Laboratorio 4.

Transferencia de calor por convección natural en función de la presión ambiente

En esta práctica se propone estudiar la transferencia de calor por convección natural en aire. El método consiste en medir la tasa de enfriamiento (o calentamiento) de un cuerpo que se calienta a temperaturas mayores que la temperatura ambiente variando la presión entre presión ambiente y 10^{-7} atm. La tasa de enfriamiento está determinada por los cambios de energía interna del cuerpo y las pérdidas de energía por radiación y convección.
Las mediciones se realizan empleando una muestra que es iluminada con una lámpara de 35 W y se encuentra suspendida adiabáticamente en una cámara en la cual se puede realizar vacío que (ver figura 1)

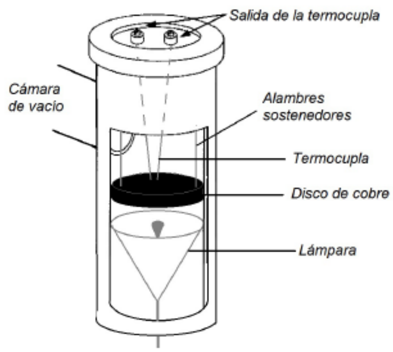

Figura 1: Esquema del dispositivo experimental

Se utiliza un disco de cobre. El disco se encuentra suspendido (sin ponerse en contacto con las paredes del recinto) mediante dos alambres y se conecta a una termocupla con conexión a un multímetro para registrar la temperatura en función del tiempo. El sistema de vacío está formado por una bomba difusora asistida por una bomba mecánica y posee un medidor de presión de rango completo.

Se puede calcular la transferenciade calor a la muestra debido a la absorción de luz incidente de potencia P_0 como

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = P_0 - P, \tag{1}$$

donde

$$P = R + K \tag{2}$$

representa las pérdidas por radiación (R) y convección (K), despreciando la conducción térmica a través de los soportes de la muestra y los cables de la termocupla. El primer término del lado derecho de esta ecuación se deriva de la ley de radiación de Stefan–Boltzmann, y para un cuerpo a temperatura $T = T_{\text{amb}} + \Delta T$ que se encuentra embebido en un medio a temperatura ambiente T_{amb}, puede escribirse como

$$R = A\varepsilon\sigma(T^4 - T_{amb}^4), \tag{3}$$

donde A es la superficie de la muestra, ε la emisividad (ε~1 si la muestra está pintada de negro)y σ la constante de Boltzmann. Si las variaciones de temperatura de la muestra es mucho menor que la temperatura ambiente (ΔT << T_{amb}), R puede aproximarse por

$$R \approx 4A\varepsilon\sigma T_{amb}^3 \Delta T, \tag{4}$$

realizando una expansión de Taylor. El término de convección K, se define por la ley experimental de enfriamiento de Newton

$$K = hA\,\Delta T, \tag{5}$$

donde h es un parámetro característico que depende del flujo del fluido cerca de la superficie de la muestra, de las propiedades del fluido y de la geometría de la muestra.
La variación de temperatura de la muestra puede obtenerse de

$$Q = \rho c V\,\Delta T, \tag{6}$$

donde V es el volumen de la muestra, c el calor específico y ρ la densidad de la muestra. Derivando (6) respecto al tiempo y sustituyendo en (1) se obtiene

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial t} + \frac{\gamma}{CV}\Delta T - \frac{P_0}{CV} = 0 \tag{7}$$

con

$$\gamma = A(4\sigma\varepsilon T_{amb}^3 + h). \tag{8}$$

La solución de esta ecuación diferencial, usando la condición inicial ΔT(0)=0, es

$$\Delta T_{\uparrow}(t) = \frac{P_0}{\gamma}\left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right], \tag{9}$$

donde

$$\tau = \frac{LC}{2(4\varepsilon\sigma T_{amb}^3 + h)} \tag{10}$$

y L el espesor de la muestra. La flecha en la ecuación (9) es para indicar que corresponde al calentamiento de la muestra. El tiempo característico τ puede reescribirse como

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_K}, \tag{11}$$

donde $\tau_R = LC/8\varepsilon\sigma T_{amb}^3$ es el tiempo de relajación debido a las pérdidas por radiación y $\tau_K = LC/2h$ es el debido a las pérdidas por convección.
Para pequeñas desviaciones respecto del equilibrio térmico, ΔT << T_{amb}, la inversa del tiempo total de relajación está dada por la suma de las inversas de los tiempos característicos de cada uno de los mecanismos de pérdidas.
La muestra alcanza una temperatura de equilibrio $T_e = P_0/\gamma$ para $P = P_0$. Luego, si la iluminación es interrumpida, se obtiene la siguiente expresión para la temperatura del cuerpo en función del tiempo:

$$\Delta T_{\downarrow} = \frac{T_e}{\gamma} exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \tag{12}$$

Si asumimos que en la cámara se alcanzó el vacío necesario para despreciar las pérdidas por convección, τ_K puede no ser tenido en cuenta en la ecuación (12) y pueden evaluarse las pérdidas por radiación.
Cabe notar que τ_R se obtuvo como el tiempo de relajación en ausencia de pérdidas por convección.
Una vez obtenido τ_R, y notando que su valor solo depende de la temperatura ambiente a la cual se realizó el experimento, a partir de las mediciones de τ para distintas presiones puede determinarse el valor de h para cada presión como

$$h = 4\varepsilon\sigma T_{amb}^{3}\left(\frac{\tau_R}{\tau} - 1\right). \tag{13}$$

Bibliografía

Maysam Saidi, Reza Hosseini Abardeh, Air Pressure Dependence of Natural-Convection Heat Transfer, Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Vol II, 2010, London, U.K.

E. Marn, O. Delgado-Vasallo, and H. Valiente, A temperature relaxation method for the measurement of the specific heat of solids at room temperature in student laboratorios, American Journal of Physics **71**, 1032 (2003); doi: 10.1119/1.1586261