

Вместе с тем нельзя исключить возможность эффектов гистерезисного типа в области перехода. Этот вопрос требует специального анализа, предполагающего построение более точного решения системы (1) — (4), учитывающего и теплопроводностный и конвективный перенос тепла в зоне реакции.

Большим значениям константы теплообмена ($u_\lambda < u_\lambda$) отвечает теплопроводностный режим горения. С уменьшением α этот механизм меняется на конвективный, при этом эффективность воздействия теплоносителя снижается — температура горения падает, возможность сверхадиабатического перегрева реализуется не полностью. Аналогичный переход имеет место при увеличении скорости фильтрации v_1 (рис. 3, б). Малым значениям v_1 отвечает теплопроводностный режим, который при $u_\alpha > u_\lambda$ переходит в конвективный. Здесь также можно говорить о снижении эффективности теплоносителя, так как с переходом в конвективный режим рост температуры замедляется (если учитывать зависимость $\alpha \sim \sqrt{v_1}$) либо прекращается вовсе ($\alpha = \text{const}$).

При анализе практических ситуаций следует учитывать увеличение ширины зоны теплообмена с ростом v_1 . При большой скорости фильтрации теплообмен между к-фазой и теплоносителем может не успеть осуществиться за время пребывания теплоносителя в пористой среде, что приведет к снижению температуры и скорости горения и возможному срыву процесса. Анализ этого случая выходит за рамки стационарного подхода, предполагающего, что размер области, заполненной реагирующим веществом, значительно превосходит масштаб волны горения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алдушин А. П., Сеплярский Б. С. Докл. АН СССР, 1978, 241, 1, 72.
2. Алдушин А. П., Сеплярский Б. С. Докл. АН СССР, 1979, 249, 3, 585.
3. Рабинович О. С., Гуревич И. Г. ИФЖ, 1983, 44, 1, 75.
4. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И. и др. Математическая теория горения и взрыва. — М.: Наука, 1980.
5. Новожилов Б. В. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. — М.: Наука, 1973.
6. Алдушин А. П., Каспарян С. Г. ФГВ, 1981, 17, 6, 11.
7. Хайкин Б. И., Филоненко А. К., Худяев С. И. ФГВ, 1968, 4, 4, 591.

п. Черноголовка

Поступила в редакцию 20/XII 1988

УДК 662.612.3

Ю. С. Иващенко, А. Л. Садырин

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ ГОРЕНИЯ БАЛЛИСТИЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ СО СВИНЦОВЫМ КАТАЛИЗАТОРОМ

Пульсационное горение конденсированных систем [1] приводит к флуктуациям электропроводности зоны горения, в том числе и к-фазы. Пропускание через поверхность горения электрического тока позволяет наряду с измерениями электропроводности поверхности выделить шумоподобный сигнал, несущий информацию о динамических процессах в к-фазе. Частотный спектр сигнала отражает при этом частотные свойства процесса горения.

Возникающий при горении токовый (низкочастотный) шум имеет нетепловой характер и вызывается флуктуациями сопротивления поверхности горения из-за флуктуаций ее структуры и состава, например, при диспергировании частиц (агломератов) металла и сажи, а также быстром выгорании целых очагов, содержащих указанные частицы.

© 1990 Иващенко Ю. С., Садырин А. Л.

Рассматривая шумовой сигнал в виде последовательности случайных импульсов тока, с помощью преобразований Фурье можно получить выражение для средней длительности импульсов (событий)

$$\bar{\tau} = \frac{2,2S(0)}{\int_0^{\infty} S(\omega) d\omega}, \quad (1)$$

где $\bar{\tau}$ — средняя длительность импульсов; $S(0)$ — спектральная плотность шума на частоте, близкой к нулевой ($\omega \ll 1/\bar{\tau}$); $S(\omega)$ — спектральная плотность шума на высоких ($\omega \gg 1/\bar{\tau}$) частотах; $\omega = 2\pi f$ — угловая частота; f — частота.

Учитывая, что низкочастотные шумы подчиняются закону $S(f) = Af^{-m}$ (A и m — постоянные коэффициенты), выражение (1) можно записать в практически более удобном виде

$$\bar{\tau} = \frac{2,2S(f_n)}{f_n \int_{f_n}^{f_b} f^{-m} df}, \quad (2)$$

где f_n и f_b — нижняя и верхняя частотные границы измерения шума.

Таким образом, используя значение спектральной плотности токового шума на низкой частоте, а также величину интегрирования спектральной плотности до достаточно высоких частот, можно определить среднее время «жизни» очагов на поверхности горения, а также среднюю частоту $\bar{f} = 1/\bar{\tau}$ их выгорания.

Исследовались электрические характеристики поверхности горения пороха Н с добавкой 1 % окиси свинца. В опытах использовались образцы пороха прямоугольного сечения размером 7×10 и длиной 50 мм. Для пропускания через поверхность горения электрического тока использовали сгорающие пленочные электроды из олова толщиной 1 мкм, нанесенные на большие грани образцов напылением в вакууме. Для обеспечения торцового горения образцы покрывались парафином.

Электропроводность поверхности измеряли на переменном токе частотой 1 кГц [2]. Токовый шум из-за пульсаций электропроводности поверхности исследовали при пропускании через поверхность слабого постоянного тока величиной 0,1 мА. Функциональная схема измерений частотных спектров токового шума дана на рис. 1. Через поверхность горения топливного образца 1 от источника постоянного напряжения $E = 9$ В с помощью пленочных электродов 2 пропускаться электрический ток. На сопротивлении нагрузки $R_n = 10$ кОм выделялся шумоподобный сигнал и через разделительный конденсатор C подавался на перестраиваемый по частоте селективный усилитель 3 с коэффициентом усиления 10^5 . Усиленный сигнал детектировался квадратичным детектором 4, усреднялся и регистрировался светолучевым осциллографом 5.

Частотный анализ осуществлялся в диапазоне частот от 20 Гц до 20 кГц. Измеренный сигнал относился к полосе пропускания усилителя, в результате чего определялась спектральная плотность шума. Частотный спектр получался путем последовательной перестройки частоты усилителя от опыта к опыту. В каждой точке частотного диапазона производилось 5 опытов. Полученные частотные спектры нормировались по максимальному значению на частоте 20 Гц.

На рис. 2 в качестве примера приведен нормированный частотный спектр токового шума при $p = 8$ МПа. На рис. 3 даны зависимости удельной поверхностной электропроводности σ_n ,

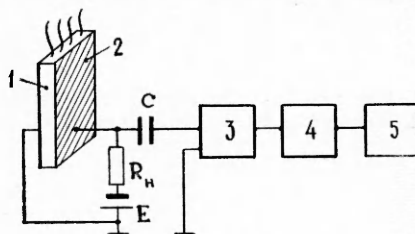


Рис. 1.

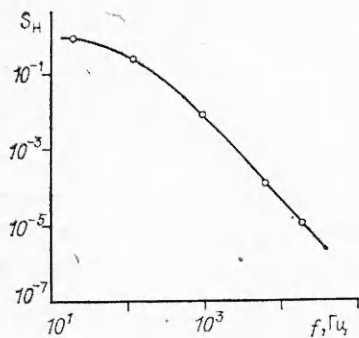


Рис. 2.

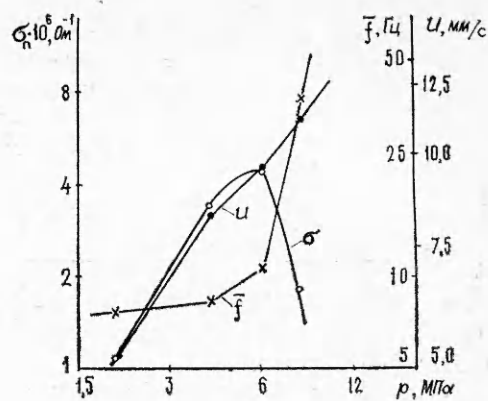


Рис. 3.

скорости горения u и средней частоты пульсаций электропроводности f от давления p . Численные значения σ_n , u и f , а также электрического сопротивления R_n поверхности и среднего времени пульсаций τ электропроводности приведены в таблице. Величина удельной поверхностной электропроводности определялась из соотношения $\sigma_n = d/R_n b$, где d — расстояние между электродами; b — ширина пленочных электродов.

p , МПа	u , мм/с	R_n , кОм	$\sigma_n \cdot 10^6$, Ом $^{-1}$	τ , мс	\bar{f} , Гц
2	5,2	640	1,1	130	7,7
4	8,25	210	3,4	120	8,3
6	9,6	160	4,4	93,5	10,7
8	11,2	390	1,8	26	38

Как следует из рис. 3 и таблицы, содержание углерода на поверхности, определяющее ход кривой электропроводности, вначале растет с давлением до $p \approx 5$ МПа, а затем падает. Последнее может быть результатом реакции между углеродом и окисью азота, катализируемой свинцом. Изменения в процессе сажеобразования начинаются на участке замедления роста скорости горения. При этом зависимость $\bar{f}(p)$ повторяет изменения скорости горения с давлением. При $p > 6$ МПа, когда содержание сажи на поверхности быстро падает, наблюдается резкое увеличение \bar{f} , что связано с уменьшением размеров сажистых образований и увеличением их числа.

Таким образом, добавка свинецсодержащего катализатора к баллистному пороху приводит к сложной зависимости $\bar{f}(p)$. Характерной ее особенностью является наличие максимума электропроводности (сажеобразования) на участке замедления роста скорости горения и последующее снижение электропроводности.

Анализ частотных спектров шумов электропроводности поверхности свидетельствует о совпадающих изменениях скорости горения и средней частоты пульсаций электропроводности с давлением. Последняя при этом резко возрастает на участке падения сажеобразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Илюхин В. С., Мысов В. Г., Новиков С. С. ФГВ, 1974, 10, 3, 334.
2. Иващенко Ю. С., Комаров А. С., Павленко В. Л. ФГВ, 1975, 11, 2, 213.

г. Красноярск

Поступила в редакцию 21/XI 1988