

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ДИБОРИДА АЛЮМИНИЯ В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

© К. Ю. Арефьев^{1,2,3}, Л. С. Яновский¹, Д. А. Ягодников²

¹ Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова, Москва

² Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

³ Московский физико-технический институт

E-mail: kyarefev@ciam.ru

Поступила в Редакцию 2 марта 2019 г.

После доработки 12 марта 2019 г.

Принята к публикации 25 мая 2019 г.

Представлены математическая модель и результаты расчетов процессов воспламенения и горения энергетических конденсированных систем на основе моно- и полидисперсных частиц диборида алюминия в воздушных потоках в каналах постоянного сечения. Кинетические характеристики взаимодействия образующихся в результате газификации энергетических конденсированных систем одиночных частиц диборида алюминия в высокотемпературной окислительной среде определялись с использованием зависимостей периода индукции воспламенения и времени горения от температуры воздуха, диаметра и начальной температуры частицы, рассчитанных на основе модели параллельных химических реакций. Рассмотрен диапазон условий горения, соответствующих начальным температурам воздуха от 300 до 2000 К, числам Маха в канале от 0.1 до 1.5. Показано влияние дисперсности частиц диборида алюминия, скорости и начальной температуры воздушного потока на эффективность горения. Получены закономерности изменения коэффициента полноты сгорания частиц диборида алюминия в зависимости от начальных параметров воздушного потока и продуктов газификации энергетических конденсированных систем при различных соотношениях компонентов топливной смеси, соответствующих диффузионному и кинетическому режимам горения. Установлены условия перехода от одного режима к другому.

Ключевые слова: энергетическая конденсированная система; диборид алюминия; воздушный поток; воспламенение; горение; конденсированная фаза; диаметр частиц; температура; скорость потока

DOI: 10.1134/S0044461819070168

Использование бора и его соединений в качестве горючих компонентов энергетических конденсированных систем (ЭКС) является перспективным направлением улучшения массогабаритных характеристик атмосферных энергосиловых установок (ЭСУ) [1–5] за счет более высоких значений объемной H_v и массовой H_u теплот сгорания по сравнению с углеводородными, алюминий- и магнийсодержащими горючими [4, 5].

Одним из наиболее доступных борсодержащих соединений [5] является диборид алюминия AlB_2 , обладающий объемной теплотой сгорания $132.6 \text{ ГДж} \cdot \text{м}^3$, которая близка к объемной теплоте сгорания чистого бора. Массовая теплота сгорания AlB_2 при этом составляет $41.8 \text{ МДж} \cdot \text{кг}^{-1}$. Кроме того, эксплуата-

ционные свойства и макрокинетические характеристики AlB_2 , в том числе меньшие значения периода индукции воспламенения и времени горения [6, 7], обеспечивают возможность его применения в ЭКС различного назначения.

Практическое использование ЭКС, содержащих AlB_2 , как правило, приводит к необходимости разделения рабочего процесса в ЭСУ на две стадии [4]. На первой стадии осуществляется горение (газификация) ЭКС в газогенераторе, а на второй стадии происходит физико-химическое взаимодействие образующихся продуктов газификации ЭКС с воздушным потоком в камере дожигания. Следует отметить, что при газификации ЭКС образуется несущий газ (смесь паров воды, углекислого газа, азотсодержащих

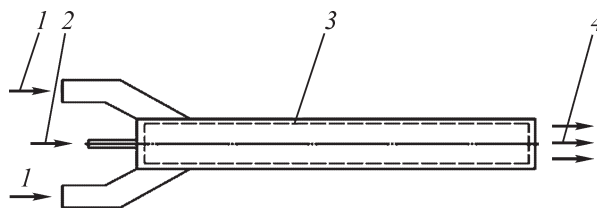


Рис. 1. Схема однозонной камеры дожигания.

1 — подача воздуха, 2 — подача продуктов газификации, 3 — зона горения, 4 — газозвдушная смесь.

и хлорсодержащих соединений), который позволяет транспортировать частицы AlB_2 в камере дожигания. Наиболее простая схема однозонной камеры дожигания представлена на рис. 1 [4]. Такая камера дожигания выполнена в форме цилиндрического канала, имеет локальные зоны подвода воздуха 1 и продуктов газификации 2. В результате химических реакций продуктов газификации с воздухом в зоне горения 3 камеры дожигания образуется газозвдушная смесь 4, которая является рабочим телом энергосиловой установки.

Исходный состав ЭКС содержит в основном горючие элементы, причем массовая доля конденсированной фазы в продуктах газификации может превышать 50%, и в ней содержится значительная часть химической энергии. Поэтому общая энергетическая эффективность использования ЭКС зависит от интенсивности процессов воспламенения и горения частиц конденсированной фазы, содержащихся в продуктах газификации.

Отметим, что в настоящее время для большинства камер дожигания энергосилового назначения при горении борсодержащих соединений не превышает 80% от их теплотворной способности [8, 9]. Такая относительно невысокая эффективность горения связана с малым временем пребывания в камере дожигания вследствие высокой скорости течения газа и с ограниченными размерами камеры дожигания, а также с относительно низкой скоростью горения частиц [10–12]. Более высокая эффективность может быть реализована в камере дожигания большего удлинения. Это препятствует реализации энергетических преимуществ борсодержащих ЭКС по сравнению с другими химическими соединениями. В частности, при горении углеводородных горючих могут реализоваться режимы, при которых их действительная эффективность становится выше, чем у борсодержащих соединений.

В связи с вышеизложенным важной задачей является повышение полноты сгорания частиц борсодержащих горючих, в частности AlB_2 . Для определения условий, обеспечивающих наиболее эффективное горение конденсированной фазы, без проведения боль-

шого количества огневых испытаний ЭСУ требуется выполнить параметрические исследования рабочего процесса в камере дожигания постоянного сечения для широкого диапазона режимных параметров.

Целью настоящей работы являлось выявление факторов, лимитирующих процессы воспламенения и горения в камере дожигания с оценкой их влияния на полноту сгорания частиц конденсированной фазы. В работе рассмотрены следующие факторы: диаметр частиц AlB_2 , соотношение компонентов топливной смеси в камере дожигания, а также скорость и температура воздуха на входе. Практическая значимость исследования определяется возможностью использования полученных результатов для разработки рекомендаций по применению AlB_2 .

Экспериментальная часть

Математическая модель, использованная в работе, основана на решении уравнений двухфазной газовой динамики в одномерной постановке, которая подробно представлена в работе [8]. Несмотря на наличие в большинстве камер дожигания некоторых пространственных особенностей течения [9, 13, 14], выполненная в работе [8] апробация показала возможность применения одномерной модели для оценки эффективности горения частиц конденсированной фазы в высокоскоростных воздушных потоках при условии минимального осаждения частиц на стенках и незначительных обратно-вихревых течений.

Рассмотрим расчетную схему проточного тракта однозонной камеры дожигания (рис. 2). Площадь поперечного сечения F проточного тракта камеры дожигания принята постоянной, длина канала равна x_k . Стенки камеры дожигания приняты теплоизолированными. Подача продуктов газификации 1 осуществляется через входное сечение 2. В этом же сечении подается воздух 3 с массовым расходом m_v .

При анализе рабочего процесса в проточном тракте камеры дожигания одним из наиболее важных режимных параметров является коэффициент избытка воздуха $\alpha = m_v / (K_{m0} m_{пр})$, где K_{m0} — стехио-

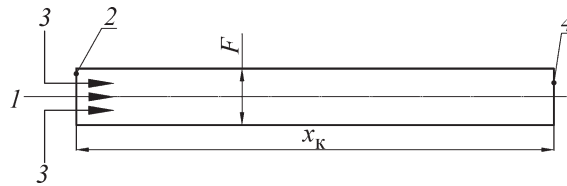


Рис. 2. Расчетная схема камеры дожигания.

1 — подача продуктов газификации, 2 — входное сечение, 3 — подача воздуха, 4 — выходное сечение.

метрическое соотношение для топливной смеси; m_B , $m_{ПГ}$ — массовые расходы воздуха и продуктов газификации соответственно. Предполагая, что продукты газификации состоят из газообразных и конденсированных горючих элементов, в частности частиц AlB_2 , введем $K_{m0к}$ и $K_{m0г}$ — массовые стехиометрические соотношения для конденсированных и газообразных горючих соответственно. Тогда справедливо соотношение: $K_{m0} = (1 - z_{гг})K_{m0г} + z_{гг}K_{m0к}$, где $z_{гг}$ — массовая доля конденсированных горючих в продуктах газификации.

Для описания рабочего процесса используется схема [8], в каждом сечении канала рабочее тело представляет собой смесь воздуха, газовой и конденсированной фаз продуктов газификации ЭКС, а также продуктов их сгорания с воздухом. С учетом того что газовая фаза продуктов газификации достаточно интенсивно реагирует с воздушным потоком, ее содержание на большей части тракта пренебрежимо мало. Это допущение справедливо в случае высокой скорости горения газовой фазы, реализуемой в рассматриваемых условиях [15].

Применительно к процессу горения полидисперсных частиц конденсированной фазы коэффициент полноты сгорания η_k может быть определен по следующему уравнению:

$$\eta_k = 1 - \int_0^\infty y_i M_i dD_{0i}, \quad (1)$$

где y_i — относительная массовая доля частиц с начальным диаметром D_{0i} ; M_i — функция потери относительной массы частиц с начальным диаметром D_{0i} , которая может быть определена следующим образом:

$$M_i = \left(1 - \frac{\int_0^x \frac{2u_{ч}}{w} dx}{D_{0i}} \right)^3, \quad (2)$$

$u_{ч}$ — линейная скорость горения частиц, x — осевая координата, w — средняя по сечению канала осевая скорость потока.

В данной работе исследовался процесс горения в воздухе частиц AlB_2 , стехиометрический коэффициент для которого равен $K_{m0к} = 6.397$. Массовая доля конденсированной фазы в продуктах газификации ЭКС принята равной $z_{гг} = 0.6$. При этом среднее значение массовой доли конденсированной фазы в камере дожигания не превышает 4%.

Примем, что процесс воспламенения частиц AlB_2 завершается на дистанции $x_{и}$ от места подачи и соответствует периоду индукции воспламенения частиц $\tau_{и}$. Тогда координата $x_{и}$ может быть определена по интегральному выражению

$$x_{и} = \int_0^{\tau_{и}} u_{ч} dt. \quad (3)$$

По разработанной в [16] математической модели воспламенения и горения одиночных частиц AlB_2 в высокотемпературной окислительной среде на основе теории параллельных химических реакций окисления алюминия ($4Al + 3O_2 \rightarrow 2Al_2O_3$) и бора ($4B + 3O_2 \rightarrow 2B_2O_3$) проведены параметрические расчеты горения для температур окружающего частицы воздуха $T = 2400-3300$ К, начального диаметра частицы $D_{0i} = 10-40$ мкм, начальной температуры частицы AlB_2 $T_{0i} = 300-1200$ К, изменения относительной концентрации кислорода вблизи частиц $n_{O_2} = 0.1-0.23$. В соответствии с работой [16] при моделировании предполагалось следующее:

- частица AlB_2 представляет собой равномерно перемешанный сплав бора и алюминия,
- параллельные химические реакции протекают на доле поверхности частицы в соответствии с массовыми долями бора и алюминия,
- оксидные пленки бора и алюминия покрывают всю поверхность частицы,
- физико-химические процессы протекают в тонком слое вблизи частицы,
- фазовый состав AlB_2 не изменяется при горении,
- температура частицы одинакова по всему объему,
- газ вблизи частицы оптически прозрачен.

В результате были получены аппроксимирующие зависимости:

— время индукции воспламенения (в мс):

$$\tau_{\text{и}} = 6.652 \cdot 10^{10} T^{-3.566} D_{0i}^{1.685} T_{0i}^{-0.245}, \quad (4)$$

где T — температура окружающего частицы воздуха (К), D_{0i} — начальный диаметр частиц (мкм), T_{0i} — начальная температура частиц (К);

— время горения (в мс):

$$\tau_{\text{гор}} = 0.834 \cdot 10^{-3} T^{-0.032} D_{0i}^{1.476} g_{\text{в}}^{-1.145}, \quad (5)$$

где размерность T подставляется в К, D_{0i} — в мкм.

Дифференцируя зависимость (5), можно получить выражение для расчета скорости изменения диаметра частицы AlB_2 в зависимости от режимных параметров горения, что соответствует изменению условий ее взаимодействия с высокотемпературным высокоскоростным потоком по траекториям движения каждой отдельной частицы в камере дожигания:

$$u_{\text{ч}} = \begin{cases} 0 & \text{при } x < x_{\text{и}}; \\ k T^a g_{\text{в}}^{1.145} \left(\frac{D_i \cdot 10^6}{2} \right)^{0.476} & \text{при } x \geq x_{\text{и}} \end{cases}, \quad (6)$$

где $x_{\text{и}}$ — осевая координата, соответствующая окончанию индукции воспламенения; T — температура газа вблизи частицы; D_i — текущий диаметр частицы; k, a — эмпирические коэффициент и степенной показатель соответственно. Значения k и a для различных температур приведены в табл. 1.

Сопоставление скоростей горения частиц, рассчитанных с помощью выражения (6), с данными, полученными в результате анализа экспериментов [8, 13, 17–21], показывает, что различия не превышают 17%.

Для определения параметров потока в произвольном сечении камеры дожигания с осевой координатой x решается адаптированная система уравнений [22], включающая уравнения сохранения энергии, количества движения, массового расхода и уравнение состояния. Решение системы уравнений осуществлялось итерационным способом с применением неявного

метода Рунге–Кутты, реализованного в авторском программном коде.

В представленной постановке задачи стенки канала приняты адиабатическими. Импульс потока P в сечениях канала принимался постоянным, что справедливо в случае незначительных потерь на трение. Принимается, что газовая фаза находится в равновесии. Такое допущение справедливо, так как в рассматриваемых условиях (при высоких температурах и наличии окисленного слоя на поверхности частиц AlB_2) скорость протекания гомогенных химических реакций (в том числе горения, диссоциации и рекомбинации) превышает скорость горения частиц. Для определения термодинамических параметров каждой из компонент газовой фазы и смеси в целом использовался программный комплекс TERRA (разработанный в МГТУ им. Н. Э. Баумана проф. Б. Г. Трусовым), позволяющий провести расчет для химически равновесного состава.

В качестве граничных условий задавались массовые расходы воздуха $m_{\text{в}}$ и продуктов газификации $m_{\text{пг}}$, полные энтальпии воздуха $H_{\text{в}}^*$ и продуктов газификации $H_{\text{пг}}^*$, а также число Маха $M_{\text{вх}} = w_0/a_0$ во входном сечении камеры дожигания (w_0 — начальная скорость потока, a_0 — скорость звука во входном сечении).

В работе проведены параметрические исследования эффективности рабочего процесса в интервале коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1\text{--}3$, имеющего температуру на входе $T_{\text{в0}} = 300\text{--}2000$ К. Рабочий процесс моделируется при расходонапряженности в камере дожигания $\Omega = (G_{\text{в}} + G_{\text{пг}})/F = 100\text{--}1000$ кг·м^{−2} и числах Маха $M_{\text{вх}} = 0.1\text{--}1.5$. Относительная длина камеры

дожигания принята равной $\frac{x_{\text{к}}}{\sqrt{4F/\pi}} = 15$. Указанные

значения параметров соответствуют области практического применения результатов расчетов [1–5].

Отличительная особенность математической модели и алгоритма расчета заключается в возможности проведения параметрического исследования без использования ресурсозатратных программных комплексов и вычислительных кластеров, а результаты расчетов позволяют оперативно определить основные закономерности и оценить влияние режимных параметров и геометрии камеры дожигания на характеристики рабочего процесса.

Обсуждение результатов

Наиболее важными параметрами, определяющими эффективность горения частиц конденсированной фазы, как известно, являются температура воздуха $T_{\text{в0}}$ на входе в камеру дожигания, соотношение компонен-

Таблица 1

Значения эмпирических коэффициента k и степенного показателя a для различных температур

$T, \text{К}$	k	a
1000–2400	$3.15 \cdot 10^{-6}$	0.752
2400–3300	$0.85 \cdot 10^{-3}$	0.032

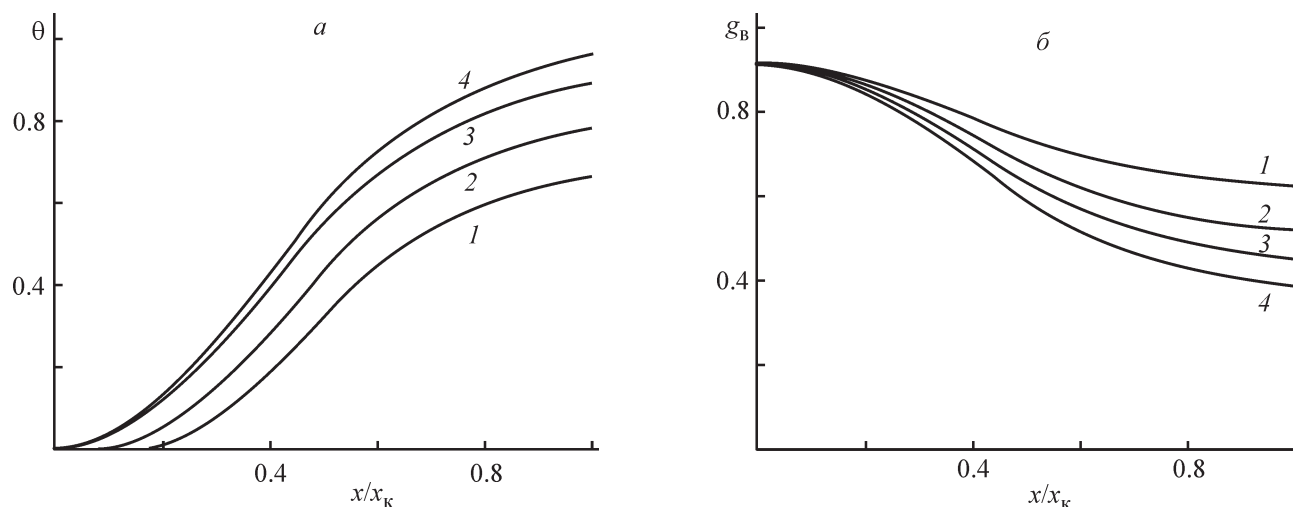


Рис. 3. Распределения параметров θ (а) и g_B (б) по длине камеры дожигания.
 T_{B0} (К): 1 — 300, 2 — 1000, 3 — 1500, 4 — 2000.

тов и диаметр частиц. Примеры распределения температуры газа T и массовой доли воздуха g_B по длине камеры дожигания для различных начальных значений температур воздуха T_{B0} при $\alpha = 2$ для монодисперсных частиц с начальным диаметром $D_{0i} = 40$ мкм показаны на рис. 3. Значения температуры представлены в безразмерном виде $\theta = (T - T_{B0}) / (T^* - T_{B0})$, где T_{B0} — начальная температура воздуха, T^* — термодинамически равновесная температура продуктов сгорания ЭКС в камере дожигания при заданном значении α .

Зависимости на рис. 3 характеризуются тем, что по мере движения частиц в канале происходит их горение с выделением тепловой энергии, что сопровождается повышением температуры (рис. 3, а) и одновременно снижением концентрации окислителя (рис. 3, б). При этом с повышением начальной температуры воздуха с 300 до 2000 К интенсифицируется выгорание частиц AlB_2 за счет сокращения периода индукции воспламенения и увеличения скорости горения частиц AlB_2 при прочих равных условиях.

Влияние начальной температуры воздуха. С увеличением температуры T_{B0} коэффициент полноты сгорания частиц возрастает, поскольку, согласно зависимостям (4) и (5), при этом уменьшаются как период индукции воспламенения, так и время горения частиц (рис. 4).

Расчетные и экспериментальные данные [8, 13, 17] показывают, что при относительно низких температурах и достаточном содержании окислителя ($\alpha > 1$) интенсивность процесса горения частиц лимитируется кинетикой гетерогенной реакции. При этом с повышением начальной температуры воздуха от

300 до 2000 К коэффициент полноты сгорания (при прочих равных условиях) может быть увеличен в 1.7–1.9 раза. Сравнение расчетных и экспериментальных данных свидетельствует об их удовлетворительном совпадении (различия не превышают 9%), что подтверждает адекватность математической модели и корректность принятых допущений.

Отметим, что согласно расчетам для организации эффективного процесса горения частиц AlB_2 в камере дожигания требуется достичь температуры продуктов сгорания на уровне $T_{кд} = 2400$ К (рис. 5). При меньших значениях температуры скорость горения

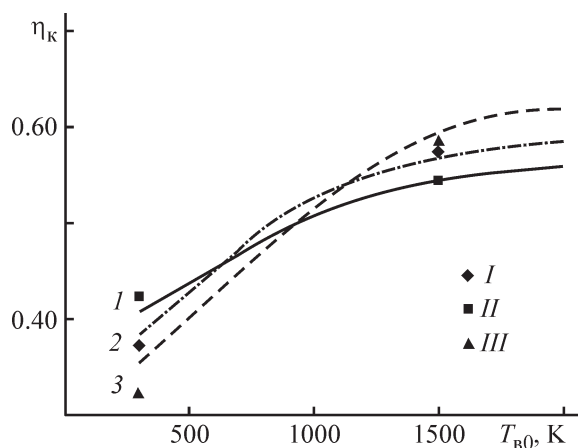


Рис. 4. Зависимость коэффициента полноты сгорания частиц от температуры воздуха на входе в камеру дожигания для монодисперсной аэрозвеси, $D_{0i} = 40$ мкм.
 Линии — расчет, точки — эксперимент (I — [8], II — [13], III — [17]).
 α : 1 — 1, 2 — 1.5, 3 — 2.

частиц недостаточна для обеспечения высоких значений коэффициента полноты сгорания η_k на заданной длине камеры дожигания. При более высоких температурах в камере дожигания, несмотря на высокую скорость горения частиц и соответственно высокий η_k , происходит интенсивная диссоциация продуктов сгорания борсодержащих соединений [17, 23], которая приводит к потерям тепловой энергии (более 30% от теплоты сгорания AlB_2), что выражается в снижении коэффициента η_d , учитывающего потери на диссоциацию. В связи с этим суммарный коэффициент использования химической энергии, запасенной в единице AlB_2 , $\eta_\Sigma = \eta_k \eta_d$ имеет максимум в области $T_{kd} = 2400$ К.

По мере роста начальной температуры воздуха увеличивается роль диффузии кислорода вблизи частицы, зависящая также и от величины g_b . В результате лимитирующим фактором горения частицы становится соотношение компонентов, определяющее действительную температуру продуктов сгорания в конкретном сечении камеры дожигания.

Влияние коэффициента избытка окислителя. С ростом значений α величина η_k в интервале коэффициента избытка окислителя $\alpha = 1-3$ изменяется немонотонно (рис. 6). Это связано с комплексным влиянием как температуры газа, так и содержания в газе воздуха. В общем случае повышение температуры, как изложено выше, приводит к росту коэффициента полноты сгорания.

С целью разделения режимов горения примем, что при отрицательном значении производной $\partial\eta_k/\partial\alpha$ реализуется «кинетический» режим. В области, для которой $\partial\eta_k/\partial\alpha > 0$, примем наиболее вероятным «диффузионный» режим взаимодействия AlB_2 с окислителем. В случае наличия локального максимума, характеризуемого равенством нулю

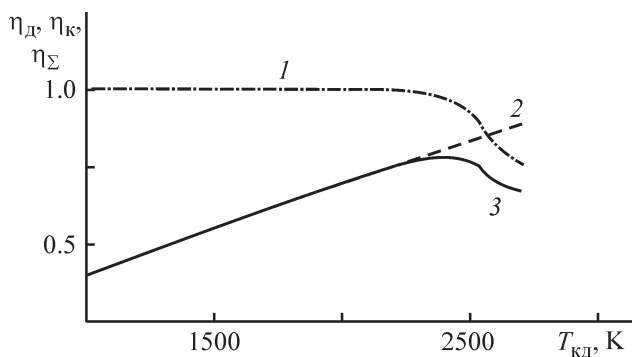


Рис. 5. Зависимость коэффициентов, учитывающих потери энергии, от температуры в камере дожигания.

1 — η_d , 2 — η_k , 3 — η_Σ .

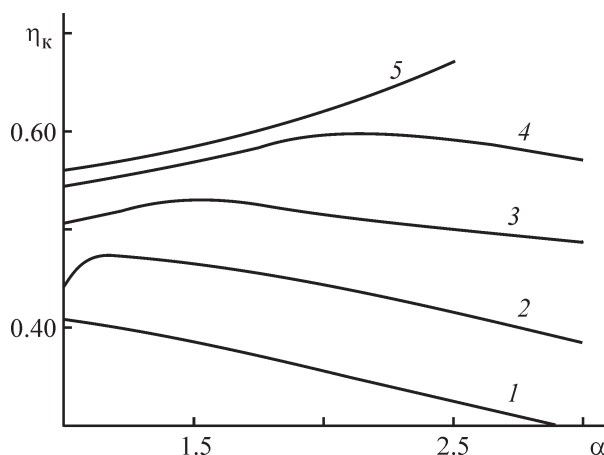


Рис. 6. Зависимость коэффициента полноты сгорания от коэффициента избытка воздуха.

$T_{в0}$ (К): 1 — 300, 2 — 700, 3 — 1000, 4 — 1500, 5 — 2000.

производной $\partial\eta_k/\partial\alpha = 0$, режим горения будем условно называть «диффузионно-кинетическим». Для обобщения данных охарактеризуем режим горения с помощью числа Дамкелера: $Da = \tau_{пр}/(\tau_{и} + \tau_r)$, где $\tau_{пр}$ — время пребывания частиц в камере дожигания; τ_r — время полного сгорания частицы в воздухе при температуре воздуха, равной $T_{в0}$. Расчеты показывают, что для используемой модели горения при $Da \leq 0.5$ реализуется «кинетический» режим горения, при $0.5 < Da \leq 1$ — «диффузионно-кинетический», а при $Da > 1$ — «диффузионный». Наличие экстремума можно объяснить преобладающим влиянием, с одной стороны, увеличения концентрации кислорода, с другой — уменьшением равновесной температуры продуктов сгорания и, следовательно, захлаживанием аэрозвеси, причем с ростом $T_{в0}$ положение этого экстремума смещается в область больших значений α .

В соответствии с вышеизложенным при относительно невысоких температурах (300–800 К) реализуется горение частиц в «кинетическом» режиме, когда с увеличением α происходит монотонное снижение коэффициента полноты сгорания. Это определяется низкой предельной скоростью горения частиц в области входа в камеру дожигания. По мере роста $T_{в0}$ закономерности горения частиц изменяются. При близком к стехиометрическому соотношению компонентов и при начальной температуре воздуха 800–1800 К зависимость $\eta_k = f(\alpha)$ может иметь локальные максимумы, связанные с наиболее высокими скоростями горения частиц. С дальнейшим повышением начальной температуры воздуха происходит переход от «кинетического» режима горения к «диффузионному», когда увеличение α в интервале 1–2.2

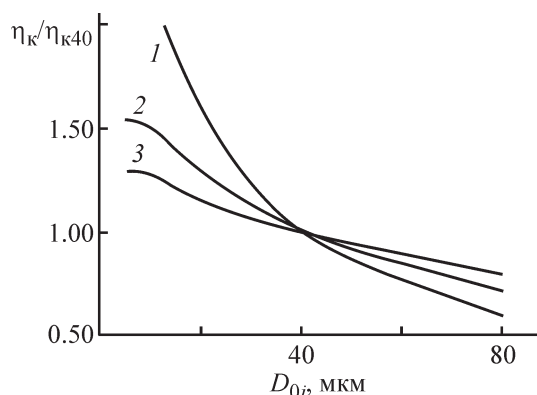


Рис. 7. Зависимость коэффициента полноты сгорания частиц от D_{0i} .
 $T_{в0}$ (К): 1 — 300, 2 — 1000, 3 — 2000.

приводит к росту значений коэффициента полноты сгорания η_k .

Влияние диаметра частиц. Рассмотрим влияние начального диаметра частиц на их полноту сгорания. Расчеты выполнены для стехиометрического соотношения компонентов при диаметрах монодисперсных частиц от 5 до 80 мкм, а также для полидисперсного распределения частиц, аналогичного приведенному в работе [24]. На рис. 7 данные представлены для начальной температуры воздуха 300, 1000 и 2000 К. Для более наглядного сравнения результатов расчетов представим коэффициент полноты сгорания частиц в безразмерном виде η_k/η_{k40} , где η_{k40} — коэффициент полноты сгорания частиц с $D_{0i} = 40$ мкм, рассчитанный при прочих равных условиях.

Отметим, что для частиц с начальным диаметром $D_{0i} = 5$ мкм полнота их сгорания в рассматриваемом канале больше в 1.2–1.8 раза, что обусловлено значительным ростом поверхности горения на единицу массы частиц, а также снижением периода индукции воспламенения (4) и времени горения (5) при уменьшении начального диаметра частиц.

С увеличением начальной температуры воздуха влияние дисперсного состава конденсированной фа-

зы на эффективность горения нивелируется. Таким образом, при $T_{в0} = 300$ К изменение диаметра частиц от 80 до 5 мкм приводит к трех кратному увеличению коэффициента полноты сгорания, а при температуре $T_{в0} = 2000$ К — увеличение коэффициента полноты сгорания составляет около 45%.

Установлено, что горение полидисперсных частиц AlB_2 со средним поверхностным диаметром (диаметром Заутера) $D_{32} \approx 40$ мкм по величине η_k сопоставимо с горением эквивалентной системы монодисперсного порошка того же начального диаметра (различия не превышают 11%). Относительные значения коэффициента полноты сгорания $|1 - \eta_{км}/\eta_{кп}| \cdot 100\%$ при различных величинах $T_{в0}$ и α представлены в табл. 2. Здесь $\eta_{км}$ и $\eta_{кп}$ — коэффициенты полноты сгорания монодисперсных и полидисперсных частиц соответственно при одинаковых D_{32} . Полидисперсное распределение соответствует данным [24].

Отметим, что для полидисперсного распределения диаметров частиц наблюдаются более высокие значения коэффициента полноты сгорания, что обусловлено интенсивным сгоранием мелких частиц на начальном участке камеры дожигания с соответствующим ростом температуры и повышением скорости горения крупных частиц.

Влияние скорости потока во входном сечении. Увеличение числа Маха потока во входном сечении $M_{вх}$ приводит к уменьшению времени пребывания частиц конденсированной фазы в камере дожигания, вследствие чего происходит снижение η_k (рис. 8). Значения коэффициентов полноты сгорания частиц получены для монофракции с диаметром частиц $D_{0i} = 40$ мкм и представлены в относительном виде $\eta_k/\eta_{k0.3}$, где $\eta_{k0.3}$ — расчетное значение, полученное для камеры дожигания с $M_{вх} = 0.3$.

Как видно из рис. 8, снижение числа Маха $M_{вх}$ приводит к увеличению коэффициента полноты сгорания, что является следствием повышения как времени пребывания частиц в камере дожигания, так и статической температуры газа.

Таблица 2
 Значения $|1 - \eta_{км}/\eta_{кп}| \cdot 100\%$

α	$T_{в0} = 300$ К	$T_{в0} = 1000$ К	$T_{в0} = 1500$ К	$T_{в0} = 2000$ К
1.0	10.7	8.7	8.1	6.3
1.5	7.7	6.3	5.9	4.6
2.0	5.6	4.6	4.3	3.3
2.5	4.0	3.3	3.1	2.4

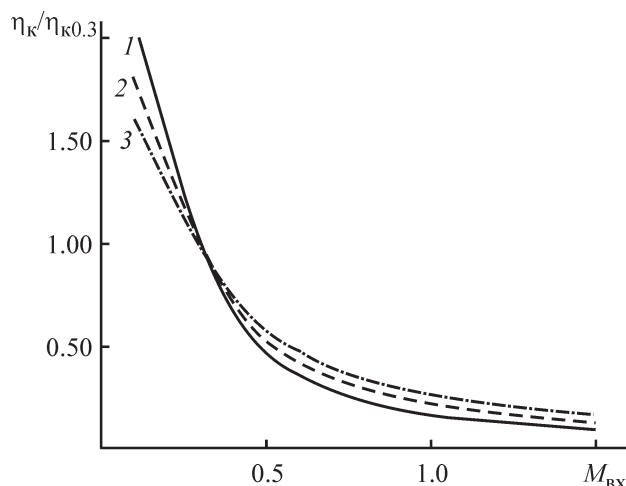


Рис. 8. Зависимость коэффициента полноты сгорания частиц от числа Маха $M_{вх}$.

$T_{в0}$ (К): 1 — 300, 2 — 1000, 3 — 2000.

Выводы

Исследование горения частиц диборида алюминия в воздушном потоке с использованием одномерной математической модели позволило установить следующие закономерности.

1. При температуре воздуха на входе в камеру дожигания 300 К и стехиометрическом соотношении AlB_2 с воздухом для частиц с диаметром $D_{0i} = 5$ мкм полнота их сгорания в рассматриваемом канале может достигать 0.81. С увеличением диаметра полнота сгорания частиц уменьшается и при $D_{0i} = 80$ мкм составляет около 0.32. Эффективности горения полидисперсных и монодисперсных частиц в рассматриваемой постановке задачи практически совпадают при равенстве их средних поверхностных диаметров.

2. Повышение температуры воздуха на входе в камеру дожигания от 300 до 2000 К приводит к увеличению коэффициента полноты сгорания (при прочих равных условиях) в 1.7–1.9 раза для частиц с $D_{0i} = 5$ мкм и в 1.2–1.3 раза для частиц с $D_{0i} = 80$ мкм. Увеличение числа Маха на входе с 0.3 до 1.5 приводит к снижению коэффициента полноты сгорания в 2.9–3.1 раза.

3. Температура воздуха на входе в камеру дожигания влияет на режим горения: при низких температурах (числа Дамкеллера $Da \leq 0.5$) реализуется горение частиц в «кинетическом» режиме, когда с увеличением α происходит монотонное снижение коэффициента полноты сгорания. Повышение температуры приводит к постепенному переходу в «диффузионный» режим горения частиц, который реализуется при числе $Da > 1$. Для реализации эффективного горения частиц

AlB_2 требуется обеспечить температуру продуктов сгорания в камере дожигания около 2400 К. При значениях температуры менее 2400 К скорость горения частиц будет низкая, а при более высоких имеет место интенсивная диссоциация продуктов сгорания.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-49-02031).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов, требующих раскрытия в данной статье.

Информация об авторах

Константин Юрьевич Арефьев, к.т.н., начальник отдела «Аэрокосмические двигатели» ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова», доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н. Э. Баумана, заместитель заведующего лабораторией гиперзвуковых и плазменных технологий МФТИ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9770-1812>

Леонид Самойлович Яновский, д.т.н., начальник отдела «Специальные авиационные двигатели и химмотология» ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова», ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2603-6795>

Дмитрий Алексеевич Ягодников, д.т.н., заведующий кафедрой «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н. Э. Баумана, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9674-7499>

Список литературы

- [1] Van Wie D., D'Alessio S., White M. // Johns Hopkins APL Technical Digest. 2005. V. 26. N 4. P. 430–437.
- [2] Вареных Н. М., Шабунин А. И., Сарабьев В. И., Хрисантов М. В., Шибанов С. В., Калинин С. В. // Боеприпасы и спецхимия. 2013. № 1. С. 44–50.
- [3] Kurth G., Bauer C., Hopfe N. // 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. Propulsion and Energy Forum. AIAA 2015-4234.
- [4] Александров В. Н., Быцкевич В. М., Верховомов В. К., Граменицкий М. Д., Дулепов Н. П., Скибин В. А., Суриков Е. В., Хилькевич В. Я., Яновский Л. С. Интегральные прямоточные воздушно-реактивные двигатели на твердых топливах. Основы теории и расчета. М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. 343 с.
- [5] Бакулин В. Н., Дубовкин Н. Ф., Котова В. Н., Сорокин В. А., Францкевич В. П., Яновский Л. С. Энергоёмкие горючие для авиационных и ракетных дви-

- гателей / Под ред. Л. С. Яновского. М.: Физматлит, 2009. 320 с.
- [6] Байков А. В., Пешкова А. В., Шиховцев А. В., Яновский Л. С. // Горение и взрыв. 2016. Т. 9. № 4. С. 126–131.
- [7] Золотко А. Н., Ушакова Н. А., Демирова М. В. // Физика аэродисперсных систем. 2010. № 47. С. 91–99.
- [8] Арефьев К. Ю., Воронецкий А. В., Прохоров А. Н., Яновский Л. С. // Физика горения и взрыва. 2017. № 3. С. 42–52 [Arefev K. Yu., Voronetskii A. V., Prokhorov A. N., Yanovskii L. S. // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2017. V. 53. N 3. P. 283–292].
- [9] Воронецкий А. В. // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2016. № 1. С. 10–37.
- [10] Вовчук Я. И., Золотко А. Н., Клячко Л. А., Полищук Д. И., Шевчук В. Г. // Физика горения и взрыва. 1974. № 4. С. 615–618.
- [11] Вовчук Я. И., Золотко А. Н., Клячко Л. А., Полищук Д. И. // Физика горения и взрыва. 1975. № 4. С. 556–563.
- [12] Ягодников Д. А. Горение порошкообразных металлов в газодисперсных средах. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. 444 с.
- [13] Яновский Л. С., Разносчиков В. В., Шаров М. С., Коломенцев П. А., Попова А. Б. // Вестн. Москов. авиац. ин-та. 2013. Т. 20. № 4. С. 90–98.
- [14] Ананьев А. В., Борисов Д. М., Васютинцев А. С., Гидаспов В. Ю., Дегтярев С. А., Лаптев И. В., Руденко А. М. // Вестн. Москов. авиац. ин-та. 2009. Т. 16. № 2. С. 131–140.
- [15] Александров В. Ю., Кукишинов Н. В. // Физика горения и взрыва. 2016. № 3. С. 32–36 [Aleksandrov V. Yu., Kukshinov N. V. // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2016. V. 52. N 3. P. 281–285].
- [16] Папырин П. В., Сухов А. В., Ягодников Д. А. // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 6. С. 1–12.
- [17] Александров В. Ю., Арефьев К. Ю., Прохоров А. Н., Федотова К. В., Шаров М. С., Яновский Л. С. // Изв. вузов. Машиностроение. 2016. № 2. С. 65–74.
- [18] Macek A., Semple J. M. K. // Combust. Sci. and Technol. 1969. V. 1. N 3. P. 181–191.
- [19] Li S. C. // Combust. Sci. and Technol. 1991. V. 77. N 1. P. 149–169.
- [20] Yeh C. L., Kuo K. K. // Progress in Energy and Combust. Sci. 1996. V. 22. N 6. P. 511–541.
- [21] Young G., Sullivan K., Zachariah M. R., Yu K. // Combust. and Flame. 2009. V. 156. N 2. P. 322–333.
- [22] Арефьев К. Ю., Кукишинов Н. В., Серпинский О. С. // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2017. № 5. С. 90–102.
- [23] Аверьков И. С., Александров В. Ю., Арефьев К. Ю., Воронецкий А. В., Гуськов О. В., Прохоров А. Н., Яновский Л. С. // Теплофизика высоких температур. 2016. № 6. С. 939–949 [Aver'kov I. S., Aleksandrov V. Yu., Aref'ev K. Yu., Voronetskii A. V., Gus'kov O. V., Prokhorov A. N., Yanovskii L. S. // High Temperature. 2016. N 6. 882–891].
- [24] Ягодников Д. А., Лапицкий В. И., Сухов А. В., Томак В. И. // Инж. вестн. 2014. № 11. С. 12.