево-газовых смесей в форкамере установки синтеза наноксидов // Вестник ИЖГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2013. – № 3(59). – С. 17–20.

13. Демидов С.С., Малинин В.И., Бульбович Р.В. Ракетный двигатель на порошкообразном алюминиевом горючем и углекислом газе в качестве окислителя // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 36. – С. 119–130.

14. Болховских Д.А., Малинин В.И., Бульбович Р.В. Определение коэффициентов теплопроводности и вязкости в смесях алюминия и ки-

слородсодержащих газов в форкамере установки синтеза нанооксидов // Вестник ИЖГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2014. – № 2(62). – С. 25–28.

15. Демидов С.С., Малинин В.И., Бульбович Р.В. Стенд огневых испытаний ракетного двигателя на порошкообразном алюминиевом горючем и углекислом газе или воде в качестве окислителя // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2015. – № 40. – С. 106–121.

### References

1. Malinin V.I., Kolomin E.I., Antipin I.S. Vosplamnenie i gorenie 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. 41-51.

2. Kryukov A.Yu. Adaptatsiya vnutrikamernykh protsessov i elementov konstruksii energoustanovok na poroshkovom goryuchem k tekhnologiyam polucheniya ultra- i nanodispersnykh materialov [Adaptation of working processes and elements of energy installations on the powder fuel to techniques of ultrafine and nanoscale materials manufacture]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. Spetsialnyy vypusk "Aktualnye voprosy teplo- i massoobmena, energoeffektivnost, issledovanie vikhrevykh zakruchennykh potokov"*, 2008, pp. 29-38.

3. Kryukov A.Yu., Malinin V.I. Matematicheskaya model gorenija polifraktsionnoy aerovzvesi alyuminiya s uchetom reaktsii azotirovaniya [Mathematical model of burning polyfractionating air suspension of aluminium taking into consideration a nitration reaction]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2014, no. 36, pp. 95-118.

4. Egorov A.G., Kalney A.D., Shaykin A.P. Stabilizatsiya plameni poroshkoobraznogo metallicheskogo goryuchego v turbulentnom potoke vozdukhа [Flame control of powder metallic fuel in air turbulent flow]. *Fizika gorenija i vzryva*, 2001, vol. 37, no. 5, pp. 28-35.

5. Beksted M.V., Liang U., Padduppakkam K.V. Matematicheskoe modelirovanie gorenija odinochnoy alyuminievoy chastitsy (obzor) [Mathematical modeling combustion of single aluminium particle (review)]. *Fizika gorenija i vzryva*, 2005, vol. 41, no. 6, pp. 15-33.

6. 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]. *Fizika goreniya i vzryva*, 1993, vol. 29, no. 3, pp. 129-133.

7. Malinin V.I., Kolomin E.I., Antipin I.S. Model goreniya vysokoskorostnogo potoka aerovzvesi chastits alyuminiya, uchityvayushchaya kinetiku protsessov i osobennosti nakopleniya okisla [The model of combustion of high-velocity flow of air suspension of aluminium particles according to kinetics and accumulation of oxides]. *Khimicheskaya fizika*, 1998, vol. 17, no. 10, pp. 80-92.

8. Malinin V.I. Organizatsiya vnutrikamernykh protsessov v dvigatelnykh i tekhnologicheskikh ustanovkakh na metallicheskih goryuchikh [Intrachamber processes in engines and processing plant with metallic fuel]. Doctors degree thesis. Perm, 2007. 311 p.

9. Kryukov A.Yu., Malinin V.I. Matematicheskoe modelirovanie goreniya alyuminievovozdushnoy smesi pri nizkikh koeffitsientakh izbytko vozdukh [Mathematical modeling combustion of aluminium-air mixture at low excess air coefficient]. *Materialy XXIV Vserossiyskoy shkoly-konferentsii molodykh uchenykh i studentov*. Perm, 7-10 September 2015, pp. 231-235.

10. Trusov B.G. Modelirovanie khimicheskikh i fazovykh ravnovesiy pri vysokikh temperaturakh [Modeling of chemical and phase balances at high temperatures]. Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet imeni N.E. Baumana, 1991. 40 p.

11. Bolkhovskikh D.A., Malinin V.I., Bulbovich R.V. Issledovanie sostavov metallogazovykh smesey dlya polucheniya nanodispersnogo oksida alyuminiya [Investigation of compounds of metalgas mixtures for obtaining of nanodisperse oxide of aluminium]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2012, no. 33, pp. 109-123.

12. Bolkhovskikh D.A., Malinin V.I., Bulbovich R.V. Analiz primeniya razlichnykh alyuminievo-gazovykh smesey v forkamere ustanovki sinteza nanooksidov [Analysis of application of different aluminium-gas mixtures in prechamber of nanooxide synthesis facility]. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni M.T. Kalashnikova*, 2013, no. 3(59), pp. 17-20.

13. Demidov S.S., Malinin V.I., Bulbovich R.V. Raketnyy dvigatel na poroshkoobraznom alyuminievom goryuchem i uglekislom gaze v kachestve okislitelya [The rocket engine on powdery aluminium fuel and carbon dioxide oxidizer]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel-*

*skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2014, no. 36, pp. 119-130.

14. Bolkhovskikh D.A., Malinin V.I., Bulbovich R.V. *Opreделение koeffitsientov teploprovodnosti i vyazkosti v smesyakh alyuminiya i kislorodsoderzhashchikh gazov v forkamere ustanovki sinteza nanooksidov* [Determination of coefficients of heat conductivity and viscosity in mixtures of aluminium and oxygenic gases in prechamber of nanooxide synthesis facility]. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni M.T. Kalashnikova*, 2014, no. 2(62), pp. 25-28.

15. Demidov S.S., Malinin V.I., Bulbovich R.V. *Stend ognevykh ispytaniy raketnogo dvigatelya na poroshkoobraznom alyuminiyevom goryuchem i uglekislom gaze ili vode v kachestve okislitelya* [Firing stand for rocket engine with powder aluminium fuel and carbon dioxide or water used for oxidizer]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2015, no. 40, pp. 106-121.

### **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: malinivi@mail.ru).

### **About the authors**

**Aleksey Yu. Kryukov** (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, 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, Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: malinivi@mail.ru).

Получено 20.01.2016