

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГОРЕНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ГАЗОВЗВЕСИ ПОРОШКООБРАЗНЫХ ГОРЮЧЕГО И ОКИСЛИТЕЛЯ

Д. А. Ягодников, А. Н. Бобров

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 107005 Москва

Разработана математическая модель процессов воспламенения и горения в двигательной установке порошков алюминия и перхлората аммония, учитывающая их полидисперсное распределение, отличие скоростей, температур газовой и дисперсной фаз. Исследовано влияние давления, соотношения компонентов и дисперсности частиц алюминия на структуру газодисперсного пламени, основные характеристики горения газозвеси и полноту сгорания топлива.

Одно из направлений развития и совершенствования двигательных установок и разработки газодисперсных технологий связано с использованием в качестве рабочего тела газозвеси порошкообразных частиц горючего и окислителя, разлагающегося в волне горения. Выполненные к настоящему времени экспериментальные исследования [1–3] показали возможность организации устойчивого рабочего процесса в камере сгорания модельной двигательной установки на порошкообразных компонентах топлива: алюминий + перхлорат аммония (ПХА), алюминий + полиэтилен. Для всестороннего исследования особенностей физико-химического взаимодействия в натуральных условиях порошкообразных горючего и окислителя, а также с целью прогнозирования направлений дальнейших экспериментов представляется необходимым проведение математического моделирования, направленного на определение характеристик, от которых зависят устойчивость рабочего процесса и высокая степень преобразования химической энергии в двигательной установке на двухкомпонентном порошкообразном топливе.

Основной задачей данной работы является разработка математической модели и алгоритма расчета параметров воспламенения и горения порошкообразных горючего и окислителя, в качестве которых использовались алюминий и перхлорат аммония.

Рассмотрим отдельные стадии взаимодействия горючего и окислителя. Вначале за счет

тепло- и массообмена с источником зажигания (специальным воспламенителем или заполненной высокотемпературными продуктами сгорания зоной обратных токов) происходит газификация частиц ПХА, изучению термокинетических характеристик которой посвящено большое количество работ (см., например, [4, 5]). На практике наибольшее распространение получили модели с упрощенными механизмами разложения, согласно которым процесс протекает частично в одностадийной реакции с образованием конечных продуктов, а также сопровождается диссоциативной сублимацией с последующим сгоранием NH_4 и HClO_4 в первичном пламени вокруг частицы ПХА. Каждой из этих стадий соответствуют эффективные теплоты реакции и кинетические константы, вычисляемые по скорости горения или кинетике высокотемпературного разложения прессованных зарядов ПХА.

Однако вполне очевидно, что процесс газификации ПХА в газодисперсном потоке отличается от такового в слое или прессованном заряде. Причем отличия могут быть связаны с изменением условий прогрева частиц до начала газификации; с возможностью дробления частиц, обусловленной взаимосвязью процессов деформации частицы в потоке и ее разложения; с возможностью срыва первичного пламени с поверхности частицы ПХА при большой скорости ее движения и др. Поэтому в качестве первого приближения в работе используются данные по кинетике разложения частиц ПХА, опубликованные в [6], поскольку условия, при которых они получены, более всего соответствуют принятым в данной задаче и учитывают влияние давления и размера частиц.

Работа выполнена при поддержке Министерства общего и профессионального образования РФ (код проекта ГР-1/99 МАИ).

Рассмотрим основные особенности горения частиц алюминия в продуктах разложения ПХА. Общим для процессов взаимодействия алюминия с разными окислительными средами является существование двух взаимосвязанных стадий — предпламенные процессы нагрева (воспламенение) и парофазное горение. В рассматриваемом случае задача усложняется тем, что возможно протекание различных параллельных реакций взаимодействия алюминия с продуктами разложения ПХА (O_2 , H_2O , Cl_2). Поэтому представляется оправданным использовать обобщенные результаты, описывающие зависимость времени горения частиц алюминия в составе твердого топлива на основе ПХА от определяющих параметров.

При моделировании течения двухфазного потока необходимо описать большое количество физико-химических и термогазодинамических процессов. Задача в такой постановке, находясь на стыке газовой динамики и теории горения дисперсных систем, чрезвычайно сложна. В настоящей работе предлагается одномерная модель, решаемая в двухконтинуальной постановке, когда частицы алюминия и ПХА могут иметь скорость и температуру, отличные от соответствующих характеристик газовой фазы. Считается, что частицы ПХА и алюминия поступают в зону реакции с одинаковыми скоростями, образуя в ней газозвесь.

Не останавливаясь подробно на общепринятых допущениях, отметим следующее. Поскольку в практическом приложении наиболее часто используется разреженная газозвесь, контактным взаимодействием между частицами пренебрегаем. Взаимодействие частиц алюминия с окислительной средой сложного состава происходит в результате поверхностных и парофазных реакций. В работе принято, что вследствие большого содержания в газовой фазе окислительных компонентов, а также высокой начальной температуры газа ($T_b = 2400$ К), равной температуре в зоне обратных токов модельной камеры сгорания [3], скорость нагрева частицы до температуры воспламенения превосходит скорость кристаллизации оксидной пленки. Поэтому можно считать, что характеристики процесса воспламенения не зависят от кристаллической структуры оксидной пленки.

С учетом изложенного на основе анализа экспериментальных данных по кинетике разложения частиц ПХА и воспламенению и горению

частиц алюминия математическая модель, описывающая изменение температуры и радиуса частиц, может быть представлена следующей системой дифференциальных уравнений, полученных из уравнений баланса полной энтальпии и массы частиц:

$$\frac{dr_s}{dt} = \begin{cases} -10^4 g \exp\left(-\frac{8500}{T_s}\right), & T_s < 2300 \text{ К [7],} \\ -2,2 \cdot 10^{-5} \frac{g^{0,9}}{r_s^{0,5}}, & T_s = 2300 \text{ К [8];} \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{dT_s}{dt} = \begin{cases} \frac{3}{r_s c_s \rho_s} \left[-\rho_s q_s \frac{dr_s}{dt} - \text{Nu} \lambda \frac{T_s - T}{2r_s} + \varepsilon_s \sigma (T^4 - T_s^4) \right], & T_s \leq 2300 \text{ К,} \\ 0, & T_s = 2300 \text{ К;} \end{cases}$$

перхлорат аммония:

$$\frac{dr_p}{dt} = \begin{cases} 0, & T_p < 600 \text{ К,} \\ -3,3 \cdot 10^{-3} \left(\frac{p}{10^5}\right)^{0,73}, & T_p = 600 \text{ К, } 10 \leq r_p \leq 80 \text{ мкм [6];} \\ -1,9 \cdot 10^{-3} \left(\frac{p}{10^5}\right)^{0,82}, & T_p = 600 \text{ К, } 80 \leq r_p \leq 180 \text{ мкм;} \end{cases}$$

$$\frac{dT_p}{dt} = \begin{cases} \frac{3}{r_p \rho_p} \left[-\rho_p q_p \frac{dr_p}{dt} - \text{Nu} \lambda \frac{T_p - T}{2r_p} + \varepsilon_p \sigma (T^4 - T_p^4) \right], & T_p \leq 600 \text{ К,} \\ 0, & T_p = 600 \text{ К.} \end{cases}$$

Здесь c , r , ρ (с индексами) — теплоемкость, радиус, плотность частицы; λ — коэффициент теплопроводности; q — тепловой эффект реакции; g , p , T — относительная массовая концентрация окислительных компонентов, давление и температура газовой фазы (параметр без индекса характеризует газовую фазу в целом); Nu — критерий Нуссельта; ε , σ — степень черноты поверхности частиц и постоянная Стефана — Больцмана; индексы s , p относятся к алюминию и ПХА соответственно.

Тепловой эффект реакции взаимодействия алюминия и ПХА принят равным $q_s =$

8,62 МДж/кг [8]. Тепловой эффект реакции разложения ПХА вычислялся по разности энтальпии образования ПХА ($\Delta H_p = 588,7$ кДж/кг) и энтальпии равновесного состава продуктов разложения ПХА (получены на основе расчета по универсальной программе «Астра» [9]) и аппроксимировался полиномом:

$$q_p = -0,0016T_p^2 + 0,841T_p + 3323,9 \text{ кДж/кг.}$$

Динамическое взаимодействие фаз определялось по методике [10] в предположении, что превалирует сила аэродинамического сопротивления:

$$\frac{4\pi}{3} \frac{d}{dt} (\rho r^3 u)_{s,p} = f(u - u_{s,p}) 6\pi\eta r_{s,p},$$

$$f = 1 + 0,179\text{Re}^{0,5} + 0,013\text{Re},$$

$$\text{Re} = |u_{s,p} - u| 2r_{s,p} \rho / \eta,$$

$$\text{Nu} = 2 + 0,6\text{Pr}^{0,33} \text{Re}^{0,5}, \quad \text{Pr} = \eta c / \lambda,$$

где c , u , ρ , η — теплоемкость, скорость, плотность, динамическая вязкость газа, $u_{s,p}$ — скорость частицы (алюминия и ПХА). В данной работе рассматривается полифракционная газовзвесь, моделируемая дифференциальным распределением частиц $\gamma(r_{s,p})$. Вид распределения соответствует выпускаемым промышленностью порошкообразному алюминию марок АСД-1, АСД-4 и порошкообразному перхлорату аммония Д-315 (рис. 1). По известному распределению можно определить суммарное количество частиц алюминия (N_s) и перхлората аммония (N_p) по следующим соотношениям:

$$N_s = \left[\sum_i \gamma(r_{s,i}) r_{s,i}^3 \frac{4\pi}{3} \rho_s \right]^{-1} m_s^0,$$

$$N_p = \left[\sum_j \gamma(r_{p,j}) r_{p,j}^3 \frac{4\pi}{3} \rho_p \right]^{-1} m_p^0,$$

Здесь m^0 — начальная суммарная масса частиц. Индексы i и j соответствуют фракциям с фиксированным начальным радиусом частиц алюминия и ПХА.

В процессе химических реакций первоначальная масса ПХА и алюминия уменьшается с одновременным возрастанием степени их выгорания. Математически это можно представить следующим образом:

- масса непрореагировавших алюминия и ПХА:

$$m_s = \frac{4\pi}{3} \rho_s N_s \sum_i \gamma(r_{s,i}) r_{s,i}^3,$$

$$m_p = \frac{4\pi}{3} \rho_p N_p \sum_j \gamma(r_{p,j}) r_{p,j}^3.$$

- масса прореагировавшего алюминия и газифицированного ПХА:

$$\Delta m_s = \frac{4\pi}{3} \rho_s N_s \sum_i \gamma(r_{s,i}) [(r_{s,i}^0)^3 - r_{s,i}^3],$$

$$\Delta m_p = \frac{4\pi}{3} \rho_p N_p \sum_j \gamma(r_{p,j}) [(r_{p,j}^0)^3 - r_{p,j}^3],$$

где r_i^0 , r_j^0 — начальные радиусы частиц алюминия и ПХА соответственно i -й и j -й фракций.

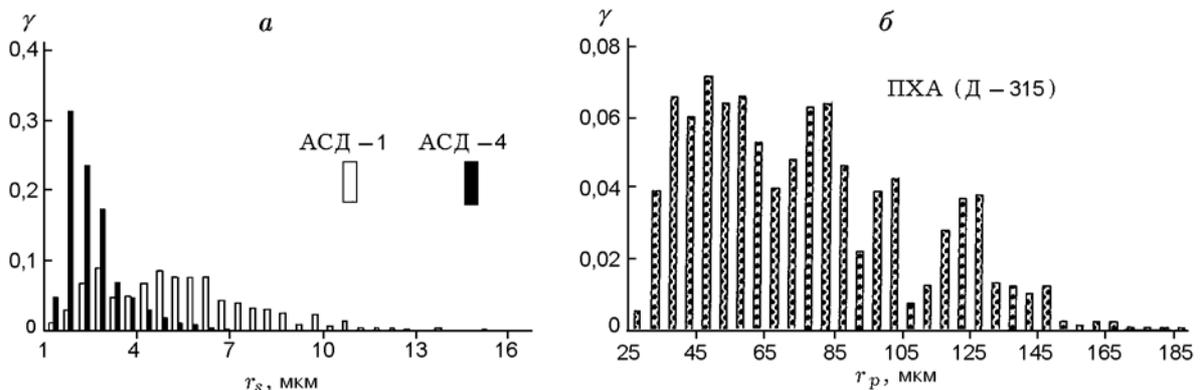


Рис. 1. Плотность распределения количества частиц

В работе использована модель осредненно-го одномерного течения газовой фазы, влияние частиц на которую происходит за счет точечных источников (стоков) массы и тепла. При этом предполагается термодинамическое равновесие газовой фазы (по всей двухкомпонентной газозвеси) в каждом сечении. Теплоемкости газовой фазы и твердых частиц приняты равными, что позволяет перейти от уравнений для энтальпии к уравнениям для температуры. Поскольку начальная температура и температура продуктов сгорания ПХА приняты равными, изменение температуры системы в соответствии с уравнением баланса тепла в элементарной ячейке будет определяться массой выгоревшего алюминия. Предполагается, что сток массы газовой фазы (согласно термодинамическому анализу ее состав практически не меняется) связан с поверхностным окислением и выгоранием частиц алюминия, а приток — с горением частиц ПХА. В связи с этим для газовой фазы может быть записана следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= \frac{4}{\pi D^2 \rho} \frac{d}{dt} (\Delta m_p - K \Delta m_s), \\ T &= T^0 + (T^* - T^0) \varphi_s, \quad \rho = \frac{p}{RT(1-z)}, \\ g &= \left(g^0 - 1,9 \frac{\Delta m_p}{m_s^0 + m_p^0} \right) \varphi_p, \\ z &= \frac{m_p + m_s^0 (1 - \varphi_s + 51/27 \varphi_s)}{m_s^0 + m_p^0}, \\ \alpha_t &= \frac{\Delta m_p}{(m_s^0 - \Delta m_s) K}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь z — массовая доля к-фазы; R — газовая постоянная; D — диаметр камеры сгорания; $K = 2,614$ — массовое стехиометрическое соотношение компонентов; α_t — текущее значение коэффициента избытка окислителя; T^* — адиабатическая температура горения; индекс нуль соответствует начальным значениям параметров. Входящие в (2) полнота сгорания алюминия и полнота газификации ПХА рассчитываются по соотношениям

$$\varphi_s = 1 - m_s/m_s^0, \quad \varphi_p = 1 - m_p/m_p^0.$$

Суммарная полнота преобразования химической энергии топлива определяется по отношению значений расходного комплекса, полученных в данной работе и по программе «Астра»:

$$\varphi_{\Sigma} = \beta/\beta^*, \quad \beta = \sqrt{RT(1-z)}/A(k),$$

где $A(k) = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{1/(k-1)} \sqrt{\frac{2k}{k+1}} = 0,641$ — параметр сверхзвукового течения газа, рассчитанный для показателя процесса расширения $k = 1,16$.

Системы уравнений (1), (2) решались конечно-разностным методом при следующих начальных условиях:

$$t = 0: \quad u_s = u_p = u^0, \quad T = T_b, \quad T_s = T_s^0 = 300 \text{ К},$$

$$T_p = T_p^0 = 300 \text{ К}, \quad g^0 = 0,54.$$

Значения теплофизических параметров газовой фазы приняты по данным работы [11] для молекулярного кислорода и аппроксимированы полиномами в функции температуры. Необходимые физико-химические характеристики алюминия и ПХА взяты из [8]. В расчетах используется международная система (СИ) размерности физических величин, например: p — Па; $r_{s,p}$ — м, T — К, t — с.

В общем случае рассматриваемая задача содержит большое количество геометрических и режимных параметров, непосредственно входящих в математическую модель и некоторые из них: диаметр камеры сгорания (0,07 м), начальные скорости подачи компонентов (4 м/с), температура в зоне обратных токов (2400 К) — в расчетах взяты такими же, как и в экспериментах [3].

Результаты расчетов характеристик структуры зоны горения порошкообразных ПХА марки Д-315 и алюминия марок АСД-1 и АСД-4 приведены на рис. 2. Область $\bar{x} \leq 0,1$ заполнена горячим газом с температурой $T_b = 2400 \text{ К}$, что соответствует условию непрерывного воспламенения смеси благодаря теплообмену с источником тепловыделения, например зоной обратных токов, экспериментально зарегистрированной в [3].

Значения начальной скорости частиц алюминия и ПХА ($u_{s,p}^0 = 4 \text{ м/с}$) соответствуют скорости несущего газа, необходимого для псевдооживления и подачи порошкообразных

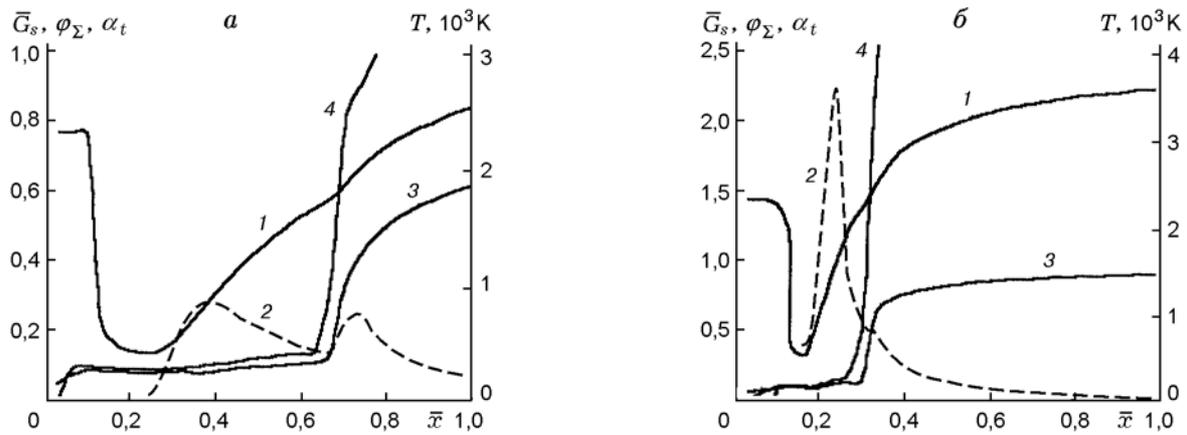


Рис. 2. Структура пламени в двухкомпонентной газозвеси: горючее: *a* — АСД-1, *b* — АСД-4; 1 — T , 2 — \bar{G}_s , 3 — φ_Σ , 4 — α_t , $\alpha = 1,53$, $p = 1$ МПа

компонентов топлива в камеру сгорания двигательной установки. Согласно экспериментальным данным [3] массовый расход несущего газа не превышает 3 ÷ 5 % суммарного расхода топлива, и поэтому его влияние на гидродинамические характеристики потока не учитывалось. Таким образом, в зону реакции поступает газозвесь с большим содержанием конденсированной фазы (≈ 90 %).

Очевидно, что для начала воспламенения основной массы алюминия необходимо иметь активные окислительные компоненты в газовой фазе. Наличие таких компонентов в качестве продуктов разложения частиц ПХА и будет задавать местное значение коэффициента избытка окислителя α_t . По мере движения частиц алюминия и ПХА происходит их нагрев за счет кондуктивного и радиационного теплообмена с газовой фазой, температура которой понижается. При температуре частиц ПХА 600 К начинается их разложение и, следовательно, повышается значение α_t . Одновременно протекает процесс взаимодействия частиц алюминия с образующимися продуктами разложения. Вследствие этого возрастает газоприход и уменьшается доля к-фазы (рис. 3). Во фронте пламени наблюдаются наибольшие значения градиентов температур и тепловыделения в системе (пропорционально массовому потоку прореагировавшего алюминия \bar{G}_s). Поскольку рассматривается полифракционный состав горючего и окислителя, в фиксированном сечении возможна реализация как поверхностных, так и парофазных реакций. Смена режимов реагирования алюминия, как показы-

вают результаты экспериментов [8], происходит в момент нарушения сплошности оксидной пленки или ее полного удаления с поверхности частицы, температура которой составляет ≈ 2300 К и на стадии горения практически не изменяется. Выделившееся при этом тепло идет на нагрев газовой фазы.

В общем случае гидродинамическая картина горения и профиль основных параметров зависят от дисперсности порошка горючего. Так, для алюминия марки АСД-1 (с более широким спектром размеров частиц) зависимость $\bar{G}_s(x)$ характеризуется двумя экстремумами (см. рис. 2, *a*). Сначала полностью выгорают и газифицируются частицы мелких фракций и первый максимум располагается ближе к началу координат, а на нисходящей ветви располагается второй экстремум, обусловленный наличием в исходном распределении крупных частиц ПХА и алюминия (см. рис. 1). Для АСД-4 получен только один экстремум (см. рис. 2, *b*), который расположен вблизи начального сечения, так как за счет меньших размеров частиц они быстрее воспламеняются и сгорают. По той же причине при прочих равных условиях возрастают полнота сгорания (на 48,4 %) и температура газозвеси (на 41,6 %) на выходе из камеры сгорания.

С практической точки зрения наибольший интерес представляют данные по влиянию размера частиц алюминия, соотношения компонентов и давления на характеристики воспламенения и горения двухкомпонентной газозвеси. Проанализируем подробнее эти зависимости.

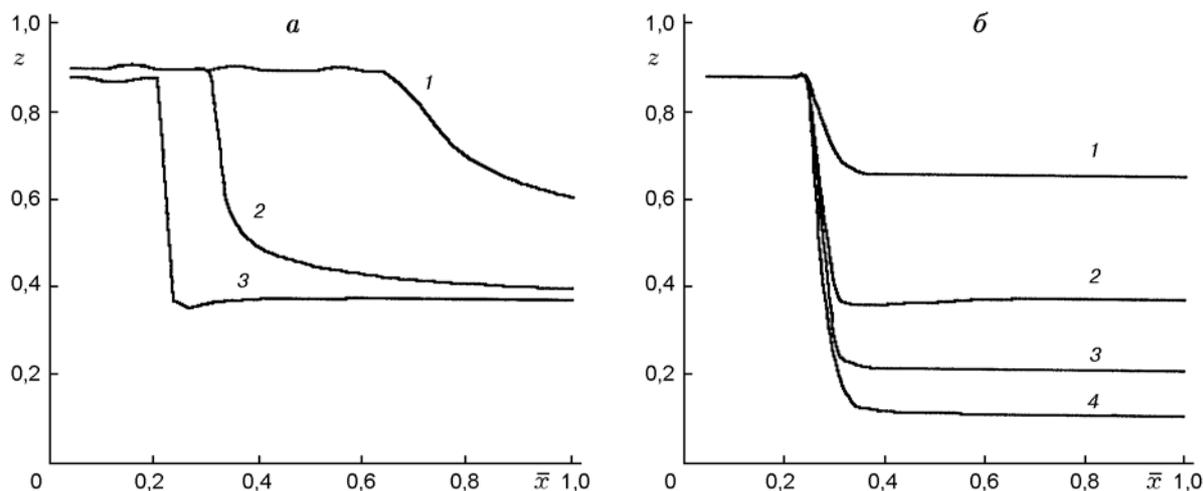


Рис. 3. Изменение массовой доли к-фазы вдоль течения:

a — влияние давления и дисперсности частиц алюминия, $\alpha = 1,53$, 1 — АСД-1, $p = 1$ МПа, 2 — АСД-4, $p = 1$ МПа, 3 — АСД-4, $p = 4$ МПа; *б* — влияние коэффициента избытка окислителя, АСД-4, $p = 2$ МПа, α : 1 — 0,5; 2 — 1,53; 3 — 3; 4 — 6

С увеличением давления интенсифицируются процессы тепло- и массообмена в системе «газ — частица» и, следовательно, сокращается период индукции воспламенения. Кроме того, с ростом давления увеличивается скорость газификации ПХА [6] и частицы алюминия начинают раньше взаимодействовать с окислительной средой, что можно интерпретировать как увеличение характерного времени пребывания в камере сгорания. Все это приводит, во-первых, к снижению содержания к-фазы в продуктах сгорания (см. рис. 3, *a*) за счет возрастания газоприхода в системе и, во-вторых, к повышению суммарной степени преобразования химической энергии двухкомпонентного порошкообразного топлива (рис. 4). На рис. 4 нанесены также результаты экспериментальных исследований [3]. Видно, что для топлива на основе АСД-4 экспериментальные и теоретические данные удовлетворительно согласуются, а в случае использования алюминия марки АСД-1 наблюдаются значительные отличия, особенно при $p > 1$ МПа. Это может быть связано с большими потерями, вызванными недогоранием топлива в условиях эксперимента. Полученные данные о влиянии дисперсности частиц алюминия имеют очевидное объяснение: мелкие частицы алюминия быстрее прогреваются и сгорают, ускоряя тем самым процесс газификации частиц ПХА, и на фиксированной длине камеры сгорания позволяют получить большие значения φ_{Σ} .

Из полученных результатов следует важный практический вывод. Поскольку эффективность использования металлосодержащего топлива пропорциональна $\sqrt{RT}(1-z)$ [8], снижение z с ростом p , α и уменьшением средних размеров частиц алюминия будет повышать импульсные характеристики двигательной установки на двухкомпонентном порошкообразном топливе.

Расчетами установлено, что для крупнодисперсного алюминия АСД-1 с увеличением

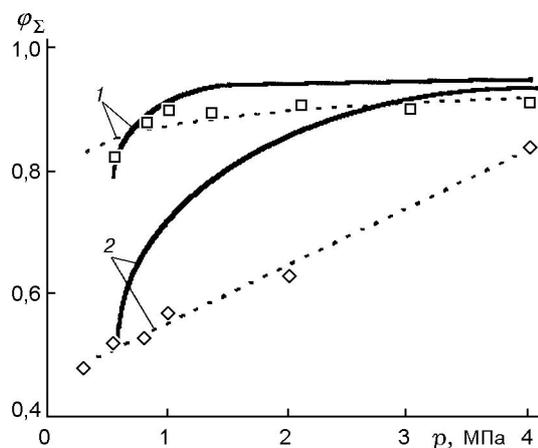


Рис. 4. Зависимость полноты сгорания топлива от давления:

горючее: 1 — АСД-4, 2 — АСД-1, $\alpha = 1,53$; сплошные линии — расчет, штриховые — эксперимент [3]

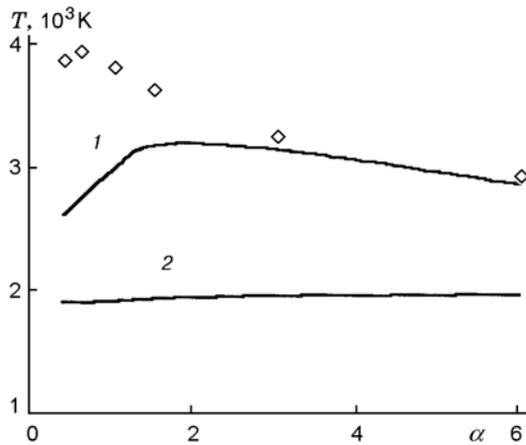


Рис. 5. Зависимость температуры горения от α : горючее: 1 — АСД-4, 2 — АСД-1, $p = 0,5$ МПа; точки — адиабатическая температура горения T^*

коэффициента избытка окислителя по отношению к стехиометрическому составу повышается температура газа на правой границе пламени (рис. 5). Напротив, для мелкодисперсного алюминия марки АСД-4 наблюдается слабо выраженный экстремум, смещенный относительно стехиометрического состава в область обедненной смеси ($\alpha \approx 1,5 \div 2$). Отметим, что эта координата не соответствует максимуму равновесной температуры горения ПХА и алюминия ($\alpha \approx 0,87$).

Повышение температуры при обеднении газозвеси приводит также к повышению суммарной полноты сгорания топлива (рис. 6, а), поскольку при этом интенсифицируются процессы тепло- и массообмена при нагреве частиц алюминия и ПХА. Так как степень га-

зификации ПХА практически не зависит от α (рис. 6, б), интенсификация рабочего процесса обусловлена увеличением полноты сгорания алюминия. Вследствие этого уменьшается доля к-фазы в продуктах сгорания (см. рис. 3, б), что может привести, как и в случае роста или уменьшения размера частиц алюминия, к повышению эффективности использования двигательной установки на двухкомпонентном порошкообразном топливе. Зависимость φ_{Σ} от дисперсности частиц алюминия аналогична рассмотренной выше: полнота сгорания топлива на основе АСД-4 больше, чем у топлива на основе АСД-1. Однако с ростом давления отличие уменьшается в связи с тем, что зависимость $\varphi_{\Sigma}(p)$ для АСД-1 более сильная.

ВЫВОДЫ

- Разработана математическая модель процессов воспламенения и горения газозвеси порошков алюминия и перхлората аммония, учитывающая их полидисперсное распределение, отличие скоростей, температур газовой и дисперсной фаз и позволяющая исследовать влияние давления, соотношения компонентов и дисперсности порошка алюминия на основные характеристики воспламенения и горения газозвеси.

- В процессе разработки двигательной установки на двухкомпонентном порошкообразном топливе следует выбирать коэффициент избытка окислителя больше единицы, поскольку в данном случае можно повысить полноту сгорания топливной смеси и снизить содержание к-фазы в продуктах сгорания.

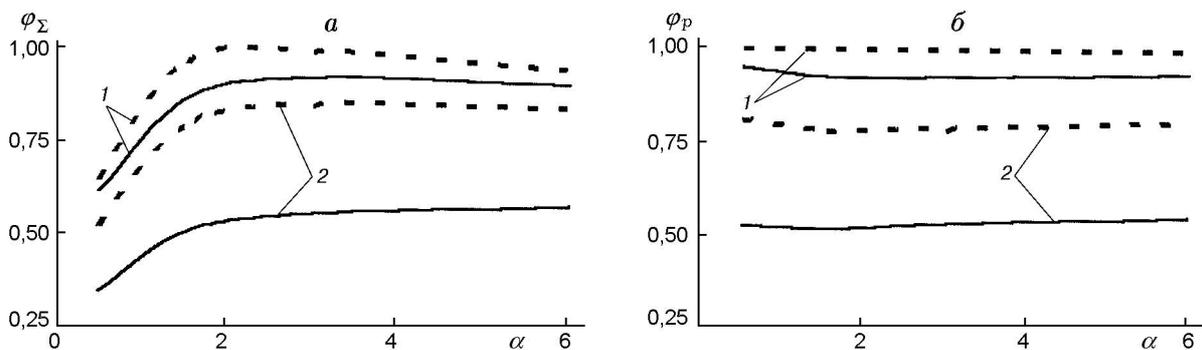


Рис. 6. Зависимость суммарной полноты сгорания топлива (а) и ПХА (б) от коэффициента избытка окислителя и давления:

p , МПа: 1 — 2, 2 — 0,5; горючее: сплошные линии — АСД-1, штриховые — АСД-4

ЛИТЕРАТУРА

1. Loftus H. J., Montanino L. N., Bryndle R. C. Powder rocket feasibility evaluation // AIAA Paper. N 1162. 1972.
2. Шерр М., Рейнхардт Т. Ф. Газогенератор на псевдоожигенном порошкообразном топливе // Вопросы ракетной техники. 1974. № 9. С. 55–62.
3. Бобров А. Н., Ягодников Д. А., Попов И. В. Воспламенение и горение порошкообразных горючего и окислителя // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 5. С. 3–7.
4. Моделирование процессов горения твердых топлив / Л. К. Гусаченко, В. Е. Зарко, В. Я. Зырянов, В. П. Бобышев. Новосибирск: Наука, 1985.
5. Механизм термического разложения перхлората аммония / Под ред. О. П. Коробейничева. Новосибирск, 1970.
6. Boggs T. L., Zurn D. E., Netzer D. W. Ammonium perchlorate combustion. Effects of sample preparation, ingredient type, pressure, temperature and acceleration environments // Combust. Sci. Technol. 1973. V. 7, N 2. P. 177–183.
7. Гуревич М. А., Озеров Е. С., Юринов А. А. О влиянии пленки окисла на характер воспламенения алюминия // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 4. С. 50–55.
8. Горение порошкообразных металлов в активных средах / П. Ф. Похил, А. Ф. Беляев, Ю. В. Фролов и др. М.: Наука, 1972.
9. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов / Г. Б. Синярев, Н. А. Ватолин, Б. Г. Трусов, Г. К. Моисеев. М.: Наука, 1982.
10. Гавин Л. Б., Медведев В. А., Наумов Н. А. Модель двухфазной турбулентной струи с учетом гетерогенного горения частиц // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24, № 3. С. 12–17.
11. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1971.

*Поступила в редакцию 25/X 1999 г.,
в окончательном варианте — 10/XI 2000 г.*
