

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ЧАСТИЦЫ АЛЮМИНИЯ В ПОТОКЕ АКТИВНЫХ ГАЗОВ

В. И. Малинин, Е. И. Коломин, И. С. Антипин

Научно-производственная фирма «Мост», 614010 Пермь

Предложена модель горения одиночной частицы алюминия в газовых смесях, содержащих несколько окислительных реагентов, которая учитывает накопление окисла на частице алюминия, кинетику испарения Al и поверхностных химических реакций. Дан анализ расчетов, выполненных по данной модели, при различных параметрах газового потока для частиц размером $10 \div 140$ мкм, горящих в воздухе или в продуктах газификации твердого топлива. Выявлен ряд особенностей горения частиц алюминия, влияющих на время горения и долю Al_2O_3 , образующегося на частице. Основной особенностью, связанной с кинетическими ограничениями и накоплением окисла, является сильная неравновесность процесса горения. Модель хорошо описывает экспериментальные зависимости времени горения частицы Al от ее размера и основных параметров потока. Расчет доли Al_2O_3 , накопившегося на горячей частице, удовлетворительно согласуется с опытными данными.

В работе [1] предложена новая математическая модель горения частицы Al. В отличие от прежних [2–5], эта модель учитывает, во-первых, накопление окисла на поверхности горячей частицы Al и, во-вторых, кинетику испарения Al и поверхностных химических реакций. Наиболее близка к модели [1] модель, изложенная в [5]. Авторы [1] приняли основные представления и допущения работы [5], кроме представления о локальном термодинамическом равновесии на поверхности частицы. Разработанная в [1] модель была использована для описания горения частицы Al (размером менее 40 мкм) в воздухе при давлении $p \approx 0,1$ МПа. В работе [1] выполнены расчеты параметров процесса горения Al, которые показали, что в вышеприведенных условиях необходимо учитывать как накопление окисла, так и кинетический фактор.

В работах [6, 7] проведено широкое экспериментальное исследование времени горения частиц Al в зависимости от основных параметров потока. В [8, 9] исследовано накопление окисла на горячей частице алюминия. Проведенное там сравнение определенной в эксперименте доли окисла с рассчитанной по модели [5] показало различие результатов опытов и теории. В [6–9] были выполнены оценочные расчеты и установлено, что для условий проведенных экспериментов допущения модели [5] о локальном термодинамическом равновесии на поверхности металлической частицы не соответ-

ствуют действительности.

В данной работе для условий экспериментов [6–9] проведены расчеты параметров горения Al по модели [1]. Модель [1] была модернизирована, что позволило рассчитывать горение движущихся частиц Al в многокомпонентных газовых смесях, содержащих несколько окислительных реагентов.

МОДЕЛЬ ГОРЕНИЯ ЧАСТИЦЫ Al И МЕТОДИКА РАСЧЕТА

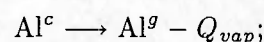
Дополнительно к допущениям из [1] приняты следующие.

1. До воспламенения частицы доля свободной от окисла поверхности частицы (далее называем просто свободной поверхностью) равна $\beta = A_0 \exp(-A_1/T)$, где A_0 , A_1 — константы, T — температура частицы.

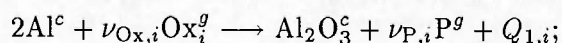
2. За момент воспламенения частицы принято начало плавления окисла, покрывающего частицу.

3. Химические реакции на поверхности частицы протекают независимо друг от друга.

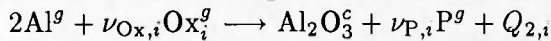
На поверхности частицы алюминия протекают следующие процессы:
испарение алюминия со свободной поверхности —



реакции окисления алюминия на свободной поверхности —



реакции окисления паров алюминия —



(пары металла могут реагировать с окислителем по гетерогенному механизму с высокой эффективностью соударений [10] на внешней поверхности окисла, которую далее называем окисленной поверхностью). Здесь Ox — окислитель, P — продукты реакции; ν — стехиометрический коэффициент реакции; $Q_{j,i}$ — теплоты реакций и испарения; индекс c относится к конденсированной фазе, g — газовой, var — испарению, Ox — окислительным компонентам, P — продуктам реакции, i — номер реакции, $j = 1$ — свободная поверхность, $j = 2$ — окисленная.

В соответствии с поверхностными процессами и с учетом указанных допущений составлена система уравнений и начальных условий, описывающая горение частицы алюминия в окислительной среде.

Уравнения баланса: для массы алюминия m_{Al} , отнесенной к ее начальному значению m_{Al}^0 , —

$$\frac{d}{dt} \frac{m_{Al}}{m_{Al}^0} = 3 \left(2 \sum_i W_{1,i} + W_{var} \right) M_{Al} / r \rho_{Al}; \quad (1)$$

для массы окисла на частице m , отнесенной ко всей массе окисла m_f , образующегося при полном сгорании алюминия ($m_f = a m_{Al}^0$), —

$$\frac{d}{dt} \frac{m}{m_f} = 6 \sum_i (W_{1,i} + W_{2,i}) M_{Al} / r \rho_{Al}; \quad (2)$$

для энтальпии частицы —

$$\frac{dT}{dt} = \left\{ \sum_i W_{1,i} Q_{1,i} + \sum_i W_{2,i} Q_{2,i} - (W_{var} - 2 \sum_i W_{2,i}) Q_{var} - \alpha(T - T_\infty) \right\} / \left\{ r \rho_{Al} [(m_{Al}/m_{Al}^0) c_{p,Al} + a(m/m_f) c_p] / 3 \right\}. \quad (3)$$

Уравнение движения частицы:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{2} \frac{\rho_g \pi r^2 C_D (v_\infty - v)^2}{m_{Al} + m}. \quad (4)$$

Начальные условия:

$$t = 0: \quad m_{Al} = m_{Al}^0, \quad m = m_0, \\ T = T_0, \quad v = v_0. \quad (5)$$

Здесь t — время; a — массовый стехиометрический коэффициент реакции алюминия с кислородом; W — молярные скорости реакций образования окисла и испарения алюминия (рассчитаны на единицу площади поверхности частицы); M — молекулярный вес; r — радиус частицы; ρ — ее плотность; v — скорость; c_p —

удельная теплоемкость; α — коэффициент теплообмена частицы с газом; C_D — динамический коэффициент сопротивления частицы; индекс 0 относится к начальному значению, f — конечному, ∞ — параметр газового потока.

Молярные скорости реакций образования окисла:

на свободной поверхности —

$$W_{1,i} = k_{1,i} C_{Ox,i}$$

на окисленной поверхности —

$$W_{1,i} = k_{1,i} C_{Ox,i}, \quad C_{Al} > \frac{2}{\nu_{Ox,i}} \frac{u_{Ox,i}}{u_{Al}} C_{Ox,i},$$

$$W_{1,i} = k_{1,i} C_{Al}, \quad C_{Al} \leq \frac{2}{\nu_{Ox,i}} \frac{u_{Ox,i}}{u_{Al}} C_{Ox,i}.$$

Константы скорости реакций:

на свободной поверхности —

$$k_{1,i} = \frac{1}{4\nu_{Ox,i}} u_{Ox,i} \beta \varphi_{1,i}$$

на поверхности окисла —

$$k_{2,i} = \frac{1}{4\nu_{Ox,i}} u_{Ox,i} (1 - \beta) \varphi_{2,i},$$

$$C_{Al} > \frac{2}{\nu_{Ox,i}} \frac{u_{Ox,i}}{u_{Al}} C_{Ox,i},$$

$$k_{2,i} = \frac{1}{8} u_{Al} (1 - \beta) \varphi_{2,i}, \quad C_{Al} \leq \frac{2}{\nu_{Ox,i}} \frac{u_{Ox,i}}{u_{Al}} C_{Ox,i},$$

$$\text{где } \beta = \begin{cases} A_0 \exp(-A_1/T), & T < T_{ign}, \\ 0,5(m_{Al}/m_{Al}^0)^{2/3}, & T \geq T_{ign}. \end{cases}$$

Здесь C — молярная концентрация; u — средние скорости молекул окислителя и атомов алюминия у поверхности частицы; φ — эффективность соударений в химической реакции (коэффициент аккомодации); индекс ign — воспламенение.

Молярная скорость испарения:

$$W_{var} = \frac{W_{var}^k - 2 \sum_i W_{2,i}}{1 + B} + 2 \sum_i W_{2,i},$$

где $W_{var}^k = \alpha_{var} u_{Al} \beta C_{Al}^e / 4$, $B = (u_{Al}/4)(\beta/\beta_{Al}^M)$, $\beta_{Al}^M = D_{Al} Nu / 2r$. Здесь α_{var} — коэффициент испарения (для алюминия $\alpha_{var} \approx 1$ [10]); B — параметр, характеризующий соотношение между интенсивностью фазового перехода и интенсивностью отвода паров алюминия от поверхности в среду; β^M — коэффициент массообмена газ — частица; D — коэффициент диффузии для средних параметров газовой смеси вокруг

частицы; Nu — критерий Нуссельта; индекс «к» относится к кинетическому режиму, e — равновесному состоянию.

Молярные концентрации у поверхности: окислительных компонентов —

$$C_{Ox,i} = \frac{\beta_{Ox,i}^m C_{Ox,i}^\infty}{\beta_{Ox,i} + k_{1,i} + k_{2,i}},$$

$$C_{Al} > \frac{2}{\nu_{Ox,i}} \frac{u_{Ox,i}}{u_{Al}} C_{Ox,i};$$

$$C_{Ox,i} = \frac{\beta_{Ox,i}^{m\infty} C_{Ox,i}^\infty}{\beta_{Ox,i}^m + k_{1,i} + k_{2,i} (C_{Al}/C_{Ox,i}^\infty)},$$

$$C_{Al} \leq \frac{2}{\nu_{Ox,i}} \frac{u_{Ox,i}}{u_{Al}} C_{Ox,i};$$

паров алюминия —

$$C_{Al} = \frac{W_{\text{пар}}^k - 2 \sum_i W_{2,i}}{(1+B)\beta_{Ox,i}^m},$$

где $\beta_{Ox,i}^m = D_{Ox,i} Nu / 2r$.

Коэффициент сопротивления частицы C_D определяли в соответствии со стандартной кривой сопротивления [11]. Критерий Нуссельта находили по формуле Рэнца — Маршалла [12]: $Nu = 2 + 0,6 Re^{0,5} Pr^{0,33}$.

В качестве окислительных реагентов рассматривались компоненты газовой смеси: O_2 , H_2O , и CO_2 . Коэффициенты диффузии $D_{Ox,i}$, \bar{D}_{Al} , коэффициенты теплопроводности $\bar{\lambda}$ и вязкости $\bar{\mu}$ рассчитывали с учетом многокомпонентности смеси (H_2 , CO , N_2 , HCl , Al , O_2 , H_2O , CO_2) для средних параметров газовой смеси вокруг горящей частицы металла:

$$\bar{\lambda} = \lambda(T, \bar{p}_{Ox,i}, \bar{p}_{P,i}, \bar{p}_{Al}),$$

$$\bar{D}_{Al} = D_{Al}(T, \bar{p}_{Ox,i}, \bar{p}_{P,i}, \bar{p}_{Al}),$$

$$\bar{D}_{Ox,i} = D_{Ox,i}(T, \bar{p}_{Ox,i}, \bar{p}_{P,i}, \bar{p}_{Al}),$$

$$\bar{\mu} = \mu(\bar{T}, \bar{p}_{Ox,i}, \bar{p}_{P,i}, \bar{p}_{Al}),$$

где $\bar{T} = (T + T_\infty)/2$, $\bar{p}_{Ox,i} = (p_{Ox,i}^\infty + p_{Ox,i}^s)/2$, $\bar{p}_{Al} = (p_{Al}^\infty + p_{Al}^s)/2$, $\bar{p}_{P,i} = (p_{P,i}^\infty + p_{P,i}^s)/2$; индекс s относится к параметрам на поверхности. Зависимость коэффициентов диффузии от температуры определена в соответствии с данными, приведенными в [13], остальные коэффициенты переноса — в соответствии с данными справочника [14]. Значения теплот испарения, химических реакций, удельных теплоемкостей компонентов при постоянном давлении и равновесного давления паров Al определены в соответствии с данными справочника [15].

Интегрирование системы уравнений (1)–(5) дает возможность определить время горения и долю окисла, накопившегося на поверхности во время горения частицы, описать изменение характерных параметров в процессе горения, установить особенности механизма горения частицы.

Чтобы упростить расчеты, эффективности соударений во всех химических реакциях (на поверхности алюминия и на поверхности окисла) приняты равными: $\varphi_{1,i} = \varphi_{2,i} = \varphi^s$.

Сравнением времен задержки воспламенения частицы Al размером $d = 70$ мкм при разных температурах среды ($T_\infty = 1600 \div 3000$ К), измеренных в эксперименте [6], с рассчитанными по данной модели определены константы предпламенного окисления ($A_0 = 5,5$ и $A_1 = 18200$). Сравнение времен горения частицы Al ($d = 70$ мкм) при $p = 1,0$ МПа и $T_\infty = 2400$ К [6, 7] с расчетом позволило определить параметр $\varphi^s \approx 0,1$, который является эффективным и средневзвешенным для всех химических реакций.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчеты выполнены для частиц Al размером $10 \div 140$ [6–8] и 350 мкм [9] с начальной температурой 1000 [6, 7] и 2400 К [8, 9], горящих при $p = 0,1 \div 10$ МПа в воздухе, в смеси аргона с кислородом [9] или в продуктах газификации гетерогенных конденсированных систем [6–8]. Параметры воздушного потока: $T_\infty = 1500 \div 3000$ К, $m_{O_2} = 0,2$.

Температуру и состав продуктов газификации твердого топлива изменяли в соответствии с зависимостями, приведенными в [7]. Скорость потока газа варьировали от 0 до 8 м/с. Относительную концентрацию окислительных компонентов a_{Ox} определяли так же, как и в [7] (параметр a_k).

Результаты расчетов представлены в таблице и на рис. 1, 2. Рис. 1 иллюстрирует динамику горения частицы Al . На рис. 2 показаны зависимости доли (σ) окисла, образовавшегося на частице, и времени ее горения (τ) от давления, относительной концентрации окислительных компонентов и размера частиц соответственно. На рис. 2, б, г, е на теоретические кривые для сравнения нанесены экспериментальные точки, полученные в [6].

В таблице представлены результаты расчета доли окисла, накопившегося на горящей частице, выполненного по модели авторов, модели [5], и опытные данные. Сравнение показы-

Сравнение результатов расчетов с опытом и расчетами [5] ($p = 4,0$ МПа)

Окислитель	m_{Ox}	T, K	σ		
			Расчет авторов	Расчет [5]	Эксперимент
Водяной пар	0,3	2700	0,65–0,7	0,2–0,3	0,9 [8]
	0,13	3200	0,4–0,45	0,1–0,2	0,2–0,4 [8]
Кислород	0,2	300	0,5	0,12	0,43 [9]

вает, что экспериментально определенное значение σ в 2–3 раза превышает рассчитанное по модели [5] и удовлетворительно согласуется с нашими расчетами. Анализ таблицы позволяет сделать вывод, что в реальности при повышенных давлениях среды ($p = 4$ МПа) окисел на частице Al испаряется менее интенсивно, чем в модели локального термодинамического равновесия, т. е. вклад реакции Al с Al_2O_3 в испарение частицы намного менее значителен, чем представляется авторам [5]. Пренебрежение образованием субоксида Al_2O вносит гораздо меньшую погрешность в расчет, чем его учет в соответствии с локальным термодинамическим равновесием.

Комплекс расчетов по предлагаемой модели процессов горения Al при различных пара-

метрах потока (скорость, температура, давление, состав) и размерах частиц позволил выявить особенности горения Al, не отмеченные ранее.

1. В процессе горения на поверхности частицы Al интенсивно накапливается окисел (см. рис. 1, а) и к концу горения значительная часть его остается на частице (40 % — при горении в воздухе, 60 ÷ 70 % — в продуктах сгорания смесевых составов). При этом (с учетом массы окисла) масса частицы при горении в воздухе меняется незначительно (к концу горения уменьшается на 20 %), а при горении в продуктах сгорания смесевых составов постоянно увеличивается и к концу горения возрастает на 40 %. С учетом различия плотностей Al и Al_2O_3 среднеинтегральный размер частицы за время горения в воздухе составлял 95 % от начального, а при горении в продуктах сгорания смесевых составов он практически не отличался от исходного (вывод справедлив только для одиночных частиц Al, горящих при $T_\infty < 3000$ K и $m_{O_2} > 0,05$ или $a_{Ox} > 25$ %).

Таким образом, предположение о незначительном изменении размера частиц в процессе горения [1] в исследуемом диапазоне изменения параметров выполняется.

2. При начальной разности скоростей частицы Al и потока газа $\Delta v = 2 \div 8$ м/с скоростное равновесие не успевает установиться не только к моменту воспламенения частицы, но и к концу ее горения. Как уже отмечалось выше, это связано с тем, что в процессе горения Al масса частицы уменьшается незначительно или даже возрастает. Расчеты показали, что уже при незначительном различии скоростей частицы и газа (≈ 1 м/с) при $p > 1$ МПа критерий Нуссельта (см. рис. 1, б) существенно отличается от 2. Следовательно, отсутствие учета даже слабой скоростной неравновесности при высоком давлении среды приводит к большим ошибкам в расчете параметров тепло- и массообмена, скорости горения и, в конечном итоге, времени горения частицы Al. Время горения

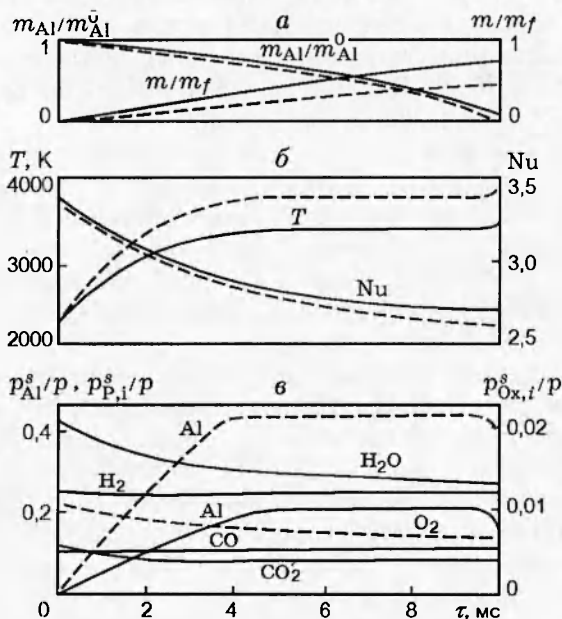


Рис. 1. Динамика процесса горения частицы Al: $d = 70$ мкм, $p = 5$ МПа, $T_\infty = 2400$ K, $v_\infty = 3,5$ м/с, $a_{Ox} = 57,5$ %; сплошные линии — горение в продуктах сгорания смесевых составов, штриховые — в воздухе

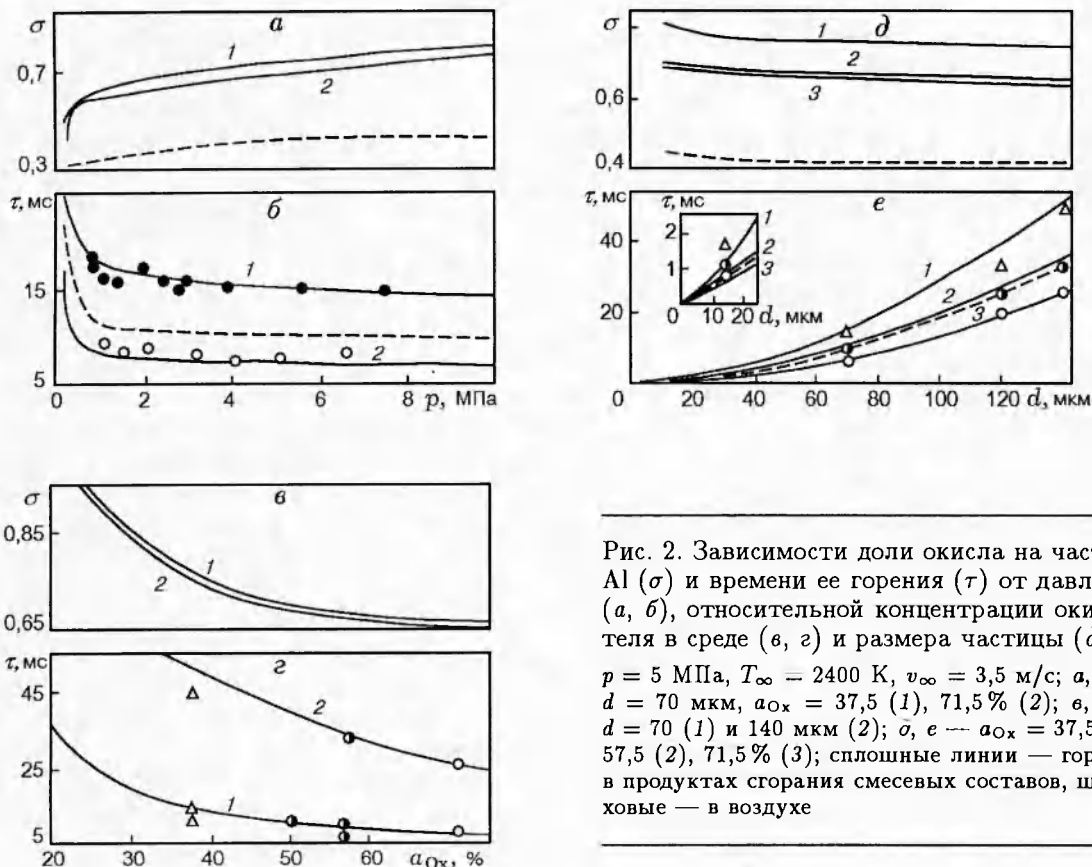


Рис. 2. Зависимости доли окисла на частице Al (σ) и времени ее горения (τ) от давления (а, б), относительной концентрации окислителя в среде (в, г) и размера частицы (д, е): $p = 5$ МПа, $T_{\infty} = 2400$ К, $v_{\infty} = 3,5$ м/с; а, б — $d = 70$ мкм, $a_{Ox} = 37,5$ (1), 71,5% (2); в, г — $d = 70$ (1) и 140 мкм (2); д, е — $a_{Ox} = 37,5$ (1), 57,5 (2), 71,5% (3); сплошные линии — горение в продуктах сгорания смесевых составов, штриховые — в воздухе

частицы Al ($d = 70$ мкм), неподвижной относительно газа при $T_{\infty} = 2400$ К и $a_{Ox} = 71,5\%$, на 30% превышает время горения частицы Al при таких же условиях, но с начальной разностью скоростей $\Delta v = 2$ м/с (в момент вылета с поверхности смесового состава). Влияние скоростной неравновесности фаз на параметры воспламенения и горения газовзвесей частиц металлов также было учтено и отмечено в работах [12, 16, 17].

Таким образом, при моделировании горения частиц Al при высоком давлении среды ($p > 2$ МПа) практически всегда необходимо учитывать скоростную неравновесность. Даже при горении смесевых составов в замкнутом объеме (из-за оттока газа с поверхности горения) всегда возникает различие скоростей частиц и газа, которое не исчезает и к моменту окончания горения частиц. Исключение составляет горение Al при низких температурах потока ($T_{\infty} < 1800$ К) или низких значениях a_{Ox} ($< 25\%$). В первом случае — длительное время воспламенения частиц (при $d = 70$ мкм $\tau_{ign} > 25$ мс), во втором случае — длительное

время горения (при $d = 70$ мкм $\tau = 30$ мс и более). При таких условиях можно пренебречь начальной разницей скоростей, поскольку за такие большие периоды времени они сравняются.

3. При $p > 1$ МПа для всего исследованного интервала размеров частиц скорость химической реакции лимитирует диффузию окислительных компонентов из потока к поверхности частиц. Давление окислительных компонентов у поверхности частиц в несколько десятков раз меньше, чем в потоке (см. рис. 1, в). Тем не менее, горение даже крупных частиц в исследуемом диапазоне параметров не протекает чисто в диффузионном режиме. Скорость испарения Al ограничивается его кинетикой. Хотя в процессе горения через некоторое время устанавливаются квазиравновесные значения температуры частицы и давления паров Al у ее поверхности (см. рис. 1, б, в), в конечный период горения Al квазиравновесие всегда нарушается: давление паров Al у поверхности частицы в несколько раз меньше давления насыщенных паров. Расчеты показывают, что окончание го-

рения частиц Al почти всегда сопровождается резким подъемом температуры и падением давления паров алюминия у их поверхности (см. рис. 1, в). Такое явление связано с накоплением окисла на частице и резким уменьшением доли свободной от окисла поверхности в конечный период горения. На это явление впервые было указано в работе [18], где отмечено, что интенсивная химическая реакция окислителя с парами металлов и особенно наличие окисла на поверхности металлической частицы могут влиять на режим испарения. Первый из отмеченных факторов действует в начальный период горения, второй — в конце горения.

Таким образом, в процессе горения частиц Al при высоких давлениях среды ($p > 1$ МПа) химические реакции окисления протекают в диффузионном режиме, а режим испарения меняется несколько раз: вначале он происходит в кинетическом режиме, затем переходит в диффузионный, а в конце горения снова устанавливается кинетический режим испарения.

4. В исследуемом диапазоне параметров горение частиц Al происходит по парофазному механизму (авторы вслед за [10] под парофазным окислением понимают окисление паров металла независимо от того, где именно происходит реакция — в газовой фазе или на поверхности частицы), несмотря на то, что большая часть окисла остается на частице (при горении Al в продуктах сгорания смесевых составов при $p > 1$ МПа $\sigma > 0,5$). Физически это означает, что значительная часть паров алюминия не успевает диффундировать от частицы в поток, а реагирует с окислительными компонентами газовой смеси на окисленной поверхности частицы. Расчеты показали, что на свободной поверхности реагирует не более 30 % всего алюминия. Таким образом, при горении Al ведущим процессом является не только гетерогенное окисление металла на свободной (открытой) поверхности, как предполагалось в [5], но и парофазная реакция на окисленной поверхности, вклад которой в тепловой баланс частицы в некоторых случаях больше, чем гетерогенного окисления.

5. При испарении Al и реагировании с окислительными компонентами парциальное давление паров Al не превышает 45 % суммарного давления газов в потоке при горении в воздухе и 30 % — при горении в продуктах сгорания смесевых составов. Причем в воздухе число молей продуктов испарения, идущих от поверхности частицы в поток, на 50 % компенси-

руется молями кислорода, идущими из потока к поверхности и вступающими там в реакцию. Максимальная ошибка в скорости горения частицы, возникающая из-за пренебрежения стефановским потоком, не превышает 20 % (в подавляющем числе расчетов она не больше 10 %). Таким образом, предположение о незначительности влияния стефановского потока на процесс горения частиц Al [1] в исследуемом диапазоне изменения параметров выполняется.

6. Расчеты показали, что при горении Al температура металлических частиц намного превышает температуру газа (см. рис. 1). Температура горения частиц возрастает при увеличении давления, относительной концентрации и содержания кислорода в газовой смеси как наиболее реакционноспособного окислителя (см. рис. 1, в). Наибольшее влияние на температуру частиц, скорость горения Al и, в конечном итоге, на весь процесс горения оказывает наличие кислорода в газовой смеси. Уже сравнительно небольшое содержание кислорода в смеси (≈ 10 %) существенно интенсифицирует весь процесс горения.

Изменение температуры ($2000 \div 3000$ К) и скорости ($1 \div 8$ м/с) газового потока слабо влияет на температуру и время горения частицы. Только при снижении температуры потока до значения, меньшего 2000 К, время горения несколько возрастает. Такой вывод в целом согласуется с представлениями, изложенными в [6, 7].

Изменение доли окисла, образовавшегося на частице, и времени ее горения в зависимости от параметров потока связано с отмеченными выше особенностями горения Al. Увеличение σ при повышении давления (см. рис. 2, а) объясняется тем, что при этом увеличивается разность температур частицы и газа; соответственно большая часть тепла, выделяющегося в химических реакциях на поверхности частицы, расходуется на поддержание температурной неравновесности (из-за увеличения теплообмена), а не на испарение Al. По этой же причине значение σ повышается при понижении температуры потока. Медленное уменьшение времени горения частиц при $p > 1$ МПа (см. рис. 2, б) объясняется существующей скоростной неравновесностью между частицами и газом и влиянием, которое оказывает давление на параметры тепло- и массообмена (при увеличении давления значение Nu возрастает, соответственно возрастает скорость горения Al). При $p \leq 1$ МПа резкое увеличение времени горения

(см. рис. 2,б) связано с кинетическим ограничением скорости химических реакций.

Увеличение σ с уменьшением a_{O_2} (см. рис. 2,в) связано с уменьшением тепловыделения на поверхности частицы и возрастанием доли тепла (в тепловом балансе частицы), идущего на поддержание разности температур частицы и газа. Увеличение τ с уменьшением a_{O_2} (см. рис. 2,г) объясняется уменьшением скорости массообмена частицы с газом и соответственно уменьшением скорости горения.

Размер частиц в исследованном интервале при $p > 1$ МПа мало влияет на величину σ (см. рис. 2,д). Время горения пропорционально диаметру частиц в степени 1,7–1,8 (см. рис. 2,е). Такие зависимости объясняются тем, что при $p > 1$ МПа в исследованном интервале параметров горение частиц Al протекает преимущественно в диффузионном режиме. Отличие закона горения $\tau(d)$ частиц Al от квадратичного связано в основном со скоростной неравновесностью, которая для крупных частиц более сильная, чем для мелких.

ВЫВОДЫ

1. Предложенная в работе модель хорошо описывает и объясняет экспериментальные зависимости времени горения частиц Al от их размера и основных параметров потока (скорости, температуры, давления и содержания окислителя) [6, 7]. Расчет доли окисла, накопившегося на горячей частице, удовлетворительно согласуется с опытными данными [8, 9].

2. При моделировании горения частицы Al при высоком давлении ($p > 1$ МПа) необходимо учитывать даже незначительную скоростную неравновесность (≈ 1 м/с).

3. Горение частицы Al происходит в условиях сильной химической и температурной неравновесности между частицей и газом. Температурная неравновесность возрастает при увеличении давления и содержания окислительных компонентов в газовой смеси, особенно кислорода.

4. При горении частицы Al, даже при высоком давлении ($p > 1$ МПа), одновременно с диффузионным режимом окисления может существовать кинетический режим испарения Al.

5. Скорость горения частицы Al определяется парофазная реакция на окисленной поверхности и гетерогенное окисление Al на свободной поверхности.

Указанные выше особенности горения частицы Al связаны с накоплением окисла на по-

верхности частицы и кинетическими ограничениями скоростей процессов, которые существуют и при предельных значениях коэффициентов аккомодации и испарения ($\alpha_{vap} = \varphi_{1,i} = \varphi_{2,i} = 1$). Поэтому основные выводы данной работы сохраняются и при более точных значениях этих коэффициентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кирьянов И. М., Малинин В. И., Котельникова Е. И., Сухов А. В. Модель горения частицы алюминия с учетом кинетического фактора // Хим. физика. 1990. Т. 9, № 12. С. 1606–1610.
2. Клячко Л. А. Горение неподвижной частицы легкокипящего металла // Физика горения и взрыва. 1969. Т. 5, № 3. С. 404–413.
3. Кудрявцев В. М., Сухов А. В., Воронцовский А. В. и др. Горение металлов при высоких давлениях (трехзонная модель) // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 6. С. 50–57.
4. Бржустовский Т., Гласмен И. Парофазные диффузионные пламена при горении магния и алюминия // Гетерогенное горение. М.: Мир, 1967. С. 91–125.
5. Гремячкин В. М., Истратов А. Г., Лейпунский О. И. К теории горения металлических частиц // Физические процессы при горении и взрыве. М.: Атомиздат, 1980. С. 4–68.
6. Беляев А. Ф., Фролов Ю. В., Коротков А. И. О горении и воспламенении частиц мелкодисперсного алюминия // Физика горения и взрыва. 1968. Т. 4, № 3. С. 323–329.
7. Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука, 1972.
8. Гремячкин В. М., Истратов А. Г., Колесников-Свинарев В. И., Лейпунский О. И. О накоплении окиси алюминия на горячей частице алюминия // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 1. С. 155–156.
9. Колесников-Свинарев В. И., Истратов А. Г., Смирнов В. И. и др. Влияние параметров окисляющей среды на горение капли алюминия // Физика аэродисперсных систем. Киев; Одесса: Вища шк., 1987. Вып. 31. С. 57–63.
10. Фурсов В. П., Шевцов В. И., Гусаченко Е. И., Стесик Л. Н. Роль процесса испарения легколетучих металлов в механизме их высокотемпературного окисления и воспламенения // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 3. С. 3–12.

11. Стернин Л. Е., Маслов Б. Н., Шрайбер А. А., Подвысоцкий А. М. Двухфазные моно- и полидисперсные течения газа с частицами. М.: Машиностроение, 1980.
12. Ягодников Д. А., Воронежский А. В. Влияние скоростной неравновесности на особенности распространения ламинарного пламени в аэродисперсной среде // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 5. С. 38–44.
13. Физические величины: Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова, А. П. Бабичева и др.: М.: Энергоатомиздат, 1981.
14. Кэй Дж., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных. М.: Физматгиз, 1962.
15. Термодинамические свойства индивидуальных веществ / Под ред. В. П. Глушко. М.: Наука, 1981. Т. 3, кн. 2.
16. Медведев А. Е., Федоров А. В., Фомин В. М. Математическое моделирование воспламенения частиц металлов в высокотемпературном потоке за ударной волной // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 3. С. 62–69.
17. Медведев А. Е., Федоров А. В., Фомин В. М. Описание воспламенения и горения смесей газа и твердых частиц методами механики сплошной среды // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 2. С. 3–9.
18. Шевцов В. И. Испарение веществ в окислительную среду // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 6. С. 62–69.

*Поступила в редакцию 19/VIII 1997 г.,
в окончательном варианте — 9/VII 1998 г.*
