

О. Б. Ковалев, А. П. Петров, В. М. Фомин

СТРУКТУРА ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

В основу описания физико-химических процессов в волне горения смесевых твердых топлив положен математический аппарат механики гетерогенных сред, позволяющий рассматривать гетерогенные и газофазные режимы горения отдельных компонентов с обобщенной кинетикой химических реакций и рассчитывать их влияние на скорость волны горения. С помощью скоростной кинематики экспериментально исследован процесс агломерации порошкообразного Al на горящей поверхности. Построена математическая модель агломерации Al в волне горения, обосновывающая наблюдаемые в экспериментах механизмы агломерации. На основе усовершенствованной методики оптической регистрации движения фронта горения нагруженных образцов топлива определена зависимость скорости горения от деформации. Механизм влияния напряжения на скорость горения смесевое твердого топлива связан с активизацией химических связей полимерной матрицы, что увеличивает скорость ее деструкции. Использование кинетической теории долговечности полимеров позволило получить аналитическую формулу, выражающую зависимость относительной скорости горения от измеряемой деформации образца.

Методы описания структуры волны горения твердых топлив исходят из работ Я. Б. Зельдовича и Д. А. Франк-Каменецкого, развитых применительно к гомогенно горящим порохам и другим подобным системам. Смесевые твердые ракетные топлива (СТРТ) горят гетерогенно согласно своей гетерогенной природе.

Попытка учесть гетерогенную структуру СТРТ впервые предпринята, по-видимому, в модели гранулярно-диффузионного пламени [1]. Позднее в [3] развита модель конкурирующих пламен, основанная на соотношениях общего баланса массы и тепла в волне горения. В последнее время получил распространение метод [4], в котором СТРТ заменяется слоистой системой типа «сэндвич» с сохранением характерных размеров компонентов и исходного состава. Достоинства и недостатки моделей [1—3] детально проанализированы в [5].

Поверхность горения СТРТ, особенно металлизированных, имеет неоднородности в виде включений дисперсных компонентов. Связанное с этим явление агломерации [5—7] Al вносит особенности в волну горения. Своеобразное влияние на скорость волны горения оказывают приложенные к образцу механические напряжения [8]. Центральное место в данной работе занимают вопросы экспериментального и теоретического исследования этих процессов.

1. Частицы окислителя (ПХА), соизмеримые по размерам, образуют в топливе элементарные ячейки (карманы) [7]. При прохождении волны горения в карманах могут накапливаться металлические частицы, происходит их агломерация, воспламенение и горение [7]. Это создает дополнительный приток тепла на границе прогретого слоя и оказывает существенное влияние на структуру волны горения. На рис. 1, а приведена схема поверхности кармана, ограниченного упорядоченно расположенными и выступающими частицами ПХА.

В основу описания физико-химических процессов в волне горения, учитывающего размеры дисперсных компонентов, плотность распределения и форму выступов, положен математический аппарат механики гетерогенных сред [9].

Математическая модель включает следующие основные допущения:

а) поверхность горения представляется состоящей из плоского общего фронта пиролиза матрицы связующего, над которым вводится двухфазный слой из неподвижно расположенных и выступающих частиц дисперсных компонентов;

б) на элементарных реагирующих поверхностях компонентов протекают химические реакции разложения или горения с собственными

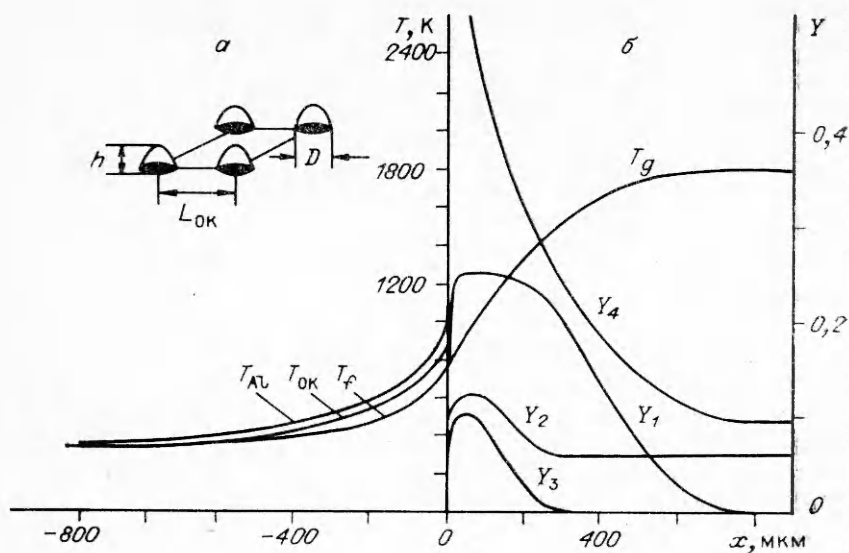


Рис. 1. Схема поверхности элементарной ячейки (а) и распределения концентраций газообразных компонентов и температуры в волне горения (б).

тепловыми эффектами, температурами элементарных поверхностей, скоростями их выгорания и т. п.;

в) вместо детальной кинетики химических реакций горения СТРТ, которая осложнена большим количеством слабо изученных элементарных химических реакций, рассматривается лишь некоторый набор обобщенных реакций, отвечающих за наличие характерных зон (микропламен) (см. таблицу);

г) пиролиз ПХА состоит на 70 % из экзотермической дефлаграции с выходом газообразных окислительных продуктов A_1 и на 30 % из эндотермической диссоциации с сублимацией, продуктами которой являются газообразные аммиак A_2 и хлорная кислота A_3 [10]. Аммиак и хлорная кислота после предварительного перемешивания вступают в реакцию и образуют собственное пламя ПХА с выходом окислительных продуктов A_1 . Пиролиз полимерного горючего эндотермичен. Окислительные продукты A_1 вступают в реакцию с газообразными продуктами пиролиза горючего A_4 с возникновением диффузионного пламени и образованием конечных продуктов (см. таблицу);

Номер реакции	Обобщенные реакции	Закон сохранения массы	Примечание
1	$B_{ок} \xrightarrow{J_{ок}} \sum_{j=1}^3 v_{1j} A_j$	$\mu_{ок} = \sum_{j=1}^3 v_{1j} \mu_j$	Разложение окислителя
2	$B_f \xrightarrow{J_f} v_{24} A_4$	$\mu_f = v_{24} \mu_4$	Разложение связующего
3	$v_{32} A_2 + v_{33} A_3 \xrightarrow{\psi} v_{31} A_1$	$v_{22} \mu_2 + v_{23} \mu_3 = v_{31} \mu_1$	Собственное пламя перхлората аммония
4	$v_{41} A_1 + v_{44} A_4 \xrightarrow{\theta} v_{45} A_5$	$v_{41} \mu_1 + v_{44} \mu_4 = v_{45} \mu_5$	Диффузионно-кинетическое пламя
5	$v_{51} A_1 + v_{52} A_1 \xrightarrow{J_{A1}} v_{53} A_1 + v_{55} A_5$	$v_{51} \mu_1 + v_{52} \mu_{A1} = v_{53} \mu + v_{55} \mu_5$	Горение A_1 в окислительных продуктах СТРТ

д) Al вступает в реакцию с окислительными продуктами с образованием окиси Al_2O_3 и газообразных конечных продуктов;

е) коэффициенты бинарной диффузии газообразных компонентов равны между собой. Число Льюиса $Le = \lambda_g / \rho_g D_g c_p = 1$;

ж) изменение параметров течения вдоль поверхности горения пренебрежимо мало по сравнению с их изменением в нормальном направлении;

з) формы выступающих частиц задаются квадратичными функциями:

$$d_{ок}(x) = D(1 - x/h)^2 \chi(x - h), \quad d_{Al}(x) = 4x(1 - x/\delta_{ар}) \chi(x - \delta_{ар}),$$

$$\chi(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 0, \\ 0, & x > 0, \end{cases}$$

где D — диаметр исходных частиц ПХА; $\delta_{ар}$ — диаметр частиц Al или его агломератов; h — высота выступов.

Описание околоповерхностных процессов в газе с учетом относительного расположения и плотности распределения на поверхности элементов неоднородности сводится к следующей системе уравнений:

$$m_T \frac{d\vec{U}}{dx} - \frac{d}{dx} \varepsilon \rho_g D_g \frac{d\vec{U}}{dx} = \vec{F}(\vec{U}),$$

$$\vec{U} = (Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, T_g),$$

$$p = \rho_g T_g R \sum_{i=1}^5 Y_i / \mu_i, \quad \sum_{i=1}^5 Y_i = 1, \quad (4)$$

$$\vec{F} = \begin{pmatrix} (v_{11}\mu_1 - Y_1) J_v^0 + \varepsilon (v_{31}\mu_1 \psi - v_{41}\mu_1 \Theta) - v_{31}\mu_1 J_v^{Al}, \\ (v_{12}\mu_2 - Y_2) J_v^0 - \varepsilon v_{32}\mu_2 \psi, \\ (v_{13}\mu_3 - Y_3) J_v^0 - \varepsilon v_{33}\mu_3 \psi, \\ - \varepsilon v_{44}\mu_4 \psi, \\ (Q_{ок} J_v^0 - q_v^0 + Q_{Al} J_v^{Al} - q_v^{Al} + \varepsilon (v_{32}\mu_2 \psi \Delta H^* + v_{44}\mu_4 \Theta \Delta H^{**})), \end{pmatrix}$$

$$J_v^0 = J_{ск} \frac{\pi d_{ок}}{L_{ок}^2}, \quad J_v^{Al} = J_{Al} \frac{\pi d_{Al}}{L_{Al}^2}$$

$$q_v^0 = \pi \kappa_{ок} (T_g - T_{ок}^s) \frac{d_{ок}}{L_{ок}^2}, \quad q_v^{Al} = \pi \kappa_{Al} (T_g - T_{Al}^s) \frac{d_{Al}}{L_{Al}^2}$$

Здесь μ_i, Y_i ($i = 1-5$) — молекулярные массы и концентрации газообразных компонентов (1 — окислительные продукты ПХА, 2 — аммиак, 3 — хлорная кислота, 4 — горючее, 5 — конечные продукты реакций); T_g, ρ_g — температура и плотность газа; D_g — коэффициент диффузии; p — давление; $\varepsilon(x)$ — околоповерхностная пористость; $L_{ок}, L_{Al}$ — расстояния между центрами частиц ПХА и Al соответственно; $T_{ок}^s, T_{Al}^s$ — температуры поверхностей частиц; $Q_{ок}, Q_{Al}$ — тепловые эффекты реакций разложения ПХА и горения Al; $\Delta H^*, \Delta H^{**}$ — тепловые эффекты реакций в собственном пламени ПХА и диффузионно-кинетическом пламени (см. таблицу); v_{ij} — стехиометрические коэффициенты; $\kappa_{ок}, \kappa_{Al}$ — коэффициенты теплоотдачи частиц в двухфазном слое.

Массовая скорость m_T — газообразных продуктов разложения ПХА и горючего — изменяется по толщине двухфазного слоя:

$$m_T = \left(1 - \frac{\pi D^2}{4L_{ок}^2}\right) J_f + J_{ок} \frac{\pi D h}{3L_{ок}^2} [1 - (1 - x/h)^3 \chi(x - h)] +$$

$$+ J_{Al} \frac{2}{3} \frac{\pi \delta_{ар}^2}{L_{Al}^2} [1 - (1 - 3x^2/\delta_{ар}^2 + 2x^3/\delta_{ар}^3) \chi(x - \delta_{ар})].$$

Выражение для m_T получено в результате интегрирования уравнения неразрывности.

Расстояние между центрами частиц определяется из условия их шахматного расположения на поверхности:

$$L_{ок} = D \left[\frac{2\sqrt{3}}{3} \pi \left(1/4 + \frac{1 - \beta_{ок}}{3\beta_{ок}} \right) \right]^{1/2}.$$

Плотность распределения элементов неоднородности равна отношению площади, занятой включениями, к полной площади, тогда величина околосредней пористости

$$\varepsilon(x) = 1 - \frac{\pi}{4L_{ок}^2} \{ D^2 (1 - x/h)^2 \chi(x-h) + 16x^2 (1 - x/\delta_{ар})^2 \chi(x - \delta_{ар}) \}.$$

Члены, описывающие источники в правых частях уравнений, взяты в виде

$$\psi = Z_3 \rho_g^2 \frac{Y_2}{\mu_2} \frac{Y_3}{\mu_3} \exp\left(-\frac{E_3}{RT_g}\right), \quad \Theta = Z_4 \rho_g^2 \frac{Y_1}{\mu_1} \frac{Y_4}{\mu_4} \exp\left(-\frac{E_4}{RT_g}\right),$$

где Z_3, Z_4 и E_3, E_4 — предэкспоненты и энергии активаций соответствующих реакций (см. таблицу).

Расчет поля температур в прогретом слое проводится с использованием многотемпературного метода [9], основанного на осреднении теплофизических параметров по каждому компоненту в элементарном макроразделе смеси. В случае СТРТ, состоящего из горючего, дисперсного окислителя и металлических частиц, распределение температур $T_f, T_{ок}, T_{Al}$ по каждому из компонентов удовлетворяет системе уравнений

$$\begin{aligned} \omega_f \vec{A} \frac{d\vec{\tau}}{dx} &= \frac{d}{dx} \vec{B} \frac{d}{dx} \vec{\tau} + \vec{C}, \\ \vec{A} &= \{\rho_j \beta_j c_j\}, \quad \vec{B} = \{\beta_j \lambda_j\}, \quad \vec{\tau} = \{T_j\}, \quad j = (f, ок, Al), \\ \vec{C} &= (q_{f,ок} + q_{f,Al}, q_{ок,f}, q_{Al,f}), \\ q_{f,ок} = -q_{ок,f} &= \frac{12 \beta_{ок} \lambda_f}{D^2} (T_{ок} - T_f), \quad q_{f,Al} = \frac{12 \beta_{Al} \lambda_f}{\delta_s^2} (T_{Al} - T_f), \end{aligned} \quad (2)$$

где ω_f — линейная скорость пиролиза матрицы связующего; $\beta_f, \beta_{ок}, \beta_{Al}$ — объемные доли горючего, окислителя и металла; $\lambda_f, \lambda_{ок}, \lambda_{Al}$ — коэффициенты теплопроводности; $c_f, c_{ок}, c_{Al}$ — удельные теплоемкости.

Граничные условия для твердой фазы состоят в следующем. Температура далеко от поверхности раздела фаз одинакова для всех компонентов и равна начальной температуре:

$$x = -\infty: T_f = T_{ок} = T_{Al} = T_0.$$

На границе раздела фаз обеспечивается непрерывность температуры связующего T_f с температурой газовой фазы T_g и условие баланса тепловых потоков:

$$\begin{aligned} x = 0: T_f = T_g = T_f^s, \quad T_{ок} = T_{ок}^s, \quad T_{Al} = T_{Al}^s, \\ J_f Q_f + J_f (c_p - c_f) T_f^s - \lambda_f \frac{dT_f}{dx} = -\lambda_g \frac{dT_g}{dx}. \end{aligned}$$

Граничные условия в газовой фазе сводятся к следующему. На границе раздела фаз кроме условий неразрывности температуры и баланса тепловых потоков задаются концентрации газовых компонентов:

$$x = 0: Y_1 = Y_2 = Y_3 = 0, \quad Y_4 = 1.$$

Температура в газе на достаточном удалении от поверхности раздела постоянна и равна температуре горения T_r :

$$x = +\infty: T_g = T_r, \quad \frac{d}{dx} Y_i = 0, \quad i = 1, 2, 3.$$

Значения диаметра частиц Al, их температура T_{Al}^s и плотность распределения на поверхности могут быть определены из решения задачи об агломерации, модель которой рассмотрена ниже.

Уравнения (1), (2) с учетом указанных граничных условий решались численно с использованием неявной разностной схемы на неравномерной сетке. Разностная сетка измельчалась в окрестности твердофазной границы и в двухфазном слое. Величины массовых скоростей вычислялись по формулам

$$J_{ок} = A_{ок} \exp\left(-\frac{E_{ок}}{RT_{ок}^s}\right), \quad J_f = A_f \exp\left(-\frac{E_f}{RT_f^s}\right),$$

температуры элементарных поверхностей компонентов T_f^s , $T_{ок}^s$ определялись методом итераций по аналогии с [11].

На рис. 1, б приведены результаты расчета структуры волны горения при $p = 1$ атм, где хорошо видна локализация характерных зон. Собственное пламя ПХА наблюдается в области, где обращается в нуль концентрация хлорной кислоты. Диффузионно-кинетическое пламя соответствует нулевому значению концентрации окислительных продуктов.

Значения основных параметров задачи (константы кинетики химических реакций, теплофизические характеристики и другие, используемые в расчетах) частично заимствованы из [10, 12]; состав модельного топлива $\beta_{ок} = 0,75$, $\beta_{Al} = 0,11$, $D = 100$ мкм, $\delta_s = 8$ мкм, $h = 50$ мкм.

В представленном на рис. 1, б расчете горение и агломерация частиц Al не рассматривались, учитывалось лишь тепловыделение за счет высокотемпературного окисления металла на поверхности и его вклад в структуру волны горения.

2. Процесс агломерации порошкообразного Al на горячей поверхности, который на протяжении более двух десятилетий составил предмет большого числа исследований, до сих пор остается слабопредсказуемым. Для топлив на основе ПХА установлено, что агломераты, образующиеся из накапливающихся частиц металла, воспламеняются и, как правило, диспергируют в газовую фазу. Наиболее характерные особенности агломерации частиц: слияние, воспламенение и унос — продемонстрированы на рис. 2 кадрами скоростной киносъемки. В левой части кинокадров видно формирование конгломерата из мелких частиц Al, их слияние и образование сферического агломерата. В правой части наблюдается разогрев, воспламенение и отрыв сферической частицы от поверхности горения.

Сжигание образцов проводилось при $p = 1$ атм в установке постоянного давления. На поверхности горения появляются светящиеся частицы Al, которые накапливаются, спекаются и в отдельных местах образуются конгломераты частиц. В результате дальнейшего разогрева частицы сливаются в сферические агломераты, воспламеняются и уносятся с поверхности. Такая картина агломерации Al типична для топлив на основе ПХА.

Математическая модель предполагает, что центрами накопления и агломерации металлических частиц являются карманы, образованные выступающими над поверхностью горения частицами окислителя (см. рис. 1, а). Возникающие

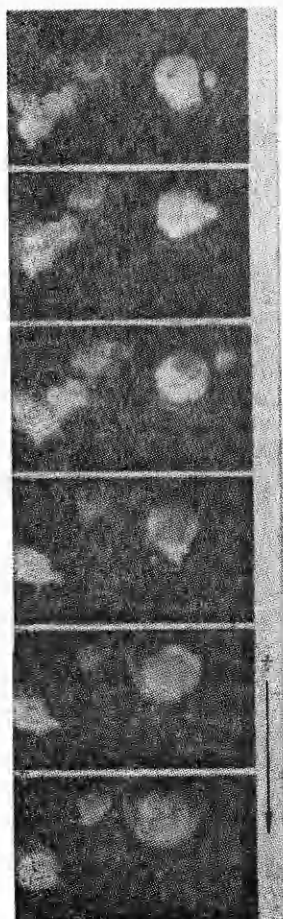


Рис. 2. Кинограмма картины процесса агломерации Al во времени (указано стрелкой).

агломераты Al укрупняются, с одной стороны, за счет контактирования с исходными частицами, которые поступают из прогретого слоя, и с другой — в результате взаимодействия их между собой. Отрыв и унос агломератов фиксируется в момент воспламенения. Рассмотрим смесевой состав твердого топлива, состоящий из ПХА с некоторой функцией распределения диаметров по размерам.

Из закона сохранения массы металла можно получить уравнение для расчета диаметра частиц [13]

$$\frac{d}{dt} \delta_j = \frac{1}{2} \beta_{Al} \omega_T (1 + \delta_s / \delta_j)^2 \prod_{k=j}^{N-1} (1 - 3/2\beta_k),$$

$$\delta_j = \begin{cases} \sqrt[3]{2\delta_j'}, & l_{sj} \leq 0, \\ \delta_j', & l_{sj} > 0. \end{cases} \quad (3)$$

Внутренняя энергия агломерата, находящегося на поверхности, изменяется под воздействием потока тепла из зоны пламени за счет внутреннего окисления металла и слияния с исходными частицами. После введения средней по диаметру температуры T_j уравнение баланса энергии примет вид

$$\frac{1}{6} \rho_{Al} \delta_j^3 c_{Al} \frac{d}{dt} \bar{T}_j = \frac{1}{2} \rho_{Al} \delta_j^2 c_{Al} (T_{Al}^s - \bar{T}_j) \frac{d}{dt} \delta_j +$$

$$+ \delta_j Nu \lambda_g (T_g - \bar{T}_j) + \delta_j^2 Q_{Al} \frac{d}{dt} \eta_j,$$

$$\frac{d}{dt} \eta_j = \frac{k_0 Y_1^n}{\eta_j} \exp\left(-\frac{E_{Al}}{RT_j}\right). \quad (4)$$

Здесь j — номер кармана определенного размера, который зависит от дисперсности и фракционного состава β_k ($k = 1, N$) частиц окислителя; δ_j — диаметр агломерата Al в j -м кармане; ω_T — линейная скорость горения СТРТ; l_{sj} — расстояние между соседними агломератами; t — время; N — число фракций ПХА. Для расчета размеров агломератов требуется задать температуру исходных частиц Al T_{Al}^s на поверхности и профиль температуры газа T_g , значения которых определяются из совместного решения систем уравнений (1), (2) на каждый момент времени.

Расчеты показали, что агломерация Al протекает в пределах толщины теплового пограничного слоя, в котором T_g изменяется от T_s до температуры пламени. В расчетах использовались данные [14] по кинетике высокотемпературного окисления конгломератов частиц Al.

На рис. 3 показаны зависимости диаметра агломератов $\delta_{ар}$ от содержания мелкой фракции ПХА α_2 и давления p в сравнении с экспериментами [15]. Расчетные значения $\delta_{ар}$, полученные при вариации различных параметров (диаметра D монофракции ПХА, содержания металла α_{Al} за счет связующего, начальной толщины окисной пленки исходных частиц η_s и т. д.), представлены на рис. 2, в. Линейный рост кривой $\delta_{ар}(D)$ согласуется с экспериментами [5] при $p = 20$ атм.

3. Существующие представления о горении гетерогенных твердых топлив в условиях напряженно-деформированного состояния основаны на предположении, что скорость горения увеличивается за счет объемного изменения начальной пористости [16]. Однако в результате приложенного напряжения, наряду с изменением пористости, активизируются химические связи полимерной матрицы и растет скорость ее деструкции.

В данной работе проанализирован один из возможных путей прогнозирования влияния напряжений на скорость волны горения гетерогенных твердых топлив на основе флуктуационной кинетической теории термостойкости и долговечности полимеров [17]. Экспериментальные исследования проводились с образцами модельных составов на основе бутадиенового каучука, изготовленных в виде балочек размерами $80 \times 40 \times 20$ мм с выбранной центральной частью. Упругие свойства смесового

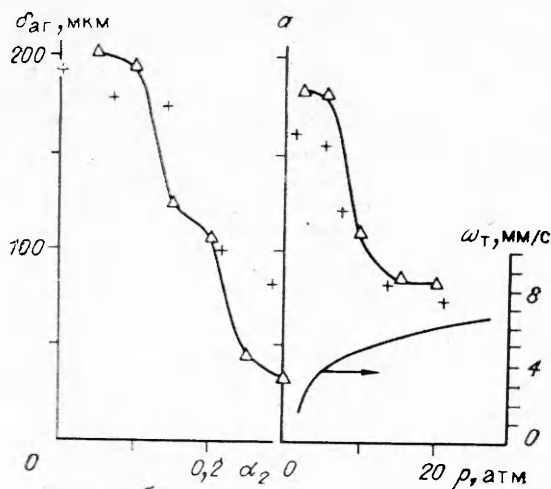
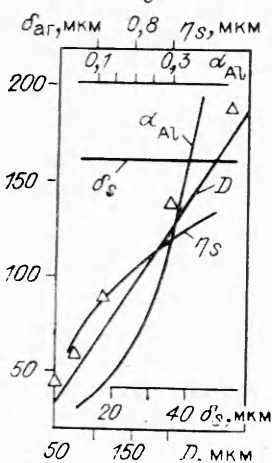


Рис. 3. Сравнение расчетных зависимостей $\delta_{ag}(\alpha_2)$, $\delta_{ag}(p)$ с экспериментом [15] (а) ($\omega_T(p)$ — задаваемая скорость горения, Δ — расчет, $+$ — эксперимент) и расчетные зависимости $\delta_{ag}(\alpha_{Al})$, $\delta_{ag}(D)$, $\delta_{ag}(\eta_s)$, $\delta_{ag}(\delta_s)$ (Δ — эксперимент [5]).



твердого топлива обеспечиваются наличием полимерного связующего, имеющего низкий по сравнению с другими компонентами модуль упругости. Распад механически напряженных макромолекул, так же как и термическое их разложение (термодеструкция), происходит по связям с наименьшей энергией диссоциации. Помимо деструктивных процессов разрыва наиболее слабых связей нагруженное состояние образца вызывает ориентированное напряжение в молекулярных цепях, в результате чего требуется меньше энергии на их разрушение. Образец в напряженном состоянии становится активизированным и тем самым более подготовленным к горению. Из работ [18, 19] следует, что скорость механотермической деструкции полимеров имеет вид

$$W = \Psi(\sigma) \exp\left(-\frac{U_a - \gamma\sigma}{RT}\right),$$

где σ — напряжение; U_a — энергии активации; γ — структурно-чувствительный коэффициент; T — температура.

Используя метод работы [20], легко получить зависимость скорости линейного пиролиза от напряжения

$$\omega_f^2 = \frac{\lambda_f}{(\rho c)_f} \frac{RT_s^2}{(U_a - \gamma\sigma)} \exp\left(-\frac{U_a - \gamma\sigma}{RT_s}\right) \frac{\Psi(\sigma)}{[T_s - T_0 - Q/2(\rho c)_f]},$$

где λ_f , $(\rho c)_f$ — коэффициент теплопроводности, произведение плотности на удельную теплоемкость полимера; T_s — температура поверхности; T_0 — начальная температура; Q — тепловой эффект реакции.

Из закона сохранения массы вещества на элементарных реагирующих поверхностях горения выполняются следующие соотношения [3]:

$$(\beta\rho\omega)_f = \alpha_f(\rho\omega)_T, \quad (\beta\rho\omega)_{ок} = \alpha_{ок}(\rho\omega)_T.$$

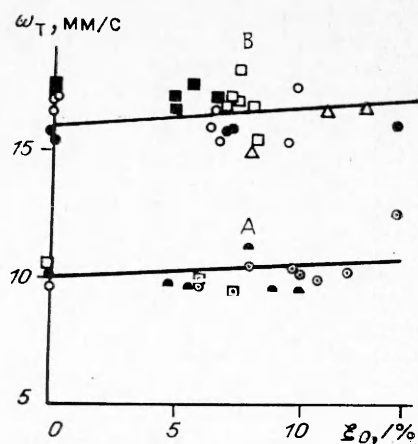
Тогда относительное изменение скорости горения под действием напряжения выражается через среднюю объемную деформацию θ_0 и объемную деформацию связи θ_f :

$$V = \frac{\omega_T'}{\omega_T} = (1 + \theta_f)^{1/2} \left(1 - \frac{\gamma\sigma}{U_a}\right)^{-1/2} \left[\frac{\Psi(\sigma)}{k_s}\right]^{1/2} \exp\left(\frac{\gamma\sigma}{2RT_s}\right).$$

Из решения задачи об одноосном растяжении упругого бруса средней объемная деформация θ_0 выражается через средний коэффициент Пуассона ν_0 и среднюю деформацию ξ_0 в виде $\theta_0 = (1 - 2\nu_0)\xi_0$. Поскольку деформации включений пренебрежимо малы, то $\xi_0 = \beta_f \xi_f$, $\theta_0 = \beta_f \theta_f$, откуда $\theta_f = (1 - 2\nu_0)/\beta_f \xi_0$, $\sigma = E_f \xi_0/\beta_f$ (E_f — модуль упругости). В результате получаем выражение для относительного изменения скорости горения от

Рис. 4. Зависимость скорости горения от экспериментально измеряемой деформации образца для двух типов модельных топлив А и В различных модификаций, отличающихся дисперсным составом ПХА ($p = 4$ МПа, $\beta_f = 0,35$).

Линии — расчет; точки — эксперимент.



экспериментально измеряемой деформации ξ_0

$$V = \left(1 + \xi_0 \frac{1 - 2\nu_0}{\beta_f} \right)^{1/2} \left(1 - \frac{\gamma E_f}{\beta_f U_a} \xi_0 \right)^{-1/2} \exp \left(\frac{\gamma}{2RT_s} \frac{E_f}{\beta_f} \xi_0 \right).$$

Сопоставление теоретических расчетов с результатами экспериментов приведено на рис. 4 для двух типов модельных топлив А и В с различным дисперсным составом окислителя. Значения кинетических параметров для бутадиен-стирольного каучука заимствованы из [49]: $U_a = 260$ кДж/моль, $\gamma = 42 \cdot 10^{-5}$ Дж/(моль · Па), $E_f = 2 \cdot 10^6$ Па, $\nu_0 = 0,498$, $T_s = 600$ К.

Следует отметить, что данная формула очень чувствительна к изменениям объемного содержания связующего β_f , точный расчет которого требует задания плотностей всех компонентов топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саммерфильд М., Сатерленд Г. С., Уэбб М. Дж. и др. Механизм горения топлив на перхлорате аммония // Исследование ракетных двигателей на твердом топливе.— М.: ИЛ, 1963.— С. 104—129.
2. Германс К. Е. Модель горения смешанного ракетного топлива, учитывающая гетерогенность на поверхности и генерацию тепла // РТК.— 1966.— № 9.— С. 160—171.
3. Becksted M. W., Derr R. L., Price C. F. A model of composite solid propellant combustion based on multiple flames // AIAA J.— 1970.— 8, N 12.— P. 2200—2207.
4. Струнин В. А., Фирсов А. Н., Шкадинский К. Г. и др. Закономерности гетерогенного горения слоевой системы // ФГВ.— 1989.— 25, № 5.— С. 25—32.
5. Гусаченко Л. К., Зарко В. Е., Зырянов В. Я. и др. Моделирование процессов горения твердых топлив.— Новосибирск: Наука, 1985.
6. Похил П. Ф., Логачев В. С., Мальцев В. М. Горение металлизированных конденсированных систем.— М.: ИХФ АН СССР, 1962.— 140 с.
7. Бабук В. А., Белов В. П., Ходосов В. В. и др. Исследование агломерации частиц алюминия при горении в составе смешанных конденсированных систем // ФГВ.— 1985.— 21, № 3.— С. 20—25.
8. Либрович В. Б., Ярин А. Л. О влиянии механических напряжений на скорость горения смешанных топлив // Там же.— 1982.— 18, № 5.— С. 58.
9. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред.— М.: Наука, 1978.— 336 с.
10. Гайрао К., Вильямс Ф. А. Модель процесса дефлаграции перхлората аммония при давлении $196-981$ н/см² // РТК.— 1971.— № 5.— С. 164—179.
11. Булгаков В. К., Липанов А. М., Камалетдинов А. Ш. Расчет скорости горения твердых топлив при обдуве // Химическая физика.— 1986.— 5, № 6.— С. 831—837.
12. Кумар М., Уилле Дж. Э., Кулкарни А. К. и др. Полная модель воспламенения смешанного ракетного топлива на основе перхлората аммония // Аэрокосм. техника.— 1985.— 3, № 1.— С. 36—47.
13. Ковалев О. Б., Петров А. П., Фомин В. М. Модель агломерации алюминия на поверхности горения смешанных твердых топлив с полидисперсным окислителем // Моделирование в механике.— 1990.— 4, № 4.— С. 19—45.
14. Полищук Д. И., Шевчук В. Г., Великанова В. Л. и др. Критические условия воспламенения конгломератов частиц алюминия // ФГВ.— 1978.— 14, № 2.— С. 53—56.
15. Sambamurthi J. K., Price E. W., Sigman R. K. Aluminum agglomeration in solid-propellant combustion // AIAA J.— 1984.— 22.— N 8.— P. 1132—1138.

16. Либрович В. Б., Ярин А. Л. О влиянии механических напряжений на скорость горения смесевых топлив // ФГВ.— 1982.— 18, № 5.— С. 58.
17. Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. К. Кинетическая природа прочности твердых тел.— М.: Наука, 1974.— 560 с.
18. Журков С. Н. К вопросу о физической основе прочности // ФТТ.— 1980.— 22, № 11.— С. 3344—3349.
19. Задорина Е. Н., Исаков Г. Н. Влияние напряженно-деформированного состояния на термостойкость и долговечность полимеров при конвективном теплообмене // Докл. АН СССР.— 1988.— 300, № 3.— С. 608.
20. Мержанов А. Г., Дубовицкий Ф. И. К теории стационарного горения пороха // Там же.— 1959.— 129, № 1.— С. 153—156.

г. Новосибирск

УДК 536.46

А. Г. Князева, В. Е. Зарко

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЗАЖИГАНИИ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ТОПЛИВ ИНТЕНСИВНЫМИ ТЕПЛОВЫМИ ПОТОКАМИ

Сформулирована модель зажигания квазигомогенного топлива с двумя идеальными перемешанными компонентами, которые независимо разлагаются в конденсированной фазе и реагируют между собой в газовой фазе. Модель описывает распространение тепла в конденсированном веществе и газе и диффузию компонентов в газе. Численно исследованы в простейшем варианте для монотоплива процессы перехода от зажигания к самоподдерживающемуся горению при импульсном действии теплового потока. Показано, что критическое значение теплового потока для устойчивого зажигания монотоплива и форма полуострова устойчивого зажигания в координатах время нагрева — поток тепла зависят от вида используемого критерия погасания.

Математическое моделирование переходных процессов при зажигании твердых топлив не теряет своей актуальности, о чем свидетельствует ряд недавно опубликованных работ [1—3]. Наибольший интерес представляет зажигание интенсивными тепловыми потоками, когда реализуются высокие температурные градиенты в конденсированной фазе (к-фазе) и момент иницирования интенсивных экзотермических реакций в топливе совпадает либо даже запаздывает относительно момента начала движения реагирующей поверхности. Объективное описание таких явлений требует создания достаточно сложных математических моделей.

Цель настоящей работы — построить модель зажигания двухкомпонентного твердого топлива, учитывающую химические превращения в конденсированной и газовой фазах и описывающую переходные процессы при нестационарном теплоподводе. Для выявления качественной картины явления проводились численные расчеты при вариации параметров задачи. Особое внимание уделено зажиганию интенсивными потоками тепла.

Рассмотрим процесс нагрева с поверхности и химического превращения квазигомогенного твердого топлива, состоящего из двух тщательно перемешанных мелкодисперсных компонентов, что позволяет использовать осредненные по объему теплофизические характеристики к-фазы. Каждый компонент твердого топлива независимо от другого разлагается в к-фазе по реакции первого порядка до образования газообразного продукта. Попадая в газовую фазу, продукты твердофазных реакций мгновенно перемешиваются и реагируют между собой до образования конечного продукта по реакции второго порядка.

Тепловая часть задачи описывается уравнениями теплопроводности и химической кинетики, записанными в системе координат, движущейся