

рости горения по частицам соответствует увеличению скорости горения по сравнению со скоростью нормального горения примерно в 100 раз для углеводородно-воздушных смесей и в 25 раз — для водородно-воздушной смеси.

*Поступила в редакцию
29/V 1978*

ЛИТЕРАТУРА

1. R. A. Strehlow. 14-h Symposium (International) on Combustion, 1973, p. 1189.
2. Б. Льюис, Г. Эльбе. Горение, пламя и взрывы в газах. М., «Мир», 1968.
3. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1942, 12, 389.
4. G. I. Taylor. Proc. Roy. Soc., 1946, 186A, 1004, 273.
5. A. L. Kuhl, M. M. Kamel, A. K. Oppenheim. 14-th Symposium (International) on Combustion, 1973, p. 1201.
6. Г. И. Бам-Зеликович.— В сб.: Теоретическая гидродинамика. № 4. Оборонгиз, 1949.
7. К. И. Щелкин, Я. К. Трошин. Газодинамика горения. М., Изд-во АН СССР, 1968.
8. Я. К. Трошин. Изв. АН СССР. Отделение технических наук, 1956, 1.
9. Л. Н. Седов. Методы подобия и размерности в механике. М., Гостехиздат, 1957.
10. Г. Ламб. Гидродинамика. М.—Л., Гостехиздат, 1947.

ГОРЕНИЕ ГЕТЕРОГЕННОЙ СИСТЕМЫ С КОМПОНЕНТАМИ, СПОСОБНЫМИ ИСПАРЯТЬСЯ И РЕАГИРОВАТЬ В КОНДЕНСИРОВАННОЙ И ГАЗОВОЙ ФАЗАХ

В. И. Аникеев, О. П. Коробейников, А. С. Шмелев

(Новосибирск)

В известной модели Беляева—Зельдовича [1,2] рассматриваются гомогенные летучие конденсированные вещества, скорость горения которых определяется процессами, протекающими в газовой фазе. Другие модели горения гомогенных конденсированных систем рассмотрены и классифицированы в работе [3]. Горение гетерогенных конденсированных смесей горючего и окислителя — процесс сложный, он трудно поддается теоретическому анализу. Описание стационарного и одномерного процесса горения гетерогенной смеси системы должно базироваться на статистическом рассмотрении процессов в областях, соизмеримых с размерами неоднородностей системы, в которых горение неоднородно и нестационарно. Попытки учета неоднородности и нестационарности приводят к пока непреодолимым трудностям. В связи с этим у исследователей возник интерес к более простым моделям гетерогенных смесевых систем. Примером такой модели может служить система, составленная из чередующихся слоев окислителя и горючего («сэндвич») [4—19]. Геометрическая определенность расположения компонентов делает эту систему удобной для теоретического анализа и для экспериментальных исследований процесса горения, являющегося в этой системе стационарным. Исследование горения слоевой системы позволяет проанализировать и обобщить влияние таких важных для горения смесевых систем факторов, как дисперсность и соотношение компонентов, давление, наличие катализаторов и др.

Эксперименты проводились главным образом на системах перхлорат аммония (ПХА) — связка в условиях, когда ПХА способен к самостоятельному горению (при $p \geq 40$ атм) и когда толщина слоев больше ширины зоны горения. Изучены форма и структура горячей поверхности, а также влияние различных факторов (размер слоев, вид горючего, тип и место введения катализатора, давление) на скорость горения слоевой системы, а также на форму и структуру поверхности горения. Теоретические работы посвящены исследованию формы выемки, определению скорости горения. В [8] показано, что для случая горения системы с бесконечно толстыми слоями, составленными из легкогазифицирующихся компонентов, форма выемки параболическая (кроме участка вблизи поверхности контакта слоев).

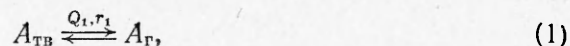
В работах [7, 9, 10] в предположении, что скорость процесса определяется диффузионным перемешиванием продуктов газификации окислителя и горючего, вычислена скорость горения слоевой системы и показано, что она зависит от толщины слоев. В упомянутых выше работах не учитывалось взаимодействие между компонентами в конденсированной фазе. Существование такого взаимодействия убедительно показано в [19—21]. Имеются экспериментальные факты, указывающие на увеличение взаимодействия между окислителем и горючим при горении слоевых [18] и смесевых [22] систем на основе ПХА при введении катализатора. Такое взаимодействие, очевидно, особенно существенно в случае тонких слоев. Рассмотрение этого случая, в частности, могло бы дать ответ на вопрос о характере зависимости скорости горения смесевых составов от дисперсности компонентов при уменьшении размера частиц смеси.

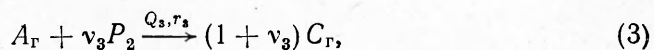
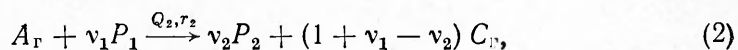
Учет взаимодействия между компонентами в к-фазе в математической модели горения смесевых твердого топлива впервые проведен в [23]. Позднее [24, 25] это положение подвергалось критике и при построении моделей горения смесевых твердого топлива не принималось во внимание. В [26—29] учитывается взаимодействие между компонентами в к-фазе при построении модели горения смесевых твердых топлив. Так, в работе [28], посвященной теоретическому исследованию горения разлагающихся и испаряющихся гомогенных конденсированных веществ, рассмотрен режим горения с испарением, при котором оба процесса, реакция в конденсированной фазе и газофазная реакция, влияют на скорость горения. Совокупность полученных в последние годы экспериментальных данных о стадиях реакций разложения ПХА и смесевых систем на его основе позволяет предположить детальную модель взаимодействия между окислителем и горючим в к-фазе [18] и использовать ее при построении модели горения систем на основе ПХА.

В настоящей работе с целью моделирования горения квазигомогенной смесевой системы на основе ПХА (с размером неоднородностей, меньших ширины зоны горения) рассматривается горение слоевой системы с тонкими слоями компонентов (толщина слоев много меньше ширины зоны горения) с учетом летучести окислителя, взаимодействия между компонентами в конденсированной фазе и реакций в газовой фазе.

Описание модели. Постановка задачи. Допущения

На рис. 1 дан разрез исследуемой слоевой системы, состоящей из слоев летучего окислителя (ПХА) и нелетучего горючего с общей толщиной $2R$. Ось l проходит по линии симметрии. Окислитель $A_{тв}$ и горючее P_1 могут вступать в следующие химические реакции:





Здесь Q_i, r_i — теплоты и скорости соответствующих реакций; ν_i — стехиометрические коэффициенты. Твердый окислитель $A_{\text{ТВ}}$ возгоняется у поверхности контакта с горючим с образованием газа A_{Γ} . В случае ПХА таким процессом является диссоциативная сублимация ПХА на NH_3 и HClO_4 . Этот процесс в общем случае должен быть равновесным, т. е. вблизи поверхности контакта окислителя с горючим давление паров A_{Γ} близко к равновесному, хотя в некотором частном случае — при большой скорости отвода паров окислителя от его твердой поверхности — скорость сублимации будет зависеть от скорости отвода паров окислителя. Давление на поверхности контакта будет меньше равновесного.

Будем считать, что горючее P_1 в реакционном слое плавится и смачивает поверхность окислителя. Пары окислителя A_{Γ} в поверхностном слое пленки горючего диффундируют через пленку горючего и вступают с ним в двухстадийную химическую реакцию (2), (3), протекающую с образованием промежуточного конденсированного продукта P_2 и конечных газообразных продуктов горения C_{Γ} [19]. Непрореагировавший с горючим в к-фазе газообразный окислитель попадает в газовую фазу (в щель или «пору» между двумя слоями горючего) и в дальнейшем реагирует в газовой фазе по реакции (4). Реакции (2)—(4) принимаются реакциями первого порядка по HClO_4 . Будем считать, что при достаточно низкой температуре ($l < 0$) слева от «носика» реакции отсутствуют, т. е. скорость химических реакций пренебрежимо мала. Будем рассматривать тонкие слои $A_{\text{ТВ}}$ и P_1 , для которых R много меньше ширины зоны реакционного слоя в газовой фазе. Например, при горении смесевых составов на основе ПХА при давлениях, меньших атмосферного, ширина зоны реакций в к-фазе может составлять ~ 100 мкм. Для выполнения указанного выше условия размер частиц должен быть меньше 10 мкм. В случае достаточно тонких слоев перепад температур в направлении, перпендикулярном l , мал по сравнению с перепадом температуры вдоль l . Это позволяет температуру (окислителя, горючего и газа) в любом сечении слоя считать постоянной.

Пренебрегаем градиентом концентрации газообразного окислителя в горючем вдоль слоя по сравнению с градиентом, перпендикулярным слою, и будем учитывать лишь диффузию газообразного окислителя перпендикулярно слою. В газовом зазоре пренебрегаем градиентом концентрации окислителя перпендикулярно слою (последние два допущения не противоречат друг другу, поскольку коэффициент диффузии паров окислителя в газе D значительно больше коэффициента диффузии тех же паров в слое жидкого горючего D^*).

Принятые допущения позволяют свести задачу к одномерной, а в дальнейшем после ее решения проверить справедливость этих допущений. Удобно считать, что теплофизические параметры горючего и окислителя (c, ρ, λ) одинаковы, а D и D^* постоянны. Скорость термодеструкции горючего мала по сравнению со скоростью его окислительной деструкции [18], поэтому термодеструкцию не учитываем. Пренебрегаем также разложением окислителя (ПХА), поскольку скорость этого процесса значительно ниже скорости разложения ПХА за счет его взаимодействия с горючим [18].

Предложенная схема реакций (1)—(4) может быть видоизменена таким образом, что будет учтено образование газообразного горючего

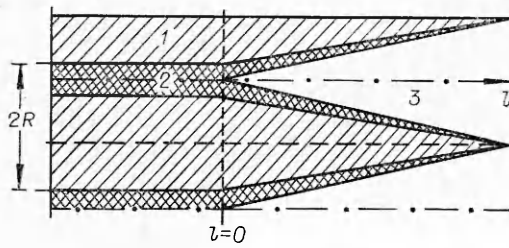


Рис. 1. Разрез исследуемой слоевой системы.

Конденсированная фаза: 1 — окислитель, 2 — горючее, 3 — газовая фаза — зазор, образовавшийся в результате выгорания окислителя и горючего.

по реакциям (2), (3) и его расходование в реакции с окислителем. При усложнении модели можно учесть реакции разложения окислителя и деструкции полимерного связующего. Выходящий через пленку горючего газ будет перемешан, поэтому нет необходимости учитывать диффузионное перемешивание газообразных горючего и окислителя. Таким образом, рассматриваемая модель имеет следующие границы применимости: она описывает горение гетерогенных топлив с мелкодисперсными компонентами при достаточно низких давлениях.

Математическое описание модели

Введем следующие обозначения: r_i , Q_i — скорости и тепловые эффекты реакций; k_i , E_i — константы скоростей и энергии активации реакций; $k_i(0)$ — константы скоростей при температуре «носика»; v_i — стехиометрические коэффициенты; ρ_g , ρ_r — плотности газовой и конденсированной фаз; λ_g , λ_r — коэффициенты теплопроводности; $c = c_r$ — удельная теплоемкость; D , D^* — коэффициенты диффузии газообразного окислителя в газовой фазе и в жидком горючем; R — толщина слоя окислителя и горючего; α_1 , α_2 , α_3 — доли окислителя, горючего и газа в слое; α_1^0 , α_2^0 — начальные доли окислителя и горючего; β_1 , β_2 — степени превращения окислителя и горючего; ε — коэффициент, характеризующий степень растворения газообразного окислителя в жидком слое горючего; n_r — концентрация A_r (HClO_4) в газовой фазе; n_p — равновесная концентрация A_r (HClO_4) над поверхностью $A_{\text{тв}}$; \bar{n} — средняя концентрация A_r в пленке горючего; T_n , T_r — температура «холодного» и «горячего» конца; u — скорость распространения фронта химических реакций; T_0 — выбранная температура «носика», $a = \lambda_r / \rho_r c_r$.

Кинетика реакций в конденсированной фазе. Выделим некоторый элемент рассматриваемой системы (рис. 2) справа от «носика» ($l > 0$). В соответствии с принятыми выше допущениями на границе раздела окислитель — горючее (при $x = 0$) давление паров окислителя равно равновесному. Пары окислителя растворяются в поверхностном слое горючего, так что их поверхностная концентрация равна εn_p . Процесс дальнейшей диффузии паров в полимерной пленке горючего с одновременно протекающей двухстадийной реакцией описывается уравнением (в предположении первого порядка реакции по растворенному окислителю).

$$d^2n/d\xi^2 - \lambda^2 n = 0, \quad (5)$$

$$\text{где } \xi = x/R\alpha_2; \lambda^2 = \frac{k_2 P_1 + k_3(1 - P_1) R^2 \alpha_r^2}{D^*}$$

Граничные условия:

$$\xi = 0, n = \varepsilon n_p; \xi = 1, n = \varepsilon n_r. \quad (6)$$

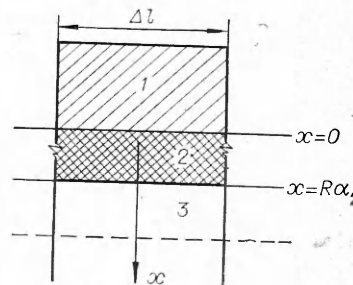


Рис. 2. Элемент одного слоя справа от «носика»; ось x направлена перпендикулярно границе раздела 1 и 2 ($x = 0$).

Решение уравнения (5) запишется в виде

$$n = C_1 \exp^{-\lambda \xi} + C_2 \exp^{\lambda \xi}.$$

Константы C_1 и C_2 легко определить, подставив граничные условия (6).
Средняя концентрация по слою горючего находится из уравнения

$$\bar{n} = \int_0^1 n d\xi = \frac{\varepsilon (n_p + n_r)}{\lambda} \cdot \frac{1 - (1 - \operatorname{th}^2 \lambda)^{0.5}}{\operatorname{th} \lambda} \quad (7)$$

при $\lambda \rightarrow 0$ $\bar{n} \approx \varepsilon (n_p + n_r)/2$.

В этом случае скорость возгонки окислителя на границе раздела фаз

$$r_1 = - \frac{D^*}{R^2 \alpha_1 \alpha_2} \frac{dn}{d\xi} \Big|_{\xi=0} = \frac{D^*}{R^2 \alpha_1 \alpha_2} \varepsilon \left(n_p \frac{\lambda}{\operatorname{th} \lambda} - n_r \frac{\lambda}{\operatorname{sh} \lambda} \right). \quad (8)$$

Скорости реагирования горючего с газообразным окислителем по первой и второй стадиям находятся из выражений

$$\begin{aligned} r_2 &= k_2 P_1 \bar{n}, \\ r_3 &= k_3 (1 - P_1) \bar{n}. \end{aligned} \quad (9)$$

где $k_i = k_i(0) \exp(-E_i/RT)$.

Запишем уравнения: теплового баланса системы

$$\begin{aligned} -u \frac{dT}{dl} + a \frac{d}{dl} \left\{ \frac{dT}{dl} \left[1 - \left(1 - \frac{\lambda_r}{\lambda_p} \right) \alpha_3 \right] \right\} + r_1 \frac{Q_1}{c} \alpha_1 + r_2 \frac{Q_2}{c} \alpha_2 + \\ + r_3 \frac{Q_3}{c} \alpha_2 + r_4 \frac{Q_4}{c} \frac{\rho_r}{\rho_T} \alpha_3 = 0, \end{aligned} \quad (10)$$

материального баланса для A_r

$$-u \frac{d}{dl} (\alpha_3 n_r) + D \frac{\rho_r}{\rho_T} \frac{d}{dl} \left(\alpha_3 \frac{dn}{dl} \right) + \alpha_1 r_1 - \alpha_2 (r_2 + r_3) - \frac{\rho_r}{\rho_T} \alpha_3 r_4 = 0, \quad (11)$$

материального баланса для окислителя и горючего в твердой фазе

$$-u \cdot d\alpha_1/dl = \alpha_1 r_1, \quad (12)$$

$$-u \cdot d\alpha_2/dl = [(v_1 - v_2)r_2 + v_3 r_3] \alpha_2, \quad (13)$$

материального баланса исходного и промежуточного продуктов горения

$$-u \cdot d(\alpha_2 P_1)/dl = \alpha_2 v_1 r_2, \quad (14)$$

$$P_1 + P_2 = 1. \quad (15)$$

В дальнейшем будем пользоваться комплексом $z = (1 - \beta_2) P_1$. Выражение для скорости реакции в газовой фазе:

$$r_4 = k_4 n_r. \quad (16)$$

Имеют место также очевидные соотношения:

$$\alpha + \alpha_2 + \alpha_3 = 1, \quad (17)$$

$$\alpha_1 = \alpha_1^0 (1 - \beta_1), \quad (18)$$

$$\alpha_2 = \alpha_2^0 (1 - \beta_2), \quad (19)$$

Система уравнений (9) — (19) с учетом полного сгорания окислителя и горючего имеет граничные условия:

на «холодном» конце при $l = -\infty$

$$T = T_n, \quad dT/dl = 0, \quad dn/dl = 0, \quad \alpha_1 = \alpha_1^0, \quad \alpha_2 = \alpha_2^0, \quad P_1 = 1, \quad n = 0.$$

на «горячем» конце при $l = \infty$

$$T = T_k, \quad dT/dl = 0, \quad dn/dl = 0, \quad \alpha_1 = \alpha_2 = 0, \quad P_1 = 0, \quad n = 0.$$

Порядок дифференциального уравнения (11) может быть понижен. При умножении (11) на Q_4/c , сложении уравнений (10) и (11) с подстановкой выражений для r_1, r_2, r_3 из уравнений (12) — (17) получаем

$$\begin{aligned} dn/dl = & \frac{T - T_n - \frac{a}{u} \frac{dT}{dl} + \frac{Q_1 + Q_4}{c} \alpha_1 + \frac{Q_3 + Q_4}{v_3} \alpha_2 + \left(\frac{Q_2}{cv_1} - \frac{v_1 - v_2}{v_1 v_3} \frac{Q_3}{c} \right) \alpha_2^0 z}{\frac{D}{u} \cdot \frac{\rho_r}{\rho_T} \alpha_3 \frac{Q_4}{c}} + \\ & + \frac{n \frac{Q_4}{c} + \frac{v_1 - v_2 - v_3}{v_1 v_3 c} Q_4 \alpha_2^0 z + \frac{a}{u} \left(1 - \frac{\lambda_r}{\lambda_n} \right) \frac{dT}{dl}}{\frac{D}{u} \cdot \frac{\rho_r}{\rho_T} \alpha_3 \frac{Q_4}{c}}. \end{aligned} \quad (20)$$

Путем интегрирования от $-\infty$ до $+\infty$ уравнения, полученного в результате сложения (10) и (11), можно найти выражение для конечной температуры горения T_k (при условии полного сгорания окислителя и горючего):

$$T_k = T_n + (Q_1 + Q_4) \frac{\alpha_1^0}{c} + \left(\frac{Q_2}{v_1} + \frac{v_2}{v_1 v_3} Q_3 - \frac{v_2 + v_3}{v_1 v_3} Q_4 \right) \frac{\alpha_2^0}{c}. \quad (21)$$

После введения переменных $l = \xi a/u$, $b = RT_0/E_0$, $T = T_0(1 + b\theta)$ уравнения (10) — (12) сводятся к безразмерному виду.

Порядок (10) в безразмерном виде может быть понижен до первого путем введения переменных $S = d\theta/d\xi$, $S/S_0 = y$, где $S_0 = \left. \frac{d\theta}{d\xi} \right|_{\xi=0} = -\theta_{-\infty}$. Это очевидно из решения уравнения $-u \cdot dT/dl + a \cdot d^2T/dl^2 = 0$ для области слева от «носика», т. е. $l < 0$ (см. рис. 1).

Таким образом, система уравнений теплового и материального баланса и граничные условия принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dy}{d\theta} = & \frac{\left[\frac{1}{\alpha_1^0} + (1 - B) y S_0 \left(\frac{d\beta_1}{d\theta} + L_0 \frac{d\beta_2}{d\theta} \right) \right] \cdot \frac{1}{S_0} - \left[\frac{r_1}{k_4(0)} \Delta Q_1 + \right.}{\frac{1}{\alpha_1^0} - (1 - B)(\beta_1 + L_0 \beta_2)} \\ & \left. + \left(\frac{r_2}{k_4(0)} \Delta Q_2 + \frac{r_3}{k_4(0)} \Delta Q_3 \right) L_0 \right] \frac{F_1}{y S_0^2} + \frac{\frac{r_4}{k_4(0)} (\beta_1 + L_0 \beta_2) \frac{\rho_r}{\rho_T} \Delta Q_4 \cdot \frac{F_1}{y S_0^2}}{\frac{1}{\alpha_1^0} - (1 - B)(\beta_1 + L_0 \beta_2)}, \\ \frac{dn}{d\theta} = & \frac{(\theta - \theta_n - y S_0) \frac{1}{\alpha_1^0} + (\Delta Q_1 + \Delta Q_4)(1 - \beta_1) + \frac{L_0}{v_3} (\Delta Q_3 - \Delta Q_4)(1 - \beta_2)}{L_u (\beta_1 + L_0 \beta_2) y S_0 \Delta Q_4} + \\ & + \frac{\left(\frac{\Delta Q_2}{v_1} - \frac{v_1 - v_2}{v_1 v_3} \Delta Q_3 + \frac{v_1 - v_2 - v_3}{v_1 v_3} \Delta Q_4 \right) z L_0}{L_u (\beta_1 + L_0 \beta_2) y S_0 \Delta Q_4} + \frac{n_r \Delta Q_4 + (1 - B) y S_0}{L_u y S_0 \Delta Q_4}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
d\beta_1/d\theta &= r_1 F_1 / k_4(0) y S_0, \\
d\beta_2/d\theta &= [(v_1 - v_2) \cdot r_2 / k_4(0) + v_3 r_3 / k_4(0)] \cdot F_1 / y S_0, \\
dz/d\theta &= -r_2 \cdot v_1 \cdot F_1 / y S_0 \cdot k_4(0), \quad d\xi/d\theta = 1 / y S_0, \\
\theta_R &= \theta_{-\infty} + (\Delta Q_1 + \Delta Q_4) \alpha_1^0 + \left(\frac{1}{v_1} \Delta Q_2 + \frac{v_2}{v_1 v_3} \Delta Q_3 - \frac{v_2 + v_3}{v_1 v_3} \Delta Q_4 \right) \alpha_2^0, \\
\frac{r_1}{k_4(0)} &= \frac{\varepsilon \left(n_p \frac{\lambda}{\operatorname{th} \lambda} - n_r \frac{\lambda}{\operatorname{sh} \lambda} \right)}{F_2^2 (1 - \beta_2)} \cdot L_0, \quad r_4 / k_4(0) = k_4 n_r / k_4(0), \\
r_2 / k_4(0) &= k_2 z \cdot \bar{n} / k_4(0), \quad r_3 / k_4(0) = k_3 \bar{n} [(1 - \beta_2) - z] / k_4(0), \\
\lambda &= \{k_2 / k_4(0) \cdot z + k_3 / k_4(0) \cdot [(1 - \beta_2) - z]\}^{0.5} \cdot F_2 (1 - \beta_2)^{0.5},
\end{aligned}$$

где $F_1 = ak_4(0)/u^2$; $F_2 = \frac{R\alpha_2^0 [k_4(0)]^{0.5}}{D^{*0.5}}$; $k_i = k_i(0) \cdot \exp[E_i/E_0 \cdot \theta / (1 + b\theta)]$;

$$L_0 = \frac{\alpha_2^0}{\alpha_1^0}; L_u = D\rho_r / a\rho_r; \Delta Q_i = Q_i / cbT_0; B = \lambda_r / \lambda_r.$$

Граничные условия:

в «носике» при $\theta = \theta_0$

$$\beta_1 = 0, \quad \beta_2 = 0, \quad \xi = 0, \quad y = 1, \quad z = 1;$$

на «горячем» конце при $\theta = \theta$

$$y = 0, \quad n_r = 0.$$

Метод решения.

Результаты численного счета и их обсуждение

Система уравнений характерна тем, что в ней пять граничных условий заданы на одном и два на другом конце интегрирования. Задача решалась методом «стрельбы». При варьировании параметра F_1 , в который входит скорость горения, и заданном n_r в «носике» требовалось удовлетворить два граничных условия на «горячем» конце, т. е. $y=0$, $n_r=0$ при $\theta=\theta_r$.

Для решения системы уравнений использована процедура Кутты — Мерсона с автоматическим выбором шага. В результате решения системы уравнений получены профили степеней превращения окислителя и горючего, профили температуры и концентрации n_r в ж-фазе и в газовой фазе (рис. 3). Поверхность горения выбиралась в точке, где степень превращения окислителя достигала значения 0,05.

Решение уравнений этой модели позволяет определить тепловыделение по каждой стадии реакции (рис. 4). Показано, что изменение температуры «носика» в области достаточно низких температур, где скорость химических реакций мала ($T < 600$ К), практически не влияет на скорость горения. Кроме того, отношение $2R/l^* < 0,05$ (l^* — ширина зоны реакции, $2R$ — толщина слоя горючего и окислителя, $R \approx 10$ мкм), что доказывает справедливость допущения об одномерности модели.

Ниже представлены численные значения параметров, с использованием которых были выполнены приведенные на рис. 3.4 расчеты: $k_1(0) = 3,0 \cdot 10^{11}$ 1/с, $k_2(0) = 6,0 \cdot 10^{13}$ 1/с, $k_3(0) = 6,04 \cdot 10^{13}$ 1/с, $k_4(0) = 5,37 \cdot 10^{13,7}$ 1/с, $E_1 = 127 \cdot 10^3$ Дж/моль, $E_2 = 75,4 \cdot 10^3$ Дж/моль, $E_3 = 75,4 \cdot 10^3$ Дж/моль, $E_4 = 188,4 \cdot 10^3$ Дж/моль, $Q_1 = -1726$ Дж/кг, $Q_2 = 3980,5$ Дж/кг, $Q_3 = 2212,3$ Дж/кг, $Q_4 = 3096,0$ Дж/кг, $v_1 = 1,0$, $v_2 = 0,3$,

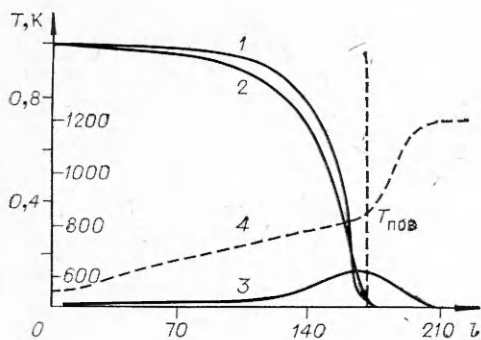


Рис. 3. Кривые распределения в волне горения окислителя $1-\beta_1$ (1) и горючего $1-\beta_2$ (2) в к-фазе, а также концентрации окислителя n_r в газовой фазе (3) и температуры (4).

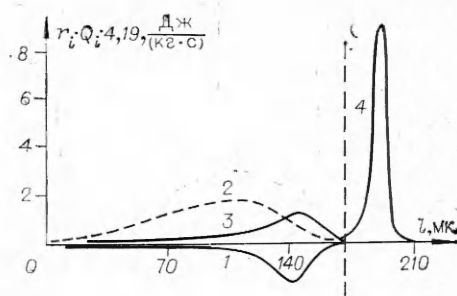


Рис. 4. Кривые распределения скоростей тепловыделения $r_i Q_i$ в волне горения. Номер кривой соответствует номеру реакции.

$v_3=0,5$, $D=0,25 \cdot 10^{-4}$ м²/с, $D^*=0,25 \cdot 10^{-5}$ м²/с, $c=12,57 \cdot 10^2$ Дж/(кг·град), $\rho_r=1,0$ кг/м³, $\rho_r=10^3$ кг/м³, $\lambda_r=7,29 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м·град), $\lambda_r=7,29 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·град), $\alpha_1^0=0,8$, $\alpha_2^0=0,2$, $T_0=550$ К, $T_n=300$ К, $R=2 \cdot 10^{-5}$ мкм, $b=0,032$.

Эти значения частично взяты из литературы, частично из данных по кинетике разложения системы ПХА—ПММА в условиях высокоскоростного нагрева [30] и по кинетике взаимодействия хлорной кислоты с полимерами [19]. Некоторые из этих параметров — коэффициенты диффузии и растворимости хлорной кислоты в жидком полимере, константы скоростей и теплоты реакций хлорной кислоты с полимером — взяты из результатов исследований кинетики и механизма окислительной деструкции полимеров в кислороде, двуокиси азота и др. и поэтому носят приближенный характер. Для получения более достоверных их значений необходимы специальные физико-химические исследования.

Варьирование констант скоростей реакций в конденсированной и газовой фазах относительно значений, приведенных выше, показало, что скорость горения чувствительна к ним. Таким образом, предложенная в настоящей работе модель горения вместе с выбранными константами описывает процесс горения конденсированных систем, определяемый одновременно газофазными и гетерогенными реакциями. Результаты расчета структуры волны горения были сопоставлены с профилями концентраций и температур, полученными в [31] при исследовании горения системы ПХА—ПММА с мелкодисперсными компонентами при субатмосферных давлениях. Сопоставление указанных данных по структуре волны горения показывает, что качественно они удовлетворительно согласуются как в вопросе положения максимума концентрации газообразного окислителя (хлорной кислоты), так и в двухстадийном характере разложения компонентов в к-фазе (разделенность в пространстве максимумов скоростей отдельных реакций в к-фазе).

Этот вывод может служить подтверждением справедливости принятой модели горения гетерогенной системы с мелкодисперсными компонентами, способными испаряться, а также реагировать в к-фазе (в области низких давлений). Некоторые количественные расхождения между экспериментальными и расчетными данными (например, в температуре поверхности горения, скорости горения, ширине зоны горения) связаны скорее всего с приближенностью имеющихся сведений о кинетике реакций в конденсированной и газовой фазах. Задача дальнейших исследований — уточнение численных значений констант, входящих в математическое описание, и расчет зависимостей скоростей горения и структу-

ры волны горения от различных безразмерных параметров, в которые входят давление, размер частиц и другие определяющие скорость горения величины, а также сопоставление данных расчета с экспериментом.

*Поступила в редакцию
29/XII 1977*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Беляев. ЖФХ, 1938, 12, 94.
2. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1942, 12, 498.
3. А. Г. Мержанов. Стационарное горение гомогенных конденсированных систем. Препринт ИХФ АН СССР, 1967.
4. Ракетные топлива. М., «Мир», 1975.
5. Н. Н. Бахман, Д. П. Поликарпов. Изв. АН СССР. ОТН. Энергетика и автоматика, 1961, 4, 37.
6. Н. Н. Бахман. Докл. АН СССР, 1959, 129, 5, 1079.
7. W. Nachbar. Solid Propellant Rocket Research (ed M. Summerfield). N. Y., Academic Press, 1960.
8. В. Б. Либрович. ПМТФ, 1962, 4, 33.
9. Б. В. Новожилов. ЖФХ, 1962, 36, 11, 2508.
10. W. Nachbar, A. B. Cline. 5-th AGARD Colloquium, Macmillan Co, 1963.
11. С. С. Новиков, П. Ф. Похил и др. Докл. АН СССР, 1967, 174, 1129.
12. Б. С. Ермолаев, А. И. Коротков, Ю. В. Фролов. ФГВ, 1969, 5, 2, 286; 1970, 6, 3, 277.
13. N. N. Vakhman, V. B. Librovich. Comb. and Flame, 1970, 15, 143.
14. W. S. Strahle. AIAA Paper, № 74-123.
15. T. L. Boggs. Combustion Science and Technol, 1972, 4, 279.
16. A. M. Varney, W. S. Strahle. Comb. Sci and Techn., 1972, 4, 5, 1971.
17. Б. И. Хайкин. Четвертый Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. Аннотации докладов. Черногловка, 1974.
18. H. E. Jones, W. S. Strahle. 14-th Symposium (Int.) on Combustion. The Combustion Institute, 1973, p. 1287.
19. О. П. Коробейничев, Г. И. Анисифоров, А. Г. Терешенко. РТК, 1975, 5, 112.
20. G. D. Sammons. AIAA Paper, № 69-504.
21. R. H. Waesche, J. Wenograd. AIAA Paper, № 68-145.
22. О. П. Коробейничев, А. М. Викторенко и др. ФГВ, 1974, 10, 3, 345.
23. С. Херманс. РТК, 1966, 4, 9, 160.
24. М. Бекстед, Р. Дерр, К. Прайс. РТК, 1970, 8, 12, 107.
25. M. L. Summerfield et al. AIAA Paper, № 68-658.
26. R. N. Kumar. Comb. Sci. and Technol., 1973, 8, 133.
27. Г. Б. Манелис, В. А. Струнин. Механизм и элементарная теория горения смесевых топлив. Препринт. Черногловка, 1975.
28. В. А. Струнин, А. Н. Фирсов и др. ФГВ, 1977, 13, 1, 3.
30. О. П. Коробейничев, К. К. Коваленко, А. И. Лесникович. ФГВ, 1977, 13, 4, 550.
31. О. П. Коробейничев, А. А. Зенин и др. ФГВ, 1977, 13, 3, 355.

О КОНВЕКТИВНОМ ГОРЕНИИ ДИСПЕРГИРУЮЩИХ СИСТЕМ

В. Г. Коростелев, Ю. В. Фролов

(Москва)

Конвективное горение пористых газопроницаемых систем интересно тем, что позволяет получить скорости сгорания, значительно превращающие скорости нормального горения. Однако такой режим в обычных условиях, как правило, не устойчивый и очень быстро переходит в детонацию [1, 2]. Поэтому в последнее время активно обсуждаются методы стабилизации и регулирования конвективного горения.