



DETERMINACIÓN DE COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN NATURAL

OBJETIVO

Medir experimentalmente el coeficiente de transferencia de calor por convección natural para el caso de una superficie plana horizontal (superficie fría orientada hacia abajo), y determinar una correlación para el número de Nusselt en función del número de Rayleigh.

ANTECEDENTES

La convección natural (o convección libre) se presenta cuando un fluido se pone en contacto con una superficie (sólida o fluida) que se encuentra a una diferente temperatura, y la transferencia de calor crea diferencias de densidad que son las causantes del movimiento del fluido.

En el caso particular de esta práctica, un líquido se encuentra por debajo de la superficie sólida, y la temperatura del sólido es menor que la del líquido. Como resultado de la transferencia de calor (por conducción) del líquido al sólido, el líquido se enfría y se vuelve más denso, por lo que fluye hacia abajo y es remplazado por fluido caliente que proviene de más abajo.

La fuerza impulsora de esta transferencia convectiva, la diferencia de densidades debida a la diferencia de temperaturas, queda representada a través del número de Grashöff Gr . También es muy común emplear el número de Rayleigh Ra que es simplemente el producto del número de Grashöff y el número de Prandtl.

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)L^3}{\nu^2} \qquad Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)L^3}{\nu\alpha}$$

Para el caso de una placa plana, la longitud característica L generalmente se toma como la relación entre el área de la placa dividida entre su perímetro:

$$L = \frac{A}{P} \quad (\text{para placa plana solamente})$$

Finalmente, en muchos casos simples es posible utilizar una ecuación del tipo $\overline{Nu}_L = cRa_L^m$ donde c y m son parámetros que se ajustan (generalmente por regresión) para representar los datos experimentales. El número de Nusselt está dado por

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}L}{k}$$

donde L es la misma longitud característica empleada en los números de Grashöff y Rayleigh.



En el caso particular de esta práctica, **la superficie sólida será un disco de hielo**, que se colocará cuidadosamente en un recipiente con agua. El calor que se transfiere del agua al hielo causa que éste se derrita. La cantidad de calor transferido se puede determinar a partir de la diferencia de pesos del disco antes y después de colocarse en el agua. Este procedimiento se repite para diferentes temperaturas del agua, para poder encontrar la correlación buscada entre el número de Nusselt y el número de Rayleigh.

EQUIPO Y REACTIVOS

(lista no necesariamente exhaustiva)

- Un recipiente grande (vaso de precipitados por ejemplo)
- Parrilla eléctrica y vaso de precipitados para calentar agua
- Balanza de precisión
- Termómetro
- Cronómetro

- Discos de hielo
- Agua

RIESGOS ADICIONALES DE SEGURIDAD

Ninguno en particular.

MANEJO DE RESIDUOS

No se generan residuos peligrosos.

PROCEDIMIENTO

1. Disponer de un recipiente grande (vaso de precipitados de gran capacidad por ejemplo) con agua a aproximadamente 10°C. Dejar reposar el agua por dos minutos para que deje de moverse.
2. Medir la temperatura exacta del agua.
3. Tomar uno de los discos de hielo y pesarlo. Registrar este peso.
4. Pronto pero cuidadosamente, colocar el disco en el agua, procurando perturbar el agua lo menos posible. Iniciar el cronómetro.
5. Dejar el disco en el agua durante cierto tiempo. No hay un tiempo predefinido, leer las recomendaciones en la siguiente sección.
6. Sacar el disco del agua y al mismo tiempo detener el cronómetro.
7. Rápidamente pesar de nuevo el disco.
8. Repetir desde el paso 1, con agua a aproximadamente 20, 30, 40, 50 y 60°C. Tomar en cuenta que entre mayor sea la temperatura del agua, menor deberá ser el tiempo de permanencia del disco en el agua.



SUGERENCIAS PARA EL ÉXITO DE LA PRÁCTICA

- Aún cuando se piden 6 datos experimentales como mínimo, es conveniente que se fabriquen más de 6 discos de hielo, tomando en cuenta la necesidad de pruebas preliminares y la posibilidad de accidentes y errores. También es normal que este tipo de experimentos se realice con varias réplicas, es decir, se lleva a cabo el experimento varias veces bajo las mismas condiciones experimentales.
- Ya que se desea representar una placa plana, el disco de hielo debería ser lo más ancho posible comparado con su altura, de tal forma que la transferencia de calor en el área lateral del disco sea despreciable comparada con la transferencia en la parte plana inferior del disco.
- El agua normalmente contiene aire disuelto, pero el hielo puede contener muy poco aire disuelto debido a su estructura cristalina. Por eso al congelar el agua aparecen burbujas. Estas burbujas causan que el disco no sea homogéneo y por lo tanto se derrita más rápido en algunas áreas. Para evitar la formación de burbujas, hervir el agua antes de congelarla (para expulsar la mayor parte del aire disuelto). Otra alternativa es congelarla, descongelarla para liberar el aire, y volverla a congelar. En cualquier caso, evitar que se agite el agua una vez libre de aire, ya que éste se disuelve rápidamente en el agua.
- Entre mayor sea el recipiente en el que se contenga el agua para realizar el experimento, será más fácil garantizar que la temperatura del agua se mantenga constante.
- Es muy importante esperar uno o dos minutos para que el agua esté en reposo antes de colocar el disco de hielo. Si no es así, el movimiento que ya tenga el agua crea convección forzada que va a causar un valor de h más alto de lo debido.
- El tiempo que cada disco permanece en el agua no es fijo de antemano. Entre más tiempo permanezca el disco, menor será el efecto de una posible convección forzada al inicio, mayor será la diferencia de pesos del disco, y por lo tanto el valor medido de h será más exacto. Sin embargo, al irse derritiendo el disco, cambia su diámetro y por lo tanto cambia el valor de la longitud característica L , lo que indicaría que es mejor que el disco permanezca menos tiempo. El tiempo "adecuado" representa un compromiso entre estos dos efectos.
- Ya que el diámetro del disco puede cambiar al irse derritiendo, es más conveniente estimar la longitud característica L usando un promedio entre el tamaño inicial y el tamaño final del disco (siempre y cuando no haya cambiado demasiado).

CÁLCULOS Y OBSERVACIONES

Para cada repetición, calcular la rapidez de transferencia de calor Q a partir de la diferencia de peso del disco y del tiempo que permaneció en el agua (recordar que todo el calor transferido tiene el efecto de derretir hielo). A partir de la ley de enfriamiento de Newton, se puede determinar el valor del coeficiente de transferencia de calor \bar{h} (la barra indica que es h promedio para toda la placa).

$$Q = \bar{h}A(T_{\infty} - T_0)$$

donde T_{∞} y T_0 representan las temperaturas del agua y del hielo, respectivamente. Nótese el cambio en la diferencia de temperaturas para que Q sea una cantidad positiva.



A partir del valor calculado de \bar{h} se puede determinar el correspondiente número de Nusselt \bar{Nu}_L . Por otro lado, el número de Rayleigh depende únicamente de la diferencia de temperaturas y de las propiedades del fluido.

NOTA: Todas las propiedades del fluido deberán determinarse a la temperatura promedio de la película, es decir $T_f = (T_0 + T_\infty)/2$

Reportar los resultados experimentales en una tabla como la siguiente:

	EXPERIMENTO					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura del agua T_∞ [°C]						
Diámetro inicial del disco [m]						
Diámetro final del disco [m]						
Masa inicial del disco [kg]						
Masa final del disco [kg]						
Tiempo [s]						

En otra tabla similar, reportar la temperatura promedio de película y los valores de todas las propiedades físicas del agua que se necesiten para calcular los números adimensionales. Reportar también Q , h , y el valor de los números de Nusselt y Rayleigh para cada experimento.

Obtener por regresión lineal (ver más abajo), los valores de las constantes c y m que mejor ajusten la ecuación $\bar{Nu}_L = cRa_L^m$ a los datos experimentales.

Finalmente, generar una gráfica de los datos experimentales de \bar{Nu}_L contra Ra_L (representados con símbolos) donde se incluya también la ecuación obtenida mediante regresión de los datos experimentales, así como la correlación recomendada en los apuntes proporcionados en clase para el caso de una placa plana horizontal con la superficie fría hacia abajo. En base a la gráfica, comentar sobre la concordancia entre los datos experimentales y ambas correlaciones. Comentar también sobre las posibles causas de error.

ANEXO: ANÁLISIS DE REGRESIÓN

Si se asume que el número de Nusselt se relaciona con el número de Rayleigh mediante una ecuación del tipo $\bar{Nu}_L = cRa_L^m$, ésta ecuación se puede linealizar aplicando logaritmos para obtener:

$$\ln(\bar{Nu}_L) = \ln(c) + m \ln(Ra_L) \quad \text{equivalente a} \quad y = a + bx$$