

Determinación experimental del coeficiente de transferencia de calor por convección natural en tubos inclinados

Experimental analysis of natural convection coefficient inside inclined tubes

M. Avila M.*, C. Torres M., M. Sandoval y C. Valecillos
Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, ULA,
Mérida 5101, Venezuela
*amanuel@ing.ula.ve

Resumen

El presente trabajo comprende el estudio experimental del fenómeno de convección natural en el interior de tubos verticales e inclinados, en varias relaciones de tamaño (radio/longitud), sometidos a un flujo externo de calor uniforme. El aparato experimental comprende tubos de diferentes tamaños, en los cuales se induce la circulación natural mediante el calentamiento controlado de una resistencia eléctrica enrollada en su superficie exterior. Los resultados se presentan en forma gráfica en términos de relaciones entre los parámetros adimensionales de Nusselt y de Rayleigh con sus propiedades termofísicas evaluadas a la temperatura media del fluido en el tubo. Estos resultados permiten confirmar la tendencia asintótica superior del parámetro de Rayleigh ($Ra \rightarrow \infty$) y la correlación intermedia ($10 < Ra < 1000$) propuesta por un investigador anterior, para todas las relaciones de tamaño y para tubos verticales, y también para tubos con amplio grado de inclinación respecto de la vertical. No se obtuvieron valores experimentales en el rango asintótico inferior ($Ra \rightarrow 0$), pero se observa cierta tendencia afirmativa de comprobación. No se presentan marcadas diferencias para diferentes relaciones de tamaño ni para las diferentes inclinaciones ensayadas.

Palabras Claves: Convección, natural, tubos inclinados.

Abstract

An experimental analysis is made on internal natural convection coefficient as induced by uniform heat flux in vertical and inclined tubes of several length/radius ratios. Test fluid is water and heating is produced by an externally wound resistor wire. Results are shown as Nusselt vs. Rayleigh graphs with water properties evaluated at mean bulk temperature. Results agree with upper Ra theoretical asymptotic tendency ($Ra \rightarrow \infty$) and with previous works in the middle range ($10 < Ra < 1000$). No experimental points were obtained in the lower range. Results do not show noticeable differences for different size ratios nor for different inclinations.

Key words: Convection, natural, inclined tubes.

1 Introducción

En este trabajo se trata de probar o proponer las correlaciones de convección natural del tipo "Nu vs Ra" que pueden servir para modelar flujo laminar interno en tuberías verticales e inclinadas, particularmente de interés para aplicaciones relacionadas con colectores de energía solar y reactores nucleares de agua presurizada.

Como punto de partida se cuenta con los trabajos de Dyer (1975), de Materano y Pineda (1996), realizados en tubos verticales, y con el trabajo experimental de Sandoval y Valecillos (1998) realizado en tubos de varias inclinaciones. Este trabajo es prácticamente una modificación en la presentación del proyecto de grado de Sandoval y Valecillos, mediante la cual se obtiene una forma simplificada de la correlación propuesta.

Mención especial merece el trabajo precursor de J. R. Dyer (et al) en convección natural en tubos verticales. En primer término, en este trabajo Dyer presenta una extensa revisión bibliográfica del tema. En segundo término, Dyer propone y resuelve un modelo numérico del fenómeno, en un rango amplio de números de Prandtl, presentando sus resultados en forma gráfica. También en este trabajo Dyer deduce analíticamente las ecuaciones (1) y (2) para las tendencias asintóticas extremas de la correlación "Nu vs Ra".

$$Nu = \sqrt{Ra/8} \quad \text{para } Ra \rightarrow 0 \quad (1)$$

$$Nu = 0.67 * \sqrt[5]{Ra} \quad \text{para } Ra \rightarrow \infty \quad (2)$$

En la Fig. 1 se presentan los resultados analíticos (tendencias asintóticas) y los resultados del modelo numérico y la convalidación experimental de Dyer en tubos verticales. A este respecto es oportuno indicar que en la presentación de los resultados experimentales, Dyer emplea valores de propiedades termofísicas calculados a la temperatura de ingreso del fluido de trabajo (aire atmosférico en su caso).

En el trabajo de Materano y Pineda (1997) se comprueba aproximadamente la correlación de Dyer, para tubos verticales. En este trabajo, siguiendo la pauta de Dyer, también se evaluaron las propiedades del fluido a la temperatura de entrada.

En el proyecto de Sandoval y Valecillos (1998), se experimentó con tubos verticales e inclinados y se presentaron sus resultados con las propiedades termofísicas calculadas a la misma temperatura de referencia del trabajo de Dyer y en él se observa una importantes diferencias con la correlación de Dyer, específicamente notándose una marcada influencia de la relación radio/longitud para tubos verticales. También en este trabajo se denota una marcada separación en la medida en que aumenta en grado de inclinación del tubo respecto a la vertical.

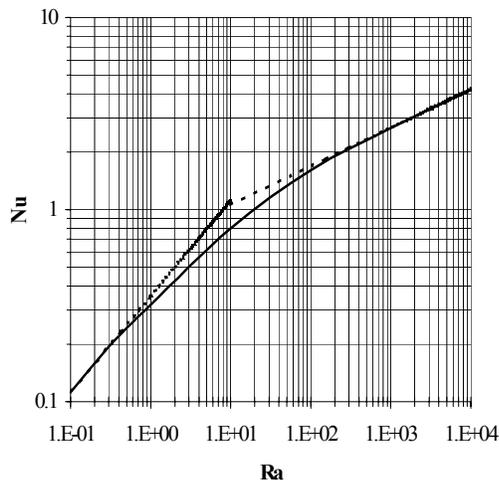


Fig. 1. Correlación de Dyer (Nu vs Ra)

2 Aparato Experimental

En la Fig. 2. se muestra un esquema del montaje, instrumentación y nomenclatura del aparato experimental empleado. La sección de prueba está conformada por tubos de cobre de dimensiones:

3/8"DN R = 3.55 mm L = 90 cm (R/L = 3.94E-3)

1/2"DN R = 5.24 mm L = 85 cm (R/L = 6.16E-3)

5/8"DN R = 6.80 mm L = 87 cm (R/L = 7.82E-3)

Cada uno de los tubos se inclina los ángulos:

$\theta = 0^\circ$ (vertical), 20° , 45° y 70°

El agua (fluido de trabajo) se alimenta a un nivel constante mediante un vertedero de rebose y su circulación se induce por calentamiento con una resistencia eléctrica enrollada externamente. Se suministran diferentes potencias eléctricas con una fuente ajustable.

Mediante termopares tipo J se midieron las siguientes temperaturas debidamente estabilizadas:

T_e = Temperatura de entrada

T_s = Temperatura de salida

T_p = Temperatura de pared

El caudal (m) se determina por medición del tiempo necesario para recolectar un litro de agua en una bureta graduada.

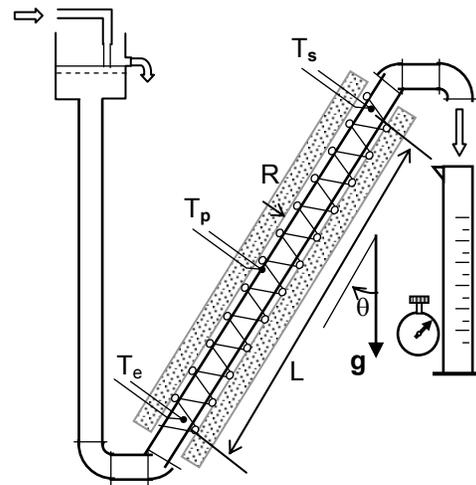


Fig. 2. Aparato y nomenclatura.

3 Nomenclatura

c , calor específico

g , aceleración de gravedad

h , coeficiente de convección ($Q/2\pi RL\Delta T$)

k , conductividad térmica

Nu , número de Nusselt (hR/k)

Pr , número de Prandtl

Q , flujo de calor [$mc(T_e - T_s)$]

Ra , número de Rayleigh ($g\beta\Delta TR^4 Pr/Lv^2$)

T_b , temperatura media del fluido ($(T_e + T_p)/2$)

- T_f , temperatura de película $(T_b + T_p)/2$
- T_{ref} , temperatura de referencia (T_b , T_e o T_f)
- β , coeficiente de expansión térmica
- ρ , densidad
- ν , viscosidad cinemática
- ΔT , diferencia convectiva de temperatura $(T_p - T_{ref})$

4 Procedimiento de Cálculo

Tanto en el trabajo de Sandoval y Valecillos como en el presente trabajo, la evaluación de los parámetros adimensionales de Nusselt y de Rayleigh se realiza con las definiciones especificadas en la sección anterior según la tradición europea del trabajo de Dyer. El coeficiente de convección se evalúa a partir del cambio de entalpía del agua. Las propiedades termofísicas β , ν , k y Pr y la diferencia convectiva de temperatura (ΔT) se calculan a una temperatura de referencia (T_{ref}). Las propiedades c y ρ se calculan a la temperatura media del agua en la sección de prueba (L).

En los trabajos anteriores de Dyer y Sandoval, las propiedades β , ν , k y Pr y la diferencia de temperatura convectiva se evalúan con la temperatura de entrada como referencia (T_e); esto hace que los resultados de Sandoval muestren una marcada diferencia respecto a los de Dyer, no solo en tubos inclinados sino en los tubos verticales; esta divergencia aumenta cuando se reduce la relación de tamaño R/L . Además se observa una desviación inexplicable para la tendencia teórica asintótica $Ra \rightarrow 0$. Todo esto se ilustra en la Fig. 3.

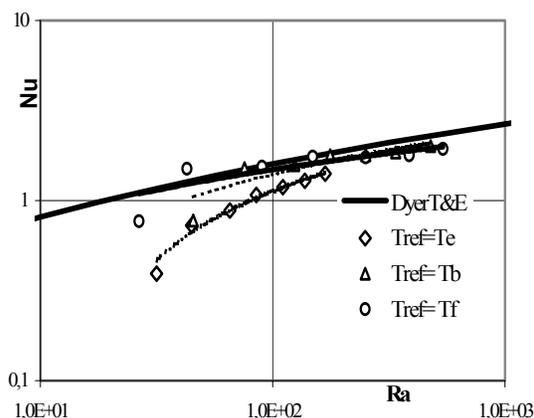


Fig. 3. Nu vs Ra para tubo vertical con $R/L=3.94E-3$. Influencia de la temperatura de referencia de las propiedades

Por estas razones, principalmente la última, se decidió modificar el procesamiento de los datos básicos de la experimentación en busca de series de puntos de mejor correlación con las curvas teóricas de Dyer y para ello se ensayó con la temperatura media (T_b) y con la temperatura de película (T_p) de frecuente uso en convección. En la Fig. 4 se muestran series comparativas para indicar como estas referencias producen mejor correlación con las curvas de Dyer

que T_e . Finalmente, se eligió T_b como temperatura de referencia por ser de mayor tradición en flujo interno.

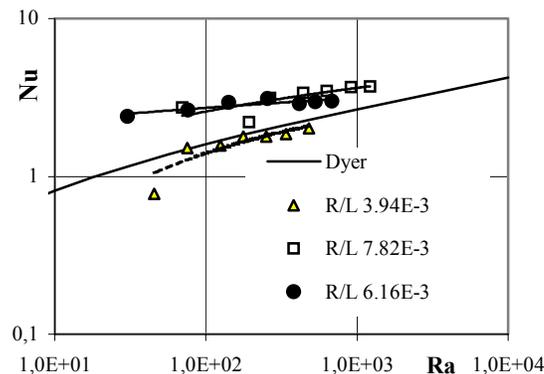


Fig. 4. Nu vs Ra para tubos verticales (inclinación 0°) y varios R/L , $T_{ref}=T_b$.

5 Resultados

En las Fig. 5, 6 y 7 se presentan las series de datos procesados para la correlación Nu vs Ra, en las tres relaciones de tamaño de tubos ensayados y con inclinaciones θ de 20° , 45° y 70° , con relación a la correlación de Dyer de tubos verticales.

En estas figuras se muestran los puntos experimentales y una línea de tendencia logarítmica para cada uno de los tamaños R/L ensayados.

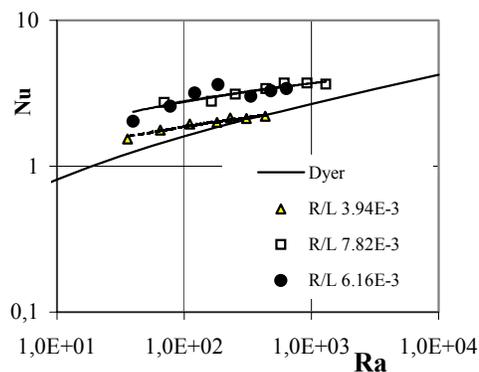


Fig. 5. Nu vs Ra para tubos inclinados 20° y varios R/L y $T_{ref}=T_b$

6 Conclusiones

Primero, puede observarse que todos los puntos presentan un agrupamiento alrededor de la línea de referencia, con tendencia a estar por encima de la curva de Dyer; esta tendencia es mayor en los tamaños de menor R/L .

Segundo, el agrupamiento de los puntos es similar, sin importar mucho el ángulo de inclinación de los tubos. Esto quizás pueda deberse a la escala logarítmica de las ordenadas (en los resultados tabulados si se observan diferencias) y a las limitaciones en los tamaños ensayados.

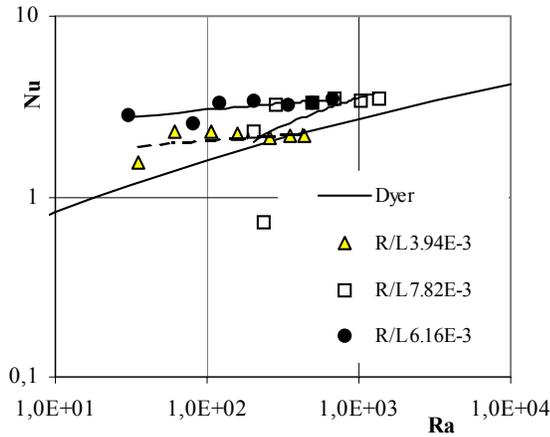


Fig. 6. Nu vs Ra para tubos inclinados 45° y varios R/L; y $T_{ref} = T_b$

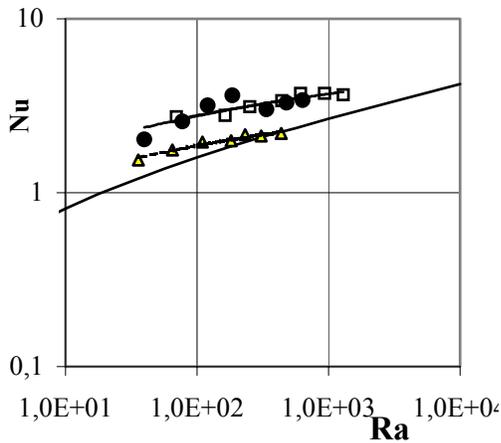


Fig. 7. Nu vs Ra para tubos inclinados 70° y varios R/L; y $T_{ref} = T_b$

Los resultados obtenidos tan solo cubren el rango medio del número de Rayleigh ($1E+1 < Ra < 1E+3$), aunque se observan tendencias rudimentarias, paralelas a las asíntotas de Dyer. Convendría realizar pruebas más extensas fuera de este rango, aunque se pueden anticipar dificultades de medición de pequeñas diferencias de temperatura en el rango inferior y dificultades de aislamiento eléctrico y térmico en el rango superior de calentamiento. En general la experimentación en este fenómeno es relativamente fácil de controlar y solo se advierten algunos problemas para estabilizar la temperatura de ingreso del fluido.

Aparte de mejorar y ampliar la cobertura de los ensayos realizados, en términos de mayores rangos de tamaño (R/L) y flujos de calor, se sugiere otra línea de acción en dirección a experimentar con el calentamiento parcial (un solo costado) de los tubos para simular mejor el calentamiento radiante de los colectores solares.

Referencias

- Dyer, J. R, 1975, "The development of laminar natural convective flow in a vertical uniform heat flux duct", *Int. J. Heat & Mass Transfer*, Vol. 18, pp. 1455-1465.
- Materano R. y Pineda G., 1996, "Determinación experimental del coeficiente de transferencia de calor por convección natural en tuberías verticales con flujo de calor uniforme", Proyecto de grado, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Sandoval M. y Valecillos J., 1998, "Determinación experimental del coeficiente de transferencia de calor por convección natural en tubos inclinados", Proyecto de grado, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.