

ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭРОЗИОННОГО ГОРЕНИЯ СМЕСЕВЫХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

Л. К. Гусаченко, В. Е. Зарко

*Институт химической кинетики и горения СО РАН,
630090 Новосибирск*

Показано, что при горении смесевых твердых топлив мгновенная массовая скорость горения может зависеть от колебаний скорости обдува поверхности даже в случае, когда в стационарном режиме горение нечувствительно к скорости обдува. Предложен способ изучения нестационарного эрозионного горения с использованием экспериментов на слоевых системах.

Из всего довольно значительного числа исследований нестационарного горения смесевых твердых топлив (СТТ) лишь очень малая часть посвящена изучению нестационарного эрозионного горения. В [1] для гомогенного состава получена функция отклика скорости его горения на изменения скорости обдувающего потока. Для этого образец баллистита сжигали в центре Т-камеры (где колебания давления имеют узел, т. е. отсутствуют, а колебания скорости обдувающего потока имеют пучность, т. е. максимальны). В [2] упоминается, что на нестационарное эрозионное горение квазигомогенных составов легко распространяется феноменологическая модель Зельдовича — Новожилова. Из нее, в частности, следует, что состав, стационарная скорость горения которого не зависит от обдува, нечувствителен к нему и в нестационарном режиме. В [3] отмечена недостаточная теоретическая изученность этого явления.

Экспериментальные исследования по нестационарному эрозионному горению гетерогенных составов авторам неизвестны. Между тем, такие исследования необходимы, поскольку при переходе горения СТТ в нестационарный режим вероятность эрозионных эффектов возрастает и они могут появиться у состава, который в стационарном режиме их не имел.

В [4, 5] отмечено, что для некоторых составов (см. данные [6]) продвижение лидирующих участков газификации менее термостойкого компонента определяет величину стационарной скорости горения и при этом может слабо или вообще не зависеть от обдува поверхности СТТ. Однако нестационарный обдув будет существенно изменять газоприток от разветвленной выступающей поверхности термостойкого компонента. При этом будет меняться и соотношение компонентов в газовой фазе, а с ним и температура продуктов сгорания. Описанная возможность, по мнению авторов, должна стимулировать экспериментальное и теоретическое исследование нестационарной эрозии СТТ.

Величина эффекта (изменения компонентного состава газовой фазы) зависит от структуры выступающих термостойких участков. Если термостойким оказался дисперсный компонент и нет процессов, удерживающих его на поверхности, то догорание диспергированных частиц происходит в объеме камеры сгорания и зависит не только от мгновенной скорости газа вблизи поверхности СТТ, но и от всей гидродинамики камеры сгорания.

Если термостойкий компонент образует на поверхности достаточно прочный каркас, влияние обдува зависит от характера разрушения каркаса, которое может быть очаговым или квазигомогенным. В последнем

случае знание эмпирической зависимости массы M каркаса на 1 см^2 поверхности от скорости стационарного обдува v позволяет сразу приближенно найти нестационарную добавку к скорости горения $dM/dt = (dM/dv)(dv/dt)$ (см. об этом подробнее в [7]). Разумеется, эксперимент по измерению M представляет собой серьезную проблему. Опыты без обдува описаны в [8].

Если термостойкий компонент образует отдельные выступы, могут быть полезны эмпирические данные об их величине как функции v . При этом необходима также информация об изменении формы выступов в нестационарном режиме. Ее можно получить, например приближенными методами [4, 5].

Для состава с выступами термостойкого компонента приведем описание возможного полуэмпирического способа нахождения функции отклика. Для демонстрации подхода ограничимся наиболее простым приближением, когда СТТ моделируется слоевой системой, плоское сечение которой состоит из чередующихся прямоугольников размером $1 \text{ см} \times b$ для труднолетучего (медленногорящего) и $1 \text{ см} \times a$ для быстрогорящего компонентов.

Допустим, из опытов с обдувом горящего модельного слоевого образца продуктами сгорания (поперек слоев) в стационарном режиме известно, что линейная скорость горения u практически не зависит от скорости обдува v . Выше упоминалась наиболее вероятная причина такого явления: определяющий стационарную скорость горения всей системы процесс выгорания менее термостойкого компонента в лидирующих впадинах защищен от влияния обдува выступами термостойкого компонента. Выступы подвержены влиянию обдува в полной мере: с изменением v меняются их форма и высота. Можно ожидать, что интенсификация тепло- и массообмена вызовет снижение высоты выступов. Разумеется, при достаточно высокой скорости обдува v_m выступы перестанут играть защитную роль, и обдув начнет влиять на лидирующие зоны. Эта область параметров не рассматривается.

Допустим, что известна «стационарная» эмпирическая зависимость высоты h_{st} выступов на поверхности от v . Скорости перемещения выступов $u_l \equiv -dx_l/dt$ и впадин $u_f \equiv -dx_f/dt$ в стационарном режиме совпадают. Считаем, что в условиях переменной скорости обдува максимальная скорость газового потока не превышает v_m , тогда $u_f = \text{const} = u_{st}$, а для u_l выполняется соотношение

$$u_l = u_{l,st} + A[h - h_{st}(v(t))],$$

так что

$$dh/dt = -A[h - h_{st}(v(t))]. \quad (1)$$

Здесь $h_{st}(v)$ — «квазистационарная» зависимость, например¹

$$h_{st} \equiv x_l - x_f = h_0 - kv^2; \quad (2)$$

x — координата поверхности в системе, связанной с СТТ; индексы $st, l, f, 0$ означают соответственно стационарность, медленно- или быстрогорящий компонент, отсутствие обдува. Квадратичная зависимость (2) выбрана как простейшая, удовлетворяющая требованию независимости всей картины эрозионного горения от знака скорости обдува. Смысл (1) таков: чем сильнее медленногорящий компонент выходит за квазистационарный уровень, тем быстрее он выгорает за счет действия потока, и наоборот.

¹ Авторам известны только данные [9] по измерению шероховатости погашенных образцов, горевших без обдува. Возможно, для получения $h(v)$ будут полезны фотоили рентгеновские снимки слоевых образцов, моделирующих СТТ.

Константа A должна быть найдена из «нестационарного» эксперимента или теории. Решение (1), ограниченное при $t \rightarrow -\infty$ (точнее, удовлетворяющее условию $\lim_{t \rightarrow -\infty} [h \exp(At)] = 0$), имеет вид

$$h(t) = A \int_{-\infty}^t h_{st}(v(\tau)) e^{-A(t-\tau)} d\tau. \quad (3)$$

В частности, при знакопеременных колебаниях² скорости обдува с частотой ω , когда $v = v_a \cos(\omega t)$, из (2), (3) следует

$$h = h_0 - kv_a^2 \left(0,5 + [0,5 A \cos(2\omega t) + \omega \sin(2\omega t)] \frac{A}{A^2 + 4\omega^2} \right). \quad (4)$$

Чтобы найти изменение соотношения продуктов газификации компонентов в газовой фазе, нужно задаться законом изменения формы выступов при колебаниях их высоты (например, по аналогии с [4, 5]).

При простейшем предположении о треугольной форме выступов, у которых лидирующие точки (на границе с легко газифицирующимся компонентом) перемещаются по СТТ с постоянной скоростью u_f , а высота h может меняться со временем, массовый расход твердого медленногорящего компонента (от одного его слоя) составит

$$M_l^* = \rho_l b \left(u_f - 0,5 \frac{dh}{dt} \right). \quad (5)$$

Массовый расход от одного слоя быстрогорящего компонента не зависит от времени и составляет $M_f^* = \rho_f a u_f$. Здесь ρ_l, ρ_f — плотности компонентов. Тогда с учетом (4)

$$\frac{M_l^*}{M_f^*} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \left(1 - \frac{kv_a^2}{2u_{st}} \frac{\omega}{\sqrt{1 + (2\omega/A)^2}} \sin(2\omega t - \varphi) \right), \quad (6)$$

$\varphi = \arctg(2\omega/A)$. При $\omega \rightarrow \infty$ это дает

$$\frac{M_l^*}{M_f^*} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \left(1 + \frac{Akv_l^2}{4u_{st}} \cos(2\omega t) \right).$$

В (6) использовано справедливое для рассмотренной слоевой системы соотношение $\rho_l b / \rho_f a = \alpha / (1 - \alpha)$, где α — массовая доля медленногорящего (термостойкого) компонента в системе.

Отношение (6) определяет переменный состав продуктов сгорания. Если для смесевых композиций (не обязательно слоевых), составленных из двух упомянутых выше компонентов, известна из термодинамических расчетов или опытов «стационарная» зависимость температуры продуктов сгорания от состава $T_p(\alpha)$, то (6) позволяет вычислить для рассмотренного нестационарного режима слоевой системы переменную $T_p(\alpha(t))$, где $\alpha(t) = (M_l^*/M_f^*) / (1 + M_l^*/M_f^*)$.

Таким образом, из приведенного анализа следует, что у смесового состава со слабой чувствительностью характеристик горения от скорости стационарного обдува могут проявиться нестационарные эффекты при нестационарном обдуве.

Работа проводилась при поддержке Международного фонда Дж. Сороса «Культурная инициатива» (код проекта SDY000-490).

²Они имеют место, например, при развитых тангенциальных колебаниях в цилиндрическом канале горящего заряда СТТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Медведев Ю. И., Ревягин Л. Н. О нестационарной эрозии пороха // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10, № 3. С. 341–345.
2. Зельдович Я. Б., Лейпунский О. И., Либрович В. Б. Теория нестационарного горения пороха. М.: Наука, 1975.
3. Price E. W., Flandro G. A. Status and prospects for future developments // Nonsteady Burning and Combustion Stability of Solid Propellants. Washington, 1992. (Progress in Astronautics and Aeronautics. V. 143. P. 849–873).
4. Гусаченко Л. К. Нестационарное горение безметалльных гетерогенных составов // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24, № 4. С. 47–54.
5. Гусаченко Л. К., Садыков И. Ф. Модель нестационарного горения слоевой системы // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 5. С. 81–84.
6. Новиков С. С., Потулов В. Ю., Чуйко С. В. О взаимодействии фронта горения конденсированной системы с гетерогенными включениями // Горение конденсированных систем. Черноголовка, 1977. С. 56–58.
7. Гусаченко Л. К. Феноменологическая модель нестационарного горения ТТ с накоплением компонента на поверхности // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 2. С. 38–42.
8. Бабук В. А., Белов В. П., Ходосов В. В., Шелухин Г. Г. Исследование агломерации частиц алюминия при горении в составе смесевых конденсированных систем // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 3. С. 20–25.
9. Зенин А. А. Процессы в зонах горения баллистических порохов // Физические процессы при горении и взрыве. М.: Атомиздат, 1980.

*Поступила в редакцию 16/XI 1993 г.,
в окончательном варианте — 20/II 1995 г.*
