

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

РАСЧЕТ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА
ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ ПОРОХА
В НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

Ю. А. Гостинцев, С. С. Новиков, Л. Н. Стесик, Л. А. Суханов

В пределах феноменологической модели нестационарного горения пороха, предполагающей квазистационарность процессов в химически активных зонах, время t_2 установления химического равновесия в продуктах газозофазного пламени много меньше характерного времени t_1 изменения внешних параметров, например, давления.

В стационарных условиях состояние пламени определяется давлением p и начальной температурой пороха T_0 . Зная теплотворную способность конкретного топлива, можно из термодинамического расчета найти зависимость температуры пламени T_F и химически равновесного состава продуктов от p и T_0 .

В нестационарных процессах с $t_1 \gg t_2$ продукты по-прежнему химически равновесны, но уже не при данных p и T_0 (как в стационарном горении), а при текущих значениях p и φ_s ($\varphi_s = (\partial T / \partial x)_0$ — градиент температуры у поверхности со стороны конденсированной фазы). Пламя неадиабатично по отношению в к-фазе топлива (имеет место зависящий от времени обмен энергией между газовой и конденсированной фазами), поэтому его температура и химический состав продуктов зависят не только от мгновенного значения давления, но и от предыстории процесса.

На основе полученных из термодинамического расчета (или из стационарного эксперимента) зависимостей $T_{F0}(p, T_0)$ и $C_{i0}(p, T_0)$ можно после градиентного пересчета, общепринятого в феноменологической модели [1—3], найти закономерности $T_F(p, \varphi_s)$, $C_i(p, \varphi_s)$, пригодные для нестационарных условий. Тогда задача о температуре пламени и химическом составе продуктов при заданном изменении давления формально сведется к решению системы уравнений

$$\begin{aligned} \partial T / \partial t - u(p, \varphi_s) \partial T / \partial x &= \kappa_s \partial^2 T / \partial x^2, \quad 0 \leq x < \infty, \\ T(\infty, t) &\rightarrow T_0, \quad T(x, 0) = T_0 + (T_{s0} - T_0) \exp(-u_0 x / \kappa_s), \\ T(0, t) &= T_s(p, \varphi_s), \quad T_F = T_F(p, \varphi_s), \quad C_i = C_i(p, \varphi_s), \quad p = p(t), \end{aligned} \quad (1)$$

которая в безразмерном виде примет форму

$$\begin{aligned} \partial \vartheta / \partial \tau - v(\pi, \varphi) \partial \vartheta / \partial \xi &= \partial^2 \vartheta / \partial \xi^2, \\ \vartheta(\infty, \tau) &\rightarrow 0, \quad \vartheta(\xi, 0) = \exp(-\xi), \quad \pi(0) = \vartheta_s(0) = a_i(0) = 1, \\ \vartheta(0, \tau) &= \vartheta_s(\pi, \varphi), \quad \vartheta_F = \vartheta_F(\pi, \varphi), \quad a_i = a_i(\pi, \varphi), \quad \pi = \pi(\tau), \\ \vartheta &= (T - T_0) / (T_{s0} - T_0), \quad v = u / u_0, \quad \tau = t u_0^2 / \kappa_s, \quad \xi = x u_0 / \kappa_s, \quad \pi = p / p_0. \end{aligned} \quad (2)$$

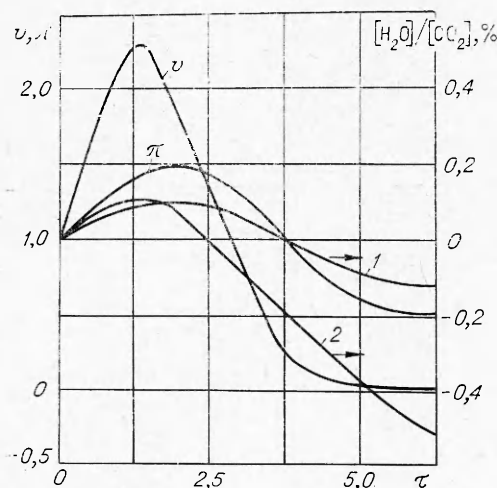


Рис. 1. Изменение параметров зоны горения пороха Н в нестационарном режиме при синусоидальном законе давления. Нулевой уровень H_2O/CO_2 соответствует 2,0147 (при $p=60$ атм).

На рис. 1 представлена нестационарная скорость горения при синусоидальном изменении давления $\pi = 1 + 0,5 \sin 4,5\tau$, рассчитанная на основе (2) и (3) при $k=1,60$; $v=0,7$, $A=8$, $B=0,42$. Видно, что имеет место погасание пороха. С целью иллюстрации изменения химического состава продуктов в нестационарном режиме был проведен термодинамический расчет продуктов горения пороха Н ($C_s=0,35$ кал/(г·град)) в широком интервале изменения давления и начальной температуры ($p=10-150$ атм, $T_0=+150^\circ\text{C}$). После применения градиентного пересчета можно было использовать эти данные для нахождения состава продуктов при текущих значениях p и ϕ_s . На рис. 1 для примера приведено изменение отношения концентраций $[H_2O]/[CO_2]$ в продуктах, найденное по стационарным соотношениям (кривая 1) и с учетом зависимости T_F и C_s от переменного во времени градиента (кривая 2). Масштаб для кривой 2 в десять раз меньше, чем для 1. Видно, что нестационарное горение приводит к существенному увеличению неполноты химических превращений в пламени, причем состав продуктов сильно (более, чем на порядок) отличается от рассчитанного по стационарным законам (когда T_F зависит только от p).

В работе [4] с помощью быстро сканирующего спектрометра экспериментально определены интенсивности спектральных линий H_2O (2,5 мкм) и CO_2 (4,4 мкм) в процессе сброса давления при горении смесевых топлив. Было отмечено, что переходный режим сопровождается неполнотой горения (относительным обогащением продуктов горючим). На рис. 2 представлены данные подобных измерений для топлива, состоящего из 82% перхлората аммония и 18% полибутадиенового каучука. Кривая 1 построена по результатам стационарного термодинамического расчета (T_F зависит только от p при данной T_0), точки соответствуют эксперименту. Видно, что в нестационарных условиях наблюдается существен-

Индексом 0 отмечены стационарные значения переменных при начальном давлении p_0 .

Изменение скорости горения, температуры поверхности и градиента ϕ в нестационарном случае может быть рассчитано автономно при известных зависимостях $v(\pi, \phi)$ и $\phi_s(\pi, \phi)$. В случае экспоненциальной зависимости скорости горения от начальной температуры и справедливости закона пиролиза будем иметь

$$\phi_s = (A + B \ln v) / (A - \ln v),$$

$$v = \pi^v \exp k(\phi_s - \phi/v),$$

$$A = E_s / (RT_{s0}), \quad B = T_0 / (T_{s0} - T_0),$$

$$v = (\partial \ln u_0 / \partial \ln p) T_0,$$

$$k = (T_{s0} - T_0) (\partial \ln u_0 / \partial T_0)_p.$$

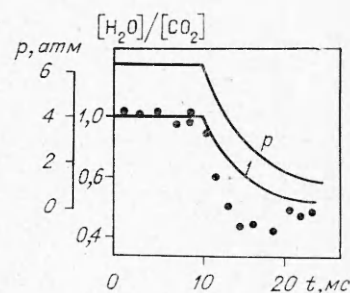


Рис. 2. Данные [4] по измерению относительной интенсивности излучения линий H_2O и CO_2 в динамическом режиме горения.

1 — расчет по стационарным зависимостям, точки — эксперимент. Более сильное по сравнению с рис. 1 изменение состава продуктов объясняется низким начальным давлением $p_0=4$ атм и другим составом топлива.

ное отклонение химического состава продуктов от стационарного. Вывод о невозможности качественного объяснения такого экспериментального факта в рамках существующей теории нестационарного горения, сделанный в [4], неверен.

ИХФ АН СССР,
Москва

Поступила в редакцию
15 IV 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1942, 12, 11—12.
2. Б. В. Новожилов. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. М., «Наука», 1973.
3. Ю. А. Гостинцев, Л. А. Суханов, П. Ф. Похил. ПМТФ, 1971, 5—6.
4. A. Baer, N. Ryan, E. Schulz. AIAA J., 1971, 5.

КАПИЛЛЯРНОЕ РАСТЕКАНИЕ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА ПРИ ГОРЕНИИ СМЕСЕЙ ТИТАНА С УГЛЕРОДОМ

В. М. Шкиро, И. П. Боровинская

При исследовании химических превращений в гетерогенных конденсированных средах всегда возникает вопрос о скорости и полноте протекания реакции. В металлургических процессах восстановления металлов из окислов [1], а также при синтезе тугоплавких соединений в режиме горения методом СВС [2] реагирующие смеси представляют собой смесь исходных порошкообразных компонентов. Равномерность перемешивания, форма и размер частиц исходных компонентов, их агрегатное состояние при температурах протекания реакции играют существенную роль.

В работах по теории безгазового горения смесей порошков [3—5] обсуждалась возможность капиллярного растекания более легкоплавкого реагента по порам неплавящегося компонента в зоне прогрева, предшествующее протеканию химической реакции при горении. Возможность существования этого эффекта придавалось большое значение, так как при растекании происходит сильное уменьшение масштаба гетерогенности и связанная с ним интенсификация химического взаимодействия реагентов (увеличение глубины превращения и скорости горения).

В данной работе показано, что такой эффект действительно имеет место при горении смеси титана с сажей. Легкоплавким компонентом является титан, а неглавлящимся — сажа. При растекании титана имеет место смена масштаба гетерогенности до размера частиц сажи, который является определяющим.

Исходные смеси готовились из сажи марки ПМ-16Э с размером частиц $\sim 0,1$ мкм и сферического титана с размером частиц от 100 до 200 мкм. Опыты проводились на цилиндрических образцах ($d=12$ мм, $h=20$ мм), спрессованных из смеси компонентов, взятых в стехиометрическом соотношении (рис. 1, а). Приготовленный образец помещался в бомбу постоянного давления [6] в среду инертного газа — аргона — и поджигался вольфрамовой спиралью. Сгоревшие об-