

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ГАШЕНИИ КОМБИНИРОВАННЫМ СПОСОБОМ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ В ПОЛУЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

В. Т. Ерохин, Ю. И. Федоров, А. В. Синдюков

(Калининград)

Устойчивое гашение конденсированной системы может быть достигнуто при определенных критических значениях¹ скорости падения и глубины спада давления в полузамкнутом объеме. Определению глубины спада давления была посвящена работа [1]. В работе [2] достаточно подробно рассмотрены физические основы процесса гашения к-системы путем введения в полузамкнутый объем жидкого хладагента и приведен приближенный (без учета диссоциации) метод расчета изменения давления в процессе гашения.

Настоящая работа посвящена определению нестационарных параметров в период гашения к-системы комбинированным способом (вводом в полузамкнутый объем охлаждающего вещества и вскрытия дополнительных отверстий). В отличие от ранее опубликованных настоящая работа построена с учетом химического взаимодействия между продуктами горения к-системы и продуктами разложения охладителя.

Как правило, критическая скорость падения давления \dot{p}^* определяется экспериментально и зависит, в основном, от природы к-системы и глубины спада давления. Одновременно с этим \dot{p}^* можно определить и теоретическим путем.

В последнем случае необходимо иметь теорию для нестационарной скорости горения. Как известно, такой теории, удовлетворительно описывающей экспериментальные данные, нет. В этой связи для иллюстрации предлагаемого метода воспользуемся приближенным соотношением для нестационарной скорости горения, которое описывает качественную корреляцию экспериментальных данных для переходных режимов [4, 5]

$$u = u_1 p^\nu \left[1 + \frac{2a\nu}{u_1^2} p^{-(2\nu+1)} \frac{dp}{dt} \right], \quad (1)$$

где p — давление; u_1 — единичная скорость горения; a — коэффициент температуропроводности; ν — показатель степени в степенном законе горения к-системы.

Условием гашения к-системы можно считать

$$u \leq 0. \quad (2)$$

По соотношению (1) получим

$$0 \geq u_1 p^\nu \left[1 + \frac{2a\nu}{u_1^2} p^{-(2\nu+1)} \frac{dp}{dt} \right]$$

или после преобразований

$$-1 \geq \frac{2a\nu}{u_1^2} p^{-(2\nu+1)} \frac{dp}{dt}.$$

¹ Под критической понимается такая скорость падения давления, при которой происходит гашение к-системы.

Последнее выражение можно представить в виде

$$-\frac{d \ln p}{dt} \leq \frac{[u_1 p^v]^2}{2av}. \quad (3)$$

По соотношению (3) можно приближенно определить критическую скорость падения давления, которая для выбранной к-системы и полузамкнутого объема (в случае осуществления гашения путем впрыска в полузамкнутый объем охлаждающего вещества и открытия дополнительных отверстий) зависит от величины площади дополнительных отверстий в полузамкнутом объеме, от количества вводимого в полузамкнутый объем охлаждающего вещества (хладоагента) и его удельной теплоты парообразования, от скорости и условий впрыска охлаждающего вещества в полузамкнутый объем и от скорости испарения охлаждающего вещества и др.

Естественно, чем более рационально выполняются указанные условия, тем меньшее количество охлаждающего вещества потребуется для устойчивого гашения к-системы.

Из физических соображений следует, что расчет необходимого для устойчивого гашения количества охлаждающего вещества в выбранных условиях в принципе должен сводиться к определению скорости падения давления. При этом количество охлаждающего вещества будет достаточным для гашения к-системы, если скорость падения давления будет больше или равна критическому значению скорости спада давления

$$\frac{d \ln p}{dt} \geq - \left[\frac{(u_1 p^v)^2}{2av} \right]_{\text{кр}}. \quad (4)$$

Как следует из теории нестационарного горения Я. Б. Зельдовича, процесс гашения к-системы зависит также от глубины сброса давления

$$\left(\frac{p_3}{p_n} \right)^v = \left\{ \frac{B_0 (T - T_0)}{\exp [B_0 (T - T_0) - 1]} \right\}, \quad (5)$$

где p_3 — давление, при котором происходит гашение к-системы; p_n — начальное давление; B_0 — температурный коэффициент скорости горения; T — температура газификации; T_0 — начальная температура к-системы. Вместе с тем основным критерием, определяющим условие гашения, является скорость падения давления

$$\frac{dp}{dt} \cong \frac{\Delta p}{\Delta t}. \quad (6)$$

Из соотношения (6) следует, что для определения скорости падения давления необходимо найти зависимость давления в полузамкнутом объеме от времени. При учете конечной скорости испарения охлаждающей жидкости будем под приходом жидкости в полузамкнутый объем подразумевать только ту часть жидкости, которая испаряется.

Если предположить, что происходит мгновенное смешение охлаждающего вещества с продуктами горения к-системы, а скорость испарения является бесконечно большой величиной, тогда правомерно предположить равенство прихода и расхода жидкости в полузамкнутый объем из объема, содержащего охладитель. В общем случае приход жидкости можно найти, если известны скорость смешения хладоагента с продуктами горения, характер его дробления и размеры капель.

По размеру капли можно приближенно найти время ее испарения [3]

$$t_{\text{исп}} \cong \frac{d^3 \rho_{\text{ж}}}{BD (C_0 - C_\infty) (1 + \beta \sqrt{\text{Re}})}. \quad (7)$$

Здесь d — диаметр капли, ρ_k — плотность жидкости, D — коэффициент диффузии, C_∞ — концентрация вещества на бесконечно большом расстоянии от капли, C_0 — концентрация равновесного с каплей пара, Re — число Рейнольдса для потока, обтекающего каплю, β — постоянный коэффициент.

При известном составе раздробленной жидкости можно определить скорость ее испарения. Не останавливаясь детально на определении скорости смешения и испарения, будем считать, что величина прихода охладителя \dot{G}_0 известна. Тогда в полузамкнутом объеме с момента впрыска охладителя находится реагирующая смесь, состоящая из паров охладителя и продуктов горения к-системы. При математическом описании процесса для этой смеси принимались следующие допущения:

компоненты (смеси) идеальные, а их термодинамические функции — энтропия, энтальпия, теплоемкости при постоянном давлении и объеме и константы равновесия k — не зависят от давления;

параметры смеси осреднены по свободному объему;

между хладоагентом и стенками полузамкнутого объема и к-системы теплообмена нет;

капли охладителя на фронт пламени и прогретый слой к-фазы не воздействуют;

дополнительный подвод массы и тепла за счет сгорания вышибной к-системы не учитывается.

Весовое количество продуктов горения к-системы в полузамкнутом объеме (в соответствии с уравнением сохранения вещества для продуктов горения) в данный момент можно определить по следующему соотношению:

$$\dot{G}_T = u_n \rho_T S - g_T \dot{y}, \quad (8)$$

где

$$\dot{y} = \begin{cases} (F_{кр} + F_{дон}) \Gamma(k) \varphi_p \sqrt{p_k \rho_k} \delta \left(p_k - \frac{p_a}{\beta} \right), \\ (F_{кр} + F_{дог}) \varphi_p \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_k \rho_k \left[\left(\frac{p_a}{p_k} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_a}{p_k} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \delta \left(\frac{p_a}{\beta} - p_k \right); \end{cases} \quad (9)$$

$$\beta = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}};$$

δ — единичная функция; $\Gamma(k) = \sqrt{k} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}$; S — суммарная поверхность горения к-системы; φ_p — коэффициент расхода; $F_{кр}$ — площадь критического сечения; k — показатель адиабаты; $g_T = \frac{\dot{G}_T}{\dot{G}_T + \dot{G}_0}$ — относительная весовая доля продуктов горения к-системы в полузамкнутом объеме. Из уравнения сохранения вещества для охладителя можно определить весовую долю паров охладителя в полузамкнутом объеме в данный момент времени.

$$\frac{dG_0}{dt} = \dot{G}_0 - g_0 \dot{y}, \quad (10)$$

где $g_0 = \frac{G_0}{G_T + G_0}$ — относительная весовая доля паров охладителя в полузамкнутом объеме. Расход охладителя определяется в соответствии с соотношением (9).

Для замкнутости приведенных уравнений необходимо еще добавить уравнения состояния и сохранения энергии для смеси в полузамкнутом объеме, а также уравнения, определяющие химическое равновесие гомогенной диссоциированной смеси при постоянном давлении и температуре:

уравнение состояния

$$p - \frac{\rho RT}{\mu} = 0; \quad (11)$$

уравнение сохранения энергии

$$I_{\text{см}} - I_{\text{сг}} - \int_{p_0}^p V dp = 0; \quad V = \text{const}; \quad (12)$$

уравнение диссоциации в логарифмической форме

$$\ln p_j - \sum_{i=1}^m a_{ij} \ln p_{A(i)} + \ln k_j = 0 \quad (13)$$

($j=1, 2 \dots e$);

уравнение сохранения вещества в логарифмической форме

$$\ln \sum_{j=1}^{e+m} a_{ij} n_j - \ln M_{\text{см}} - \ln b_{i\text{см}} = 0 \quad (14)$$

($i=1, 2 \dots m$);

уравнение Дальтона

$$\ln \sum_{j=1}^{e+m} p_j - \ln p = 0. \quad (15)$$

Здесь e — количество молекулярных компонентов в смеси, m — число атомарных компонентов в смеси, a_{ij} — число атомов i -го химического элемента в компоненте, $b_{i\text{см}} = g_i b_{i\tau} + g_o b_{i_o}$ — количество атомов i -го химического элемента в эквивалентной формуле исходного вещества, p_j — парциальное давление, n_j — число молей j -го газообразного компонента в смеси, $p_j = n_j$, $M_{\text{см}}$ — число молей исходного вещества, k_j — константа равновесия.

Логарифм константы равновесия по парциальным давлениям для реакции диссоциации j -го компонента на атомы определяется по соотношению

$$\ln k_j = \frac{\sum_{i=1}^m a_{ij} S_{A(i)} - S_j^0}{R_0} - \frac{\sum_{i=1}^m a_{ij} I_{A} - I_j}{R_0 T},$$

где S_j^0 — стандартная энтропия. Уравнения (8), (10) решаются методом Рунге — Кутты, уравнения (11), (12) — методом последовательных приближений

$$p_{n+1} = p_n + \Delta p;$$

$$T_{n+1} = T_n + \Delta T,$$

где

$$\Delta p = \frac{i_2 \frac{\partial f_1}{\partial T} - f_2 \frac{\partial f_2}{\partial T}}{\frac{\partial f_1}{\partial T} \frac{\partial f_2}{\partial p} - \frac{\partial f_2}{\partial T} \frac{\partial f_1}{\partial p}};$$

$$\Delta T = \frac{i_2 \frac{\partial f_1}{\partial p} - f_1 \frac{\partial f_2}{\partial p}}{\frac{\partial f_1}{\partial T} \frac{\partial f_2}{\partial p} - \frac{\partial f_2}{\partial T} \frac{\partial f_1}{\partial p}};$$

$$f_1 = I_{cm} - I_{cr} + \int_{p_0}^p V dp;$$

$$f_2 = p - \frac{\rho RT}{\mu}.$$

Для лучшей сходимости метода начальные приближения для неизвестных параметров выбираются из предыдущего шага.

Уравнения (13)–(15) решаются модифицированным методом Ньютона, суть которого состоит в том, что при вычислении $n+1$ поправки значения производных функций берутся первого шага, а значения функций k -го шага. При этом

$$I_{cr} = G_{cm} \frac{\sum_{j=1}^{e+m} n_j I_j}{\mu_{cm} M_{cm}};$$

$$I_{cm} = G_{cr} I_{cr} + G_0 I_0;$$

$$C_{p_{pcm}} = \frac{\partial}{\partial T} \left[\frac{\sum_{j=1}^{e+m} n_j I_j}{\mu_{cm} M_{cm}} \right];$$

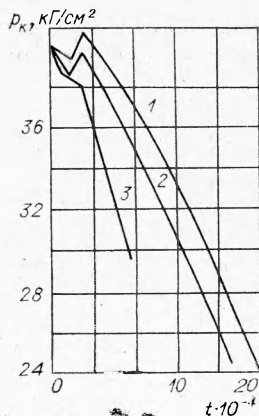
$$C_{p_{pr}} = \frac{\partial}{\partial T} \left[\frac{\sum_{j=1}^{e+m} n_j I_j}{\mu_{cm} M_{cm}} \right];$$

$$C_{V_{pr}} = C_{p_{pr}} - \frac{R}{\mu} \left[\frac{\left[i - \left(\frac{\partial \ln M_{cm}}{\partial \ln T} \right)_F \right]^2}{\left(\frac{\partial \ln M_{cm}}{\partial \ln p} \right)_T} \right];$$

$$k = \frac{C_{p_{pr}}}{C_{V_{pr}}}.$$

Здесь $\mu_{cm} = \frac{M_{cm} \mu'}{\rho}$, V — свободный объем, \dot{y} — секундный расход, R — универсальная газовая постоянная, μ — молекулярный вес, I_{cr} — энтальпия смеси после реагирования вещества, I_{cm} — энтальпия смеси до реагирования вещества, $C_{p_{pcm}}$ — равновесная теплоемкость смеси при постоянном давлении, $C_{p_{pr}}$ — то же, при постоянном давлении, $C_{V_{pr}}$ — то же, при постоянном объеме.

В результате решения перечисленных выше систем получаем изменение рабочих параметров в процессе гашения к-системы в полузамкнутом объеме.



Для иллюстрации предложенного метода приведен пример расчета рабочих параметров для периода гашения к-системы. Численные результаты расчетов для конденсированной системы по изменению давления в полузамкнутом объеме представлены на рисунке ($G=5000$ кг/с). Счет кривых давления прерывался в момент погасания к-системы. Каждая кривая давления на рисунке соответствует определенному заданному приходу охладителя в полузамкнутый объем и конкретной величине дополнительного отверстия ($F_{gn} + F_{kr} = 0,1848$ м² (1), 0,3398 (2) и 0,924 м² (3)).

Поступила в редакцию 5/VIII 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Т. Ерохин, Ю. И. Федоров. ФГВ, 1971, 7, 4.
2. Б. А. Райзберг, Б. Т. Ерохин, К. П. Самсонов. Основы теории рабочих процессов в ракетных системах на твердом топливе. М., «Машиностроение», 1972.
3. Н. А. Фукс. Испарение и рост капель в газообразной среде. М. Изд-во АН СССР, 1958.
4. Хортон и др. РТК, 1968, 6, 2.
5. Von Elbe G. Theory of Solid Propellant Ignition and Response to Pressure Transients. Interagency Solid Propulsion Meeting 3: 95, 1963.

УДК 662.612.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК К-ФАЗЫ ПРИ ГОРЕНИИ ПОРОХОВ БАЛЛИСТИЧНОГО ТИПА

Ю. С. Иващенко, А. С. Комаров, В. Л. Павленко

(Красноярск)

Исследование электрофизических характеристик к-фазы играет важную роль в изучении процесса горения твердых топлив.

В настоящей работе изложены результаты исследования электропроводности и ее флуктуаций (шумов) в реакционном слое к-фазы горящего баллистического пороха.

1. Зависимость удельной электропроводности σ_k полимеров от температуры описывается соотношением, справедливым для полупроводников

$$\sigma_k = \sigma_0 e^{-E/2kT},$$

где E — энергия активации; σ_0 — электропроводность системы при $T \rightarrow \infty$. Ситуация усложняется в случае полимерных систем, содержащих высокопроводящий наполнитель. Подобные дисперсные системы имеют место при горении металлизированных порохов. Однако даже при отсутствии высокопроводящего наполнителя возможно образование дисперсной системы в реакционном слое горящего пороха. Так, при горении баллистических порохов возможно появление прококсованных волокон нитроцеллюлозы с образованием углеродного каркаса, имеющего при малых скоростях горения надповерхностную структуру. Механизм электропроводности дисперсных систем является пока дискуссионным и определяется типом электропроводящего наполнителя, степенью его дисперсности, температурой и другими факторами.

Довольно значительный вклад в общую проводимость системы может вносить термоэлектронная эмиссия с частиц металла через промежутки между ними. В результате общая электропроводность σ_Σ дисперсного поверхностного слоя горящего пороха складывается из двух видов проводимости

$$\sigma_\Sigma = \sigma_g + \sigma_\tau,$$

где σ_g — электропроводность дисперсной системы в к-фазе; σ_τ — электропроводность, обусловленная термоэлектронной эмиссией.

Величина σ_g в общем виде определяется довольно сложно. Для статистической двухкомпонентной смеси, исходя из модели сферических