

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ГОРЕНИЯ БАЛЛИСТИЧНОГО ПОРОХА ТЕРМОШУМОВЫМ МЕТОДОМ

Ю. С. Иващенко, В. М. Зинченко

(Красноярск)

Определение температуры поверхности горения пороха связано с некоторыми трудностями, особенно в области высоких давлений. Использование термопар часто приводит к ошибочным результатам из-за температурной неоднородности поверхности вследствие ее вспенивания и некоторой неопределенности положения спая термопары относительно поверхности пороха.

В данной работе рассматривается термошумовой метод измерения температуры, позволяющий измерять усредненную по всей поверхности горения температуру к-фазы, исключая влияние газовой фазы. Достоинство метода заключается также в возможности измерения температуры поверхностей с высокой электропроводностью. Последнее часто ограничивает применение термопар из-за электрического шунтирования спая и действия паразитных термо-ЭДС.

Измерение температуры поверхности горящего пороха основано на использовании известного выражения Найквиста, связывающего величину активного сопротивления R_n (в данном случае сопротивления поверхности горения) и уровень теплового шума $\overline{u_{ш}^2}$ носителей заряда с температурой T_n данного сопротивления

$$\overline{u_{ш}^2} = 4kR_nT_n\Delta f, \quad (1)$$

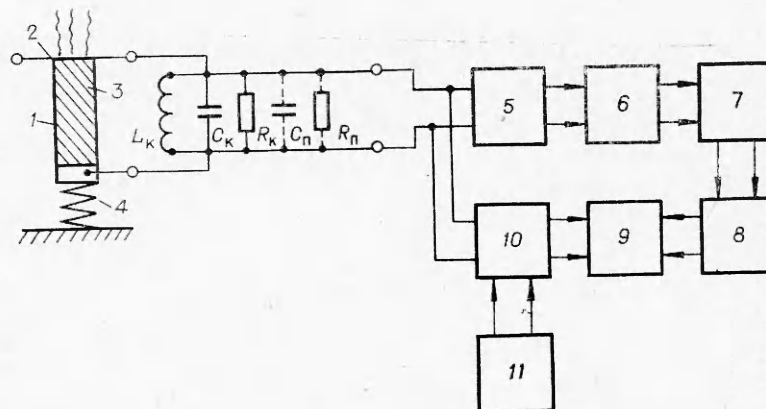
где k — постоянная Больцмана; Δf — полоса частот, в которой усиливается тепловой шум. Формула Найквиста универсальна и применима к любым проводникам и диэлектрикам [1].

Из выражения (1) следует, что, усилив и измерив в известной полосе частот Δf среднеквадратичное значение напряжения теплового шума $\overline{u_{ш}^2}$, генерируемого сопротивлением R_n , а также измерив саму величину сопротивления R_n , можно определить температуру поверхности. Заметная электрическая проводимость в поверхностном слое горящего пороха возникает, как и у всех органических диэлектриков, за счет экспоненциальной связи проводимости с температурой и коксования поверхности.

Наличие реактивной составляющей полного сопротивления поверхностного слоя пороха, а также паразитная емкость C_n измерительной схемы вызывают необходимость подключения шумящего сопротивления к колебательному контуру $L_n C_n$ (см. рисунок), что позволяет компенсировать на резонансной частоте реактивную составляющую цепи. С учетом сопротивления собственных потерь R_k измерительного контура при T_0 (обычно она равна комнатной температуре) выражение (1) примет вид

$$\overline{u_{ш}^2} = 4k(T_n R_k + T_0 R_n) [R_n R_k / (R_n + R_k)^2] \Delta f. \quad (2)$$

Переходя от параллельно включенных в контур сопротивлений R_n и R_k к сопротивлениям $r_n = \omega^2 L_n^2 / R_n$ и $r_k = \omega^2 L_n^2 / R_k$, внесенных в контур



последовательно, а также вводя понятие добротности контура $Q = \omega L/r$, выражения (2) можно записать в виде

$$\overline{u_{\text{ш}}^2} = 4kQ_K^2(T_{\text{п}}r_{\text{п}} + T_0r_K)\Delta f, \quad (3)$$

где Q — добротность контура с внесенным «горячим» сопротивлением $R_{\text{п}}$ поверхностного слоя.

Преобразуя в дальнейшем выражение (3), получим формулу для определения температуры поверхности

$$T_{\text{п}} = T_0 \left[1 + \frac{(\overline{u_{\text{шг}}^2} - \overline{u_0^2})}{\overline{u_0^2}} \cdot \frac{Q_{\text{г}}}{(Q_K - Q_{\text{п}})} \right], \quad (4)$$

где Q_K — начальная добротность контура; $\overline{u_{\text{шг}}^2}$ — шумовой сигнал при горении образца; $\overline{u_0^2}$ — шумовой сигнал при $Q_{\text{п}}$ и T_0 .

Таким образом, измеряя тепловые шумы на выходе измерительного контура, связанного с термошумовым зондом, а также измеряя добротность контура, можно определить температуру поверхности горящего пороха.

На рисунке даны схематическое устройство термошумового зонда и блок-схема измерений температуры. В процессе горения прямоугольный образец пороха 1 подавался пружиной 4. При этом поверхность горения фиксировалась опорным электродом 2, изготовленным из вольфрамовой проволоки диаметром 200 мкм. Роль второго электрода выполняли двухсторонние пленочные электроды 3 из олова, нанесенные на большие боковые грани образца напылением в вакууме. Для обеспечения торцевого горения образец покрывался слоем парафина. Таким образом, при горении образца возникало шумящее сопротивление в виде проводящей поверхности, заключенной между двумя сгорающими пленочными электродами и одним проволочным электродом, расположенным между ними.

Шумящее сопротивление $R_{\text{п}}$ включалось в колебательный контур $L_K C_K R_K$. Шумовой сигнал на выходе измерительного контура усиливался широкополосным предусилителем 5 с коэффициентом усиления ~ 3 и поступал для дальнейшего усиления на селективный микровольтметр 6 типа В6-1. Усиление осуществлялось в полосе частот 10 кГц на частоте 20 МГц. С выхода микровольтметра сигнал подавался на квадратичный детектор 7, аппроксимирующий квадратичную характеристику с погрешностью $\sim 1\%$. В дальнейшем сигнал усиливался усилителем постоянного тока 8 и поступал на регистрирующий прибор (шлейфовый осциллограф) 9. Собственные шумы усилительного тракта перед измерениями компенсировались.

Измерения добротности контура проводились куметром 10 типа Е4-4. При этом в период измерения напряжения теплового шума анодное напряжение на генераторной лампе куметра включалось с помощью электронного ключа 11, управляемого мультивибратором с частотой 3 Гц. Напряжение сигнала, пропорциональное добротности измерительного контура, также регистрировалось шлейфовым осциллографом 9. В качестве индуктивности L_k использовался комплект катушек куметра Е4-4. Емкостью C_k служил переменный конденсатор куметра.

Выбор рабочей частоты шумового термометра обусловлен необходимостью устранения избыточных шумов, подчиняющихся закону $1/f$, и требованием высокой добротности измерительного контура.

Предварительно перед измерениями температуры поверхности был изучен вопрос о влиянии газовой фазы на результаты измерений температуры. Представляя пламя и поверхность горения в виде двух параллельно включенных сопротивлений при температурах соответственно T_r и T_n и выражая величины сопротивлений через геометрические размеры и удельную электропроводность, можно получить при равных объемных долях каждой фазы (в пределах поля датчика) выражение для эффективной шумовой температуры поверхности горения

$$T_{эфф} = (\sigma_n T_n + \sigma_r T_r) / (\sigma_n + \sigma_r), \quad (5)$$

где σ_n и σ_r — удельные электропроводности поверхности горения и газа, примыкающего к ней.

Коксование поверхностного слоя пороха при горении и сравнительно низкая температура газа, примыкающего к поверхности пороха, обуславливают превышение электропроводности к-фазы над электропроводностью газа на несколько порядков. Так, экспериментальное измерение электропроводности к-фазы пороха Н с помощью пленочных электродов дает $\sigma_n \approx 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$. Расчет электропроводности газа при 1500 К, минимальном потенциале ионизации 8 эВ, сечении соударений электронов 10^{-15} см^2 и давлении 40 атм приводит к $\sigma_r \sim 10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$.

С помощью выражения (5) и приведенных значений T_r , σ_n и σ_r можно оценить влияние газовой фазы на эффективную температуру поверхности. Анализ показывает, что эффективная температура совпадает с истинной температурой поверхности. Исследовались образцы пороха Н размером $7 \times 10 \times 100$ мм. Измерения температуры поверхности термшумовым методом проводились в приборе постоянного давления при 40 и 80 атм. При каждом давлении проведено 14 опытов.

При обработке результатов измерений получено, что при давлении 40 атм $T_n = 660 \text{ К}$, а при $p = 80$ атм $T_n = 650 \text{ К}$. Погрешность определения температуры составляла $\sim 5\%$.

Как видно из результатов опытов, величина T_n пороха Н при 40 атм совпадает с данными [2]. В то же время при повышении давления до 80 атм шумовая температура к-фазы не изменяется (в пределах ошибки эксперимента), что вызывает расхождение с результатами [2]. Таким образом, термшумовым методом эффект увеличения температуры поверхности баллиститного пороха Н с ростом давления не установлен. Однако полученные данные следует считать предварительными, и они нуждаются в дальнейшей проверке.

В заключение необходимо отметить, что применение термшумового метода позволит, по-видимому, получать дополнительную информацию о процессе горения конденсированных систем. При этом не исключается использование термопарного метода, отличающегося простотой.

Поступила в редакцию
19/VI 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ван-дер-Зил. Флуктуации в радиотехнике и физике. М.—Л., ГЭИ, 1958.
2. А. А. Зенин. ФГВ. 1966, 2, 3, 67.

ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ЭФФЕКТЫ ГОРЕНИЯ В ОДНОМЕРНЫХ ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ

Л. Ю. Артюх, Э. А. Закарин, В. П. Кашкаров,
С. М. Орлова

(Алма-Ата)

Неоднозначность стационарных состояний реагирующих систем и несовпадение условий воспламенения и потухания (гистерезис) изучались в камерах сгорания идеального смешения [1], в химических реакторах вытеснения [2], в точке торможения обтекаемого тела [3]. В настоящей работе приведены численные решения, относящиеся в основном к горению газа в ламинарном пограничном слое в одномерном приближении. Эти решения получены применительно к различным условиям тепло- и массообмена на границах и в широком интервале изменения параметров задачи. Особое внимание уделяется при этом малоизученному процессу — гистерезисному горению предварительно перемешанных газов. По этому вопросу известна только работа [4], относящаяся к горению встречных струй топлива и окислителя.

Тепломассообмен в ламинарном трехкомпонентном, реагирующем по закону Аррениуса однородном потоке на пластине в области, далекой от передней кромки (в которой можно пренебречь изменением толщины пограничного слоя), можно моделировать системой обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \rho v &= 1, \\ \bar{p} &= \rho \Theta M \operatorname{Re} \bar{E}, \\ \operatorname{Re} u' &= u'' + 2P/\rho M, \\ \Theta'' - \operatorname{Re} \Theta' + (\gamma - 1) M^2 \operatorname{Re}^{-1} (u')^2 + \tau C_T C_O \exp(-1/\Theta) &= 0, \\ C_T'' - \operatorname{Re} C_T' - \tau C_T C_O \exp(-1/\Theta) &= 0, \\ C_O'' - \operatorname{Re} C_O' - \alpha^{-1} \tau C_T C_O \exp(-1/\Theta) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь $\Theta = RT/E$ и u — безразмерные температура и продольная составляющая вектора скорости; C_T и C_O — удельные массовые концентрации топлива и окислителя. Комплексные $\operatorname{Re} = v_0 \delta_0 / a_0$, $M = u_0 / \sqrt{\gamma RT_0}$, $\operatorname{Re} = v_0 \delta_0 / \nu_0$, $P = -\delta^2 \frac{dP}{dx} / 2\mu_0 \sqrt{\gamma RT_0}$, $\tau = Q C_T R / EC_p$, $\tau = k_0 C_{O0} \delta_0^2 / \rho_0 a_0$, $\alpha = \sigma C_{O0} / C_{T0}$, $\bar{E} = \frac{E}{2u_0 v_0}$, в которых δ_0 — толщина пограничного слоя, v_0 — скорость вдува, u_0 — скорость невозмущенного потока, составлены при помощи масштабных величин, выбираемых в соответствии с конкретно поставленной