

А.Ю. Крюков, В.И. Малинин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

РАСЧЁТ ВЫГОРАНИЯ ПОЛИФРАКЦИОННОЙ АЭРОВЗВЕСИ АЛЮМИНИЯ С УЧЁТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СУБОКСИДА АЛО С ПОВЕРХНОСТЬЮ ЧАСТИЦ

Произведены расчёты эффективности взаимодействия молекул АЮ с поверхностью частиц при горении аэровзвеси порошка алюминия АСД-1. Выполнена оценка влияния коэффициентов эффективности соударений (коэффициентов аккомодации) молекул АЮ с поверхностью частиц металла, свободной от оксида, – α_{E31} и окисленной поверхностью частиц – α_{E32} на параметры выгорания. Построены зависимости, отражающие отношение длины, в пределах которой выгорает 90 % массы частиц металла при данном α_{E32} , к длине – при нулевом значении α_{E32} , – от α_{E32} и α_{E31} . Исследования выполнены для $0,0001 \leq \alpha_{E31} \leq 1$ и $0,0001 \leq \alpha_{E32} \leq 1$ с учётом неравновесной термодинамики процессов горения. Установлено, что процессы взаимодействия молекул АЮ со свободной и окисленной поверхностью частиц приводят к увеличению эффективности достижения заданной полноты сгорания алюминия, сокращению длины камеры. Получены зависимости давлений АЮ в потоке и у поверхности частиц от α_{E31} и α_{E32} , которые показывают, что молекулы АЮ должны оседать на поверхность частиц в широких пределах изменения коэффициентов аккомодации, а давление АЮ у поверхности частиц значительно отличается от 0 даже при предельном значении $\alpha_{E31} = 1$. Выявленные зависимости давлений АЮ от начального радиуса частиц в квазистационарном режиме горения отражают существенно большую степень взаимодействия с АЮ частиц крупных фракций, чем мелких. Впервые учтено конечное значение скоростей взаимодействия АЮ с поверхностью частиц (образования субоксида Al_2O при соединении АЮ с металлом), что является более адекватным описанием процессов горения, чем в ранее выполненных исследованиях.

Ключевые слова: математическое моделирование, горение, аэровзвесь, алюминий, субоксид, коэффициент аккомодации (эффективности взаимодействия), относительная длина выгорания, полнота сгорания, неравновесная термодинамика.

A.Yu. Kryukov, V.I. Malinin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

COMPUTATION OF BURN-OUT OF POLYFRACTIONAL ALUMINUM AIR-SUSPENSION WITH TAKING INTO ACCOUNT OF SUBOXIDE ALO INTERACTION WITH PARTICLES SURFACE

The calculations of efficiency of suboxide АЮ interaction with particles surface during combustion of aluminum powder ASD-1 air-suspension are executed. Estimation of influence of coefficients of АЮ molecules impingement efficiency (accommodation coefficients) with metal particles surface free from oxide – α_{E31} and with oxidized surface – α_{E32} on burn-out parameters is implemented. Dependencies of relative burn-out length on α_{E32} and α_{E31} are constructed. Relative burn-out length is ratio of length which corresponds to burning-out of 90% metal particles mass at given α_{E32} to length which corresponds to zero value of α_{E32} . Investigations are implemented for $0,0001 \leq \alpha_{E31} \leq 1$ and $0,0001 \leq \alpha_{E32} \leq 1$ with taking into account of nonequilibrium thermodynamics of burning processes. Processes of АЮ molecules interaction with free and oxidized surface are established to result in increase of prescribed completeness of aluminum combustion, reduction of chamber length. Dependencies of АЮ pressure in flow and near particles surface on α_{E32} and α_{E31} are obtained. The dependencies reveal that АЮ molecules should settle on particles surface within the wide limits of accommodation coefficients variation. Also the dependencies show that АЮ pressure differs from zero significantly near particles surface even under limiting value $\alpha_{E31}=1$. Also dependencies of АЮ pressure on initial particles radius are revealed. These dependencies (obtained for quasi-steady combustion regime) reflect that particles of coarse-grained fractions interact with АЮ at noticeably greater degree than particles of small-grained fractions. For the first time the finite value of rate of АЮ interaction with particles surface (of suboxide Al_2O formation during АЮ coupling with metal) is considered. Such approach is more adequate description of combustion processes than combustion processes description in investigations carried out earlier.

Keywords: mathematical modelling, combustion, air-suspension, aluminium, suboxide, accommodation coefficient (interaction efficiency), relative burn-out length, completeness of combustion, nonequilibrium thermodynamics.

Введение

Математическое моделирование воспламенения и сгорания аэровзвесей металлических порошков, в частности порошков алюминия, имеет большое прикладное значение для расчёта параметров элементов конструкции при проектировании технологических установок получения ультрадисперсных материалов и энергоустановок на порошковом металлическом горючем [1–4], позволяет рационально обосновывать технические решения на основе анализа особенностей рабочих физико-химических процессов.

В данной работе представлены расчёты выгорания полифракционной аэровзвеси промышленного порошка алюминия АСД-1, изучено влияние взаимодействия субоксида AlO с поверхностью частиц конденсированной фазы.

В настоящее время существует достаточно большое количество публикаций, посвящённых анализу процессов горения частиц алюминия, в том числе и их математическому описанию [5–11]. Однако большинство авторов ограничивается анализом, построенным на допущении термодинамического равновесия процессов у поверхности частиц и в окружающем объёме газа [6, 7], а также учитывает только конечный продукт – оксид Al_2O_3 – в описании химических реакций [11]. 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 [12–14], могут оказывать влияние на параметры рабочих процессов в камерах сгорания, долю полученного ультрадисперсного Al_2O_3 и другие характеристики функционирования соответствующих установок. Таким образом, учёт образования субоксидов может определять основные конструктивные размеры камер воспламенения и сгорания в зависимости от заданных критериев эффективности рабочих процессов. Тем не менее анализ и расчёты горения алюминия с образованием AlO представлены в очень ограниченном числе исследований [5–8, 15].

Описание и уточнение используемой математической модели

В существующих исследованиях [5–7] скорость процессов горения определяется через коэффициенты диффузии окислительных компонентов к частице и коэффициенты диффузии паров алюминия от частицы. Этого недостаточно для прикладного использования моделей, поскольку правильное описание диффузии компонентов позволяет определить скорости реакций, но не позволяет рассчитывать концентрацию компонентов возле частицы, особенно тех, которые содержатся в малом количестве (субоксид AlO , атомарный кислород), и определять долю образующегося ультрадисперсного Al_2O_3 .

Расчёт содержания AlO представлен в работах [8, 15], где указывается, что его количество при горении алюминия в воздухе достаточно мало при коэффициенте избытка воздуха $\alpha \leq 0,5$. С другой стороны, при некоторых условиях его доля может быть достаточно велика, например, при горении металла в средах, обогащённых кислородом [16].

Также решение задачи расчёта образования AlO в продуктах сгорания представлено, например, в обзоре [5]. Однако в этой статье не учитывается ограничение скорости реакции AlO с жидким Al на поверхности частиц, свободной от оксида (далее – «свободная поверхность»), и возможность обратной реакции разложения субоксида Al_2O .



Индексы «с» и «g» обозначают конденсированные и газообразные компоненты, соответственно, а α_{E31} – коэффициент аккомодации (эффективности взаимодействия AlO со свободной поверхностью, который входит в константу скорости реакции и учитывает долю молекул AlO , оседающих на поверхность частицы из всего числа молекул, соударяющихся с ней. Кроме того, в [5] не учтена неравновесная термодинамика процессов.

Также нужно учесть реакцию на поверхности частиц, покрытой оксидом (далее – окисленная поверхность):



Здесь α_{E32} – коэффициент аккомодации (эффективности взаимодействия AlO с окисленной поверхностью).

В связи с изложенным выше, за основу методики расчёта в настоящей работе принята модель [15]. Преимуществом данной модели является учёт кинетики и неравновесной термодинамики процессов на поверхности частиц металла и в объёме потока (может проявляться в том, что концентрация AlO у поверхности частиц не равна нулю), температурной и скоростной неравновесности между частицами и газом.

Модель [15] скорректирована: в ней учтены описанные реакции (1) и (2) взаимодействия субоксида AlO с поверхностью частиц. Для этого введены скорости процессов, которые включены в соответствующие уравнения:

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

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

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

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

где W_{E31i}^K , W_{E32i}^K , W_{E21i}^K , W_{E22i}^K – скорости испарения (конденсации) субоксидов на свободной и окисленной поверхностях:

$$W_{E31i}^K = \frac{1}{4} \alpha_{E31} U_{V3i} \beta_i \frac{P_{V3i}^e - P_{V3}}{RT_i},$$

$$W_{E32i}^K = \frac{1}{4} \alpha_{E32} U_{V3i} (1 - \beta_i) \frac{P_{V3i}^e - P_{V3}}{RT_i},$$

Обозначения параметров B_2 , B_3 , U_{V3i} , P_{V3i}^e , P_{V3} , β_i , R , T_i – такие же, как и в модели [15].

Полагаем равными скорости прямой и обратной реакций (1) и (2) так же, как и в моделях [1, 15]:

$$W_{E31i} = W_{E21i} \text{ и } W_{E32i} = W_{E22i}.$$

Основные положения и допущения соответствуют принятым в моделях [1, 15]. Рассматривается одномерное течение реагирующей смеси частиц и газа. 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, который образуется в объёме потока в результате газофазных реакций. Продукты испарения – из газообразного алюминия и субоксидов алюминия (Al₂O 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. Крупнодисперсная фаза представлена совокупностью определенного числа монофракций. Для ультрадисперсной фазы в каждой точке потока определяется удельная поверхность, соответственно – средний по поверхности размер ее частиц.

Исходные данные и рассчитываемые параметры процессов

Исследования процессов горения выполнены для значения коэффициента избытка воздуха $\alpha = 0,7$, поскольку, как показано в более раннем исследовании [8], именно при таком значении α образуется максимальное количество АЮ. Общее давление смеси p принималось равным 0,25 МПа, так как это соответствует давлению в камерах сгорания технологических установок получения ультрадисперсных материалов [2].

В качестве параметров, отражающих процессы образования АЮ и взаимодействия субоксида с частицами, взяты значения объёмных долей субоксида, т.е. соответствующих относительных давлений. Указанные параметры определяются при времени, соответствующем выгоранию 50 % массы частиц средней фракции, поскольку именно данная фракция с исходным размером частиц 22 мкм и фракции, близкие к ней по размерам, составляют наибольшее количество металла в порошке АСД-1 [17], а также потому, что к этому моменту времени гарантированно воспламеняются все фракции.

Значения коэффициентов аккомодации – эффективности реакции – α_{E31} (характеризующего эффективность соударений молекул АЮ с частицами металла на поверхности, свободной от оксида) и α_{E32} (характеризующего эффективность соударений молекул АЮ с частицами металла на окисленной поверхности) варьировались в пределах $0 \leq \alpha_{E31} \leq 1$ и $0,0001 \leq \alpha_{E32} \leq 1$.

При этом следует учитывать, что наиболее вероятное значение α_{E31} лежит в пределах 0,1–1, поскольку на свободной поверхности происходит непосредственное прямое взаимодействие молекул АЮ и атомов Al и вероятность этого процесса достаточно высокая. Эффективность же взаимодействия АЮ с кислородом на окисленной поверхности частиц металла достаточно мала, поскольку на неё напрямую оседает небольшое количество молекул кислорода. А для протекания обратной реакции (2) необходимо разложение Al_2O_3 . Поэтому принимаем, что наиболее вероятное значение коэффициента α_{E32} находится в диапазоне 0,0002–0,01. В работе [15] коэффициент, соответствующий α_{E32} , принят равным 0,0025.

Таким образом, в данной работе, в отличие от модели [5], коэффициент α_{E31} принимает конечное значение и отражает физический смысл процесса, поскольку не превышает 1, что является предельной эффективностью взаимодействия АЮ со свободной поверхностью частиц.

Результаты расчётов

Результаты исследований представлены на рис. 1, 2, 3 и 4. На графиках рис. 2, 3 и 4 значения по оси абсцисс отложены в логарифмическом масштабе.

На рис. 1 представлены зависимости относительной длины выгорания L от коэффициентов α_{E31} и α_{E32} . Относительная длина выгорания L – это отношение длины, в пределах которой выгорает 90 % массы частиц исходного порошка металла при данном α_{E32} к длине – при нулевом значении α_{E32} (фактически это означает отсутствие субоксида АЮ в потоке). Рис. 1 отражает влияние реакций (1) и (2) на свободной и окисленной поверхностях на полноту сгорания исходного порошка металла, показывает, как эффективность реакции (1) может корректировать изменение полноты сгорания с течением времени.

В пределах наиболее вероятных значений $0,1 \leq \alpha_{E31} \leq 1$, коэффициент α_{E31} оказывает влияние на относительную длину выгорания (рис. 1), причём с ростом α_{E31} от 0,1 до 1 относительная длина выгорания уменьшается примерно на 20 %. Следовательно, процесс взаимодействия АЮ с поверхностью частиц увеличивает эффективность выгорания аэровзвеси.

Для низких значений α_{E31} зависимости относительной длины выгорания от α_{E32} имеют экстремальный характер. Коэффициент α_{E32} оказывает влияние на относительную длину выгорания, причём для разных значений α_{E31} относительная длина выгорания значительно отличается при одних и тех же его значениях.

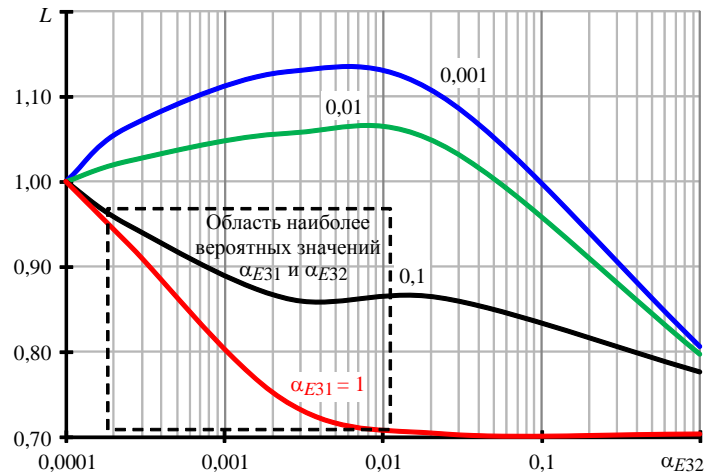


Рис. 1. Зависимость относительной длины выгорания от коэффициентов α_{E32} и α_{E31} :
 $\alpha = 0,7, p = 0,25$ МПа

Таким образом, эффективность взаимодействия АЮ со свободной поверхностью частиц выше, чем с окисленной поверхностью. Процессы взаимодействия АЮ со свободной поверхностью частиц оказывают существенное влияние на эффективность выгорания частиц и, таким образом, на проектные параметры конструкции установок на порошковом алюминиевом горючем.

На рис. 2 и 3 представлены зависимости отношения давлений АЮ $p_{АЮ}$ к общему давлению смеси p от коэффициентов аккомодации. Значения индексов: e – текущее равновесное давление в потоке, s – текущее давление у поверхности частиц, se – текущее равновесное давление у поверхности частиц, отсутствие индекса – текущее давление в потоке. На рис. 2 отражены зависимости для случая, когда α_{E32} равен 0,0025, а α_{E31} меняется (т.е. на окисленной поверхности вступает в реакцию менее 1 % молекул АЮ, которые на неё попадают, а на свободной – заданная часть). Рис. 3 иллюстрирует зависимости для случая, когда α_{E31} равен 1, а α_{E32} меняется (т.е. на свободной поверхности вступают в реакцию 100 % молекул АЮ, которые на неё попадают, а на окисленной – заданная часть).

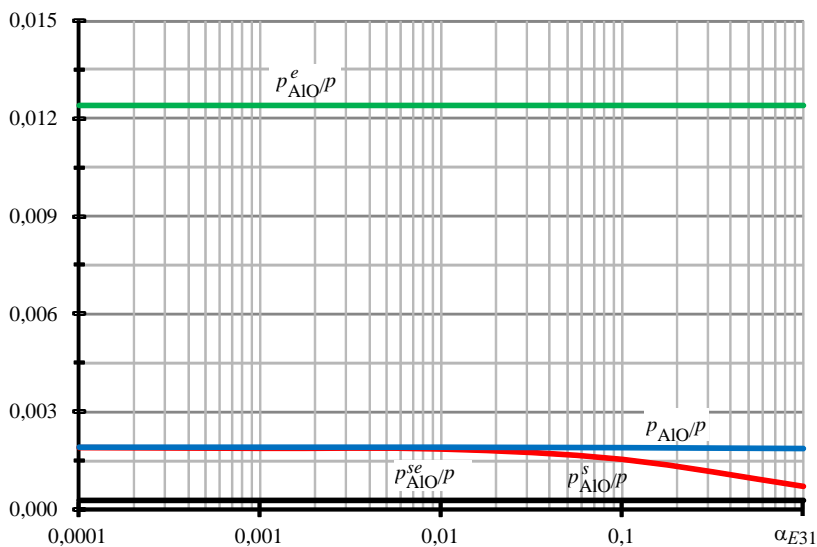


Рис. 2. Зависимости относительных давлений субоксида АЮ от α_{E31} :
 $\alpha_{E32} = 0,0025, p = 0,25$ МПа, $\alpha = 0,7$

Анализ графиков на рис. 2 показывает, что в наиболее вероятном диапазоне изменения α_{E31} поток молекул АЮ направлен к поверхности частиц, поскольку равновесное и неравновесное давления в потоке выше, чем текущее равновесное и реальное давления у поверхности, а реальное давление у поверхности выше, чем равновесное. Зависимость текущего давления АЮ у поверхности частицы $p_{AЮ}^s$ от α_{E31} имеет асимптотический характер, приближаясь по мере уменьшения α_{E31} , к значению давления в потоке $p_{AЮ}$. Это связано с тем, что при уменьшении α_{E31} скорость диффузии молекул АЮ к поверхности частиц намного превышает кинетическую скорость реакции.

С другой стороны, если кинетическая скорость намного превышает диффузионную, давление у поверхности частиц должно стремиться к 0. Однако даже при предельном значении $\alpha_{E31} = 1$ давление $p_{AЮ}^s$ у поверхности, в отличие от результатов работы [5], значительно отличается от 0, так же как в экспериментах [13, 14].

Процесс взаимодействия субоксида АЮ с поверхностью частиц является сильно неравновесным: реальное $p_{AЮ}^s$ и равновесное $p_{AЮ}^{se}$ давления сильно отличаются (равновесное давление близко к 0, а реальное, как указано выше, даже при $\alpha_{E31} = 1$ отличается от 0).

Параметры в потоке (равновесное $p_{AЮ}^e$ и неравновесное $p_{AЮ}$ давления), в отличие от параметров у поверхности частицы, практически не зависят от α_{E31} (см. рис. 2).

Анализ графиков на рис. 3 показывает, что в целом закономерности, характерные для направления движения молекул АЮ к поверхности частиц сохраняются и в наиболее вероятном диапазоне изменения α_{E32} (0,0002–0,01), поскольку равновесное и неравновесное давления в потоке выше, чем текущее равновесное и реальное давления у поверхности, а реальное давление у поверхности выше, чем равновесное. Вместе с тем в отличие от зависимостей от α_{E31} , параметры в потоке (реальные и равновесные давления) $p_{AЮ}$ и $p_{AЮ}^e$ сильно зависят от значений α_{E32} , приближаясь друг к другу при увеличении α_{E32} . При уменьшении значений α_{E32} давление в потоке асимптотически стремится к давлению у поверхности частиц $p_{AЮ}^s$, а давление у поверхности частиц $p_{AЮ}^s$ при некотором значении α_{E32} становится меньше равновесного $p_{AЮ}^{se}$. При очень малых $\alpha_{E32} < 0,00025$ молекулы АЮ могут вообще не оседать на поверхность частиц, поскольку текущее давление у поверхности ниже, чем равновесное (см. рис. 3).

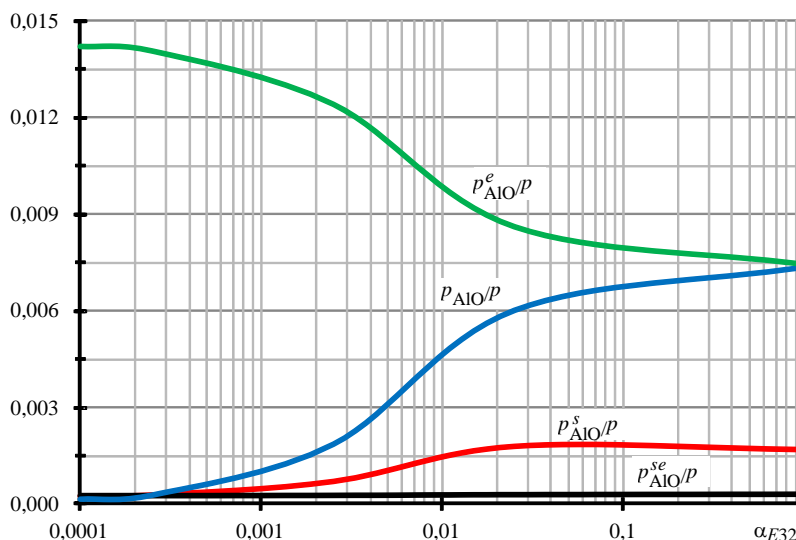


Рис. 3. Зависимости относительных давлений субоксида АЮ от α_{E32} : $\alpha_{E31} = 1, p = 0,25$ МПа, $\alpha = 0,7$

На рис. 4 представлены зависимости относительных давлений АЮ от исходного размера частиц алюминия. Данные зависимости построены для квазистационарных режимов горения частиц, соответствующих фракций. Для фракций с номерами 1, 2, 3 (радиус 2,6, 4,2 и 5,7 мкм соответственно) не фиксируется выход на квазистационарный режим горения, поэтому значения давлений для этих фракций взяты в момент выгорания 50 % массы частиц. Для частиц более крупных фракций выход на квазистационарный режим горения оценивался по выходу температуры на достаточно медленное изменение с течением времени. Значения индексов на рис. 4 те же, что и на рис. 2 и 3.

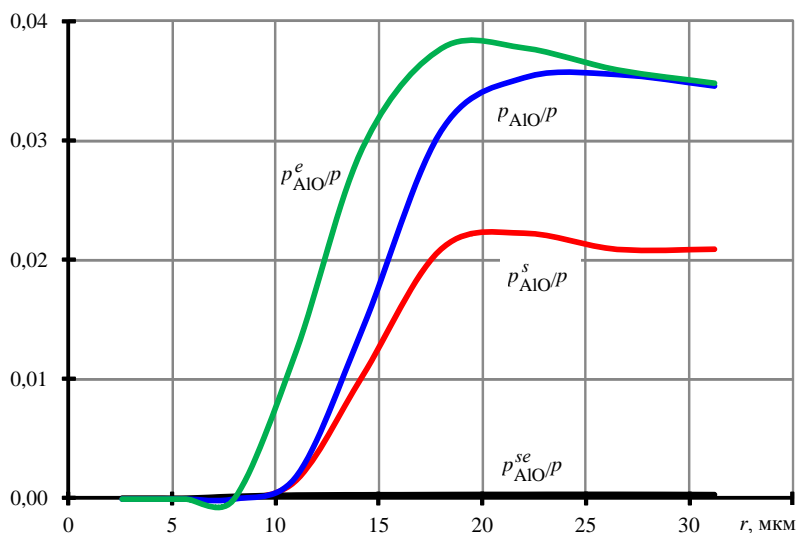


Рис. 4. Зависимости относительных давлений субоксида АЮ от исходного размера частиц алюминия: $\alpha_{E32} = 0,0025$, $p = 0,25$ МПа, $\alpha = 0,7$

Давления в потоке p_{AIO} и p_{AIO}^e ниже, чем соответствующие давления у поверхности p_{AIO}^s и p_{AIO}^{se} для частиц мелких фракций и выше, чем соответствующие давления у поверхности для частиц крупных фракций (начиная с радиуса 11 мкм, т.е. с фракции номер 5). Таким образом, частицы крупных фракций в существенно большей степени, чем частицы мелких фракций, взаимодействуют с АЮ.

Выводы

Результаты выполненных исследований показывают следующее.

1. В настоящей работе усовершенствована модель [1, 15] и в отличие от ранее выполненных исследований [1, 8, 15] учтено взаимодействие АЮ с поверхностью частиц алюминия.
2. Конечное значение коэффициента α_{E31} (в пределе равное 1), учитывающего эффективность взаимодействия АЮ со свободной поверхностью частиц, подтверждается тем, что относительное давление паров АЮ у поверхности, полученное в расчётах, так же, как и в экспериментах [13, 14], не равно нулю.
3. Эффективность процессов взаимодействия молекул АЮ со свободной и окисленной поверхностью частиц влияет на относительную длину выгорания аэрозвеси металла, т.е. вносит достаточно весомый вклад во внутрикамерные процессы установок на порошкообразном алюминиевом горючем. Причём протекание процессов взаимодействия АЮ с частицами приводит к увеличению эффективности достижения заданной полноты сгорания порошка металла, сокращению длины камеры.

4. Расчёты, учитывающие кинетику совместно с неравновесной термодинамикой процессов, показывают, что поток молекул AlO направлен к поверхности частиц в широких пределах изменения эффективности взаимодействия с последними.

5. Зависимости относительных давлений субоксида AlO от исходного размера частиц алюминия показывают, что частицы крупных фракций в существенно большей степени, чем частицы мелких фракций, могут взаимодействовать с AlO .

6. В целом, в расчётах учтено конечное значение скоростей процессов взаимодействия AlO с поверхностью частиц, и, следовательно, образования субоксида Al_2O при непосредственном соединении AlO с металлом, что является более адекватным описанием процессов горения, чем в ранее выполненных исследованиях [5]. Подход к расчётам образования субоксидов, представленный в данной работе, учитывает, в том числе, неравновесную термодинамику. Также показана возможность адаптации математической модели [1, 15] к широкому кругу параметрических исследований, актуальных для детального понимания и прикладного использования процессов горения алюминиево-воздушных смесей.

Библиографический список

1. Малинин В.И., Коломин Е.И., Антипин И.С. Модель горения высокоскоростного потока аэровзвеси частиц алюминия, учитывающая кинетику процессов и особенности накопления окисла // Химическая физика. – 1998. – Т. 17, № 10. – С. 80–92.
2. Малинин В.И., Коломин Е.И., Антипин И.С. Воспламенение и горение аэровзвеси алюминия в реакторе высокотемпературного синтеза порошкообразного оксида алюминия // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т. 38, № 5. – С. 41–51.
3. 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. – P. 385–394.
4. Experimental study on the operation characteristics of aluminum powder fueled ramjet / Chao Li, Chunbo Hu, Xin Xin, Yue Li, Haijun Sun. // Acta Astronautica. – 2016. – No. 129. – P. 74–81.
5. Бекстед М.В., Лианг У., Паддупаккам К.В. Математическое моделирование горения одиночной алюминиевой частицы (обзор) // Физика горения и взрыва. – 2005. – Т. 41, № 6. – С. 15–33.
6. Гремячкин В.М., Истратов А.Г., Лейпуновский О.И. К теории горения металлических частиц // Физические процессы при горении и взрыве. – М.: Атомиздат, 1980. – С. 4–68.
7. 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.
8. Крюков А.Ю., Малинин В.И. Расчёт содержания субоксидов в продуктах сгорания алюминиево-воздушной смеси по модели неравновесной термодинамики // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2016. – № 1(44). – С. 116–131.
9. Синтез нанооксидов в двухфазных ламинарных пламенах / А.Н. Золотко, Я.И. Вовчук, Н.И. Полетаев, А.В. Флорко, И.С. Альтман // Физика горения и взрыва. – 1996. – Т. 32, № 3. – С. 24–33.
10. 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.
11. Ягодников Д.А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 432 с.
12. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В. Горение порошкообразных металлов в активных средах. – М.: Наука, 1972.
13. 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. N 653. – Laurel, MD, 1996. – P. 449–458.
14. Aluminum particle gas-phase flame structure / P. Bucher, R.A. Yetter, F.L. Dryer [et al.] // 34th JANNAF Combustion Meeting. V. II. CPIA Pub. N 662. – Laurel, MD, 1997. – P. 295–305.
15. Крюков А.Ю., Малинин В.И. Математическое моделирование горения переобогащённой алюминиево-воздушной смеси на основе неравновесной термодинамики процессов // Физика горения и взрыва. – 2018. – Т. 54, № 1. – С. 39–51.
16. Демидов С.С., Малинин В.И., Бульбович Р.В. Моделирование воспламенения порошка алюминия, распределенного в газовом потоке с высоким содержанием кислорода // Вестник Пермского

национального исследовательского политехнического университета. *Аэрокосмическая техника*. – 2016. – № 46. – С. 73–87.

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

References

1. Malinin V.I., Kolomin E.I., Antipin I.S. Model gorenija 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.

2. Malinin V.I., Kolomin E.I., Antipin I.S. Vosplamneniye i gorenije 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]. *Combustion, explosion, and shock waves*, 2002, Vol. 38, no. 5, pp. 525-534.

3. Shafirovich E., Varma A. Technology Requirements for Mars Sample Return using CO₂. Metal Powder Propellants. *Journal of Propulsion and Power*, 2008, Vol. 24, no. 3, pp. 385-394.

4. Chao Li, Chunbo Hu, Xin Xin, Yue Li, Haijun Sun. Experimental study on the operation characteristics of aluminum powder fueled ramjet. *Acta Astronautica*, 129 (2016), pp. 74-81.

5. Beksted M.V., Liang U., Padduppakkam K.V. Matematicheskoe modelirovanie gorenija 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.

6. Gremyachkin V.M., Istratov A.G., Leypunovskiy O.I. K teorii gorenija metallicheskih chastits. Protssessy gorenija i vzryva [For the theory of combustion of metallic particles. Physical processes during combustion and explosion]. Moscow: Atomizdat, 1980, pp. 4-68.

7. Babuk V.A., Vasilev V.A., Romanov O.Ya. Fiziko-khimicheskie prevrashcheniya kapel Al–Al₂O₃ v potoke aktivnogo gaza [Physicochemical conversion of Al–Al₂O₃ drops in active gas flow]. *Combustion, explosion, and shock waves*, 1993, vol. 29, no. 3, pp. 129-133.

8. Kryukov A.Yu., Malinin V.I. Raschjot sodержaniya suboksidov v produktakh sgoraniya aluminievovozdushnoi smesi po modeli neravnovesnoi 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.

9. Zolotko A.N., Vovchuk Ya.I., Poletayev N.I., Florko A.V., Altman I.S. Sintez nanooksidov v dvukhfaznykh laminarnykh plemenakh [Synthesis of nanooxides in two-phase laminar flames]. *Combustion, explosion, and shock waves*, 2015, Volume 32, Issue 3, pp. 262-269.

10. 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.

11. Yagodnikov D.A. Vosplamneniye i gorenije poroshkoobraznykh metallov [Ignition and combustion of powdery metals]. Moscow: Izdatelstvo MSTU imeni N.E. Baumana, 2009, 432 p.

12. 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.

13. 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, pp. 449-458.

14. 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, pp. 295-305.

15. Kryukov A.Yu., Malinin V.I. Matematicheskoye modelirovaniye gorenija pereobogashchënnoy aluminievovozdushnoy smesi na osnove neravnovesnoy termodinamiki protsessov [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.

16. Demidov S.S., Malinin V.I., Bulbovich R.V. Modelirovanie vosplamnenija poroshka alymonija, raspredel'onnogo v gazovom potoke [Modeling the ignition of aluminium powder dispersed in the gas flow with high content of oxygen]. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2016, no. 46, pp. 73-78.

17. Egorov A.G. Protsessy gorenija poroshkoobraznovo alyminija v prjamotochnykh kamerakh sgoranija reaktivnykh dvigatel'nykh ustanovok [Burning processes of powdery aluminum in straight flow chambers of jet propulsion systems]. Samara: Izdatelstvo Samarskogo nauchnogo tsentra 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, Department of Innovation Technologies of Machine Engineering, 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, 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 06.04.2018