

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НА ИЗМЕРЯЕМУЮ ШУМОВУЮ ТЕМПЕРАТУРУ ПОВЕРХНОСТИ БАЛЛИСТИТНОГО ПОРОХА

В. М. Зенченко, Ю. С. Иващенко
(Красноярск)

В работе [1] предложен метод измерения температуры поверхности горения пороха по собственным тепловым электрическим шумам. Представляет интерес оценка влияния подповерхностных слоев пороха на измеряемую температуру поверхности, т. е. селективности измерений.

Примем распределение температуры в прогретом слое пороха в виде

$$T(x) = T_0 + (T_{\pi} - T_0)e^{x/\delta}, \quad (1)$$

где $x \leq 0$ — расстояние от поверхности горения; T_0 — начальная температура пороха; T_{π} — температура поверхности; $\delta = \kappa/u$ — толщина прогреваемого слоя; κ — коэффициент теплопроводности пороха; u — скорость горения.

Воспользуемся формулой усреднения шумовой температуры емкостным преобразователем [2]

$$T_{ш} = \frac{\int T(x) \Phi(x) dx}{\int \Phi(x) dx}, \quad (2)$$

где

$$\Phi(x) = \frac{\rho(x)}{1 + \omega^2 \epsilon_0^2 \epsilon^2 \rho^2(x)}; \quad (3)$$

ρ — удельное сопротивление; ω — круговая частота измерений; ϵ_0 — абсолютная диэлектрическая постоянная; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость пороха. Пределы интегрирования в выражении (2) определяются геометрией задачи. При условии, что измерения проводятся на характеристической частоте для поверхности горения, т. е. $\omega = 1/\epsilon_0 \epsilon \rho_{\pi}$, где ρ_{π} — удельное сопротивление поверхностного слоя, выражение (3) можно переписать в виде

$$\Phi(x) = \rho_{\pi} \frac{\rho(x)/\rho_{\pi}}{1 + [\rho(x)/\rho_{\pi}]^2}. \quad (4)$$

Тогда из (2) получим

$$T_{ш} = \frac{\int T(x) \frac{\rho(x)/\rho_{\pi}}{1 + [\rho(x)/\rho_{\pi}]^2} dx}{\int \frac{\rho(x)/\rho_{\pi}}{1 + [\rho(x)/\rho_{\pi}]^2} dx}. \quad (5)$$

Учитывая экспоненциальную зависимость удельного сопротивления вещества от температуры, имеем

$$\rho(x) = A e^{\frac{E}{kT(x)}} \quad (6)$$

и

$$\rho_{\pi} = A e^{\frac{E}{kT_{\pi}}}, \quad (7)$$

где E — энергия активации электропроводности пороха; k — постоянная Больцмана. Обозначив

$$z(x) = \frac{\rho(x)}{\rho_{\pi}} = \exp \left[\frac{E}{k} \left(\frac{1}{T(x)} - \frac{1}{T_{\pi}} \right) \right], \quad (8)$$

выражение (5) можно записать в виде

$$T_{ш} = \frac{\int_{-\infty}^{\lambda} T(x) \frac{z(x)}{1+z^2(x)} dx}{\int_{-\infty}^{\lambda} \frac{z(x)}{1+z^2(x)} dx} = \frac{\int_{-\infty}^0 T(x) \frac{z(x)}{1+z^2(x)} dx + \int_0^{\lambda} T_{п} \frac{1}{2} dx}{\int_{-\infty}^0 \frac{z(x)}{1+z^2(x)} dx + \int_0^{\lambda} \frac{1}{2} dx} =$$

$$= \frac{\int_{-\infty}^0 T(x) \frac{z(x)}{1+z^2(x)} dx + \frac{\lambda}{2} T_{п}}{\int_{-\infty}^0 \frac{z(x)}{1+z^2(x)} dx + \frac{\lambda}{2}}, \quad (9)$$

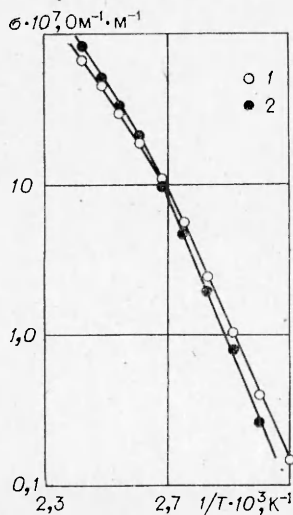
где $T(x)$ — задано выражением (1); λ — толщина реакционного слоя в k -фазе при $T_{п}$. В выражении (9) первое слагаемое представляет собой вклад в измеряемую шумовую температуру подповерхностных слоев, второе — реакционного слоя, для которого $z=1$. При этом предполагается, что температура слоя однородна и равна $T_{п}$.

Таким образом, располагая значениями энергии активации E , электропроводности σ и толщины прогретого слоя δ , задавая различными значениями толщины реакционного слоя λ при $T_{п}$, можно с помощью (9) рассчитать отклонение измеряемой шумовой температуры от действительной температуры поверхности горения пороха.

Энергия активации электропроводности пороха определялась опытным путем. Для этого измерялась зависимость электропроводности пороха от температуры. Испытывались образцы баллиститных порохов Н и Н+1% РbО размером $5 \times 15 \times 100$ мм с напыленными на них в вакууме пленочными электродами из олова. Образцы с нанесенными электродами зажимались между металлическими пластинами и помещались в термостат. Напыление промежуточных электродов из олова применялось для обеспечения плотного контакта измерительных электродов с поверхностью образцов. Для контроля температуры образцов на глубине 5 мм от поверхности помещались медьконстантановые термопары диаметром 0,1 мм. Температура измерялась с погрешностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

Измерения электропроводности проводились на частоте 20 Гц, а также разнополярными импульсами постоянного тока длительностью 0,5—1,0 с. Амплитуда измерительного напряжения составляла 10 В. При сопротивлении образцов < 30 МОм результаты измерений обоими методами совпадают. При сопротивлении, превышающем 30 МОм, начинает сказываться емкость образцов и соединительных проводов, что приводит к погрешности частотного метода.

На рис. 1 приведены зависимости электропроводности образцов порохов Н (1) и Н+1% РbО (2) от температуры. Энергия активации E электропроводности σ , определенная методом наименьших квадратов по зависимости $\sigma(1/T)$ в высокотемпературной области, составляет в обоих случаях 0,6 эВ. Рассчитанная с помощью зависимости $\sigma = \sigma_{п} \exp(-E/kT)$ при $T_{п} = 660$ К $\sigma_{п} = 1,4 \times 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Однако в действительности проводимость поверхности горения баллиститного пороха намного выше расчетной, полученной экстраполяцией электропроводности к температуре поверхности. Это связано с плавлением и коксованием (науглероживанием) поверхностного слоя при горении, что увеличивает вклад по-



верхности горения в электропроводность прогретого слоя и соответственно к уменьшению расчетной погрешности. Так, экспериментально измеренная электропроводность поверхности горения пороха Π составляет $\sigma_{\text{эф}} = 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ (при $T_{\text{п}} = 660 \text{ К}$).

Задаваясь градиентом температуры вблизи поверхности пороха 6 К/мкм [3], можно определить толщину прогретого слоя $\delta = (T_{\text{п}} - T_0) / (dT/dx)_{x=0}$. Принимая для баллиститного пороха $T_{\text{п}} = 660 \text{ К}$, $T_0 = 330 \text{ К}$, а также учитывая $\rho_{\text{эф}} = 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, с помощью выражений (1) и (9) можно рассчитать отклонение измеренной $T_{\text{ш}}$ от действительной $T_{\text{п}}$ при разной толщине λ реакционного слоя в к-фазе. Учитывая громоздкость выражения (9), расчеты проводили с помощью ЭВМ.

Расчет зависимости $\alpha = (T_{\text{п}} - T_{\text{ш}}) / T_{\text{п}}$ от толщины реакционного слоя λ по формуле (9) с учетом $z_{\text{эф}}(x) = \rho(x) / \rho_{\text{эф}}$ дал следующие результаты:

λ , мкм	2	5	10	20	40
α , %	1,4	0,6	0,3	0,16	0,07

Видно, что реальная погрешность измерения температуры меньше 1%.

Таким образом, измеряемая шумовая температура поверхности пороха практически не отличается от действительной из-за малого влияния подповерхностных слоев пороха. Последнее связано с их различием в электрофизических свойствах.

Поступила в редакцию 11/III 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. С. Иващенко, В. М. Зенченко. ФГВ, 1979, 15, 4, 19.
2. Ю. С. Иващенко, В. М. Зенченко. ФГВ, 1981, 17, 5, 127.
3. А. Сэбедэл, Д. Виноград, М. Саммерфилд. РТК, 1965, 3, 9, 16.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОРИОЛИСОВЫХ И ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ НА РАЗВИТИЕ ПОЛУОГРАНИЧЕННЫХ ХИМИЧЕСКИ РЕАГИРУЮЩИХ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ

В. К. Баев, М. А. Гороховский, С. Ю. Рыбаков
(Новосибирск, Алма-Ата)

1. Движение жидкости в поле кориолисовых и центробежных сил встречается во многих инженерных приложениях (рабочее колесо турбомашин, охлаждающие тракты турбинных лопаток и т. п.). При этом в ряде задач необходимо исследовать влияние кориолисовых и центробежных сил на процессы тепло- и массообмена в струйных турбулентных течениях.

Обзор литературы по вопросу влияния вращения на течение в турбомашинных дан в [1]. В теоретических работах [2, 3] в рамках параболической модели приведены расчеты течений во вращающихся каналах. Следует также отметить работу [4] по численному моделированию турбулентных следов за лопатками рабочего колеса турбомашин.

2. На рис. 1 приведена конфигурация анализируемого в настоящей работе течения. Из щели размером L_0 истекает плоская струя жидкости с некоторой скоростью U_0 и распространяется вдоль полубесконечной пластины, равномерно вращающейся с угловой скоростью Ω . Предполагается, что течение в струе стационарно и развивается во вращающемся совместно с пластиной пространстве. На этом же рисунке показано рас-