

Evaluación de la Mejora de la Transmisión de Calor Obtenida Mediante Tubos Deformados Mecánicamente

Pedro G. Vicente (1), Alberto García (2), Antonio Viedma (3)

(1) *División de Máquinas y Motores Térmicos, Universidad Miguel Hernández Avda. del Ferrocarril s/n, 03202, Elche. Tel: 966658561. E-mail pedro.vicente@umh.es*

(2) y (3) *Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos, U. Pol. de Cartagena c/ Doctor Fleming s/n, 30202, Cartagena. E-mail alberto.garcia@upct.es*

Resumen

Se ha realizado un estudio experimental de la transmisión de calor y la pérdida de presión en tubos deformados mecánicamente de dos tipos: tubos corrugados en espiral y tubos con abolladuras en espiral. El estudio se realiza en sendas familias de tubos ensayando 10 tubos de cada tipo con el objeto de establecer la influencia de la rugosidad en la mejora de la transmisión de calor. Empleando agua y etilenglicol como fluidos de ensayo se han cubierto rangos muy amplios de condiciones de flujo: números de Reynolds entre 200 y 100.000 y números de Prandtl entre 2 y 100.

Los datos experimentales se han correlacionado obteniendo expresiones sencillas del factor de fricción de Fanning y número de Nusselt en función de las variables adimensionales del flujo y de la geometría. El objetivo final es obtener la geometría más óptima en función de las condiciones de flujo, es decir, la geometría donde el aumento de la transferencia de calor compense al máximo las pérdidas de presión.

Palabras Clave: Transferencia de calor, intercambiadores de calor.

1. Introducción

Se denomina técnica de mejora a cualquier sistema activo o pasivo instalado en un intercambiador de calor con la finalidad de producir un aumento de la transferencia térmica. Las técnicas de mejora pasivas aumentan la transferencia de calor mediante:

1. El aumento del área de intercambio de calor (Ej. aleteados internos o externos).
2. El aumento del coeficiente de transmisión de calor (Ej. superficies rugosas o dispositivos insertados en el flujo).
3. Una combinación de ambas (Ej. aleteados con deformaciones).

Las técnicas de mejora basadas en el aumento del área de intercambio están comúnmente aceptadas y se emplean rutinariamente en multitud de aplicaciones. Este trabajo se centra en el estudio de técnicas de mejora basadas en el aumento del coeficiente de transferencia de calor. Para flujo monofásico en régimen turbulento las

técnicas de mejora más eficientes son las diseñadas para perturbar el flujo únicamente en la capa límite; por ejemplo rugosidad artificial superficial.

Los métodos de rugosidad artificial en el lado tubo se clasifican en: rugosidad bidimensional (aleteados transversales y helicoidales, corrugación helicoidal y muelles) y rugosidad tridimensional (rugosidad en granos de arena, rugosidad de partículas adheridas y abolladuras en espiral). En este trabajo se ha estudiado la mejora en la transferencia de calor obtenida mediante tubos con rugosidad artificial fabricados por deformación en frío mediante rodadura: tubos corrugados, y tubos con abolladuras en espiral (Figura 1).

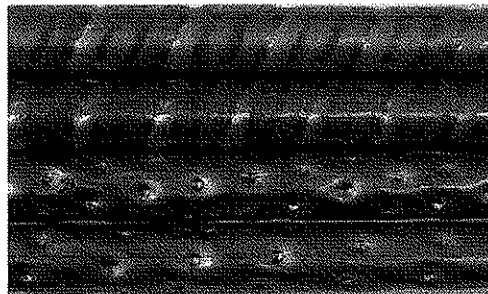


Figura 1. Tubos corrugados y con abolladuras en espiral.

2. Criterios de Evaluación de la mejora

Las técnicas de mejora incrementan la transferencia de calor y masa pero producen un aumento no deseado de la pérdida de presión y de la potencia de bombeo. Se hace necesario emplear algún criterio de evaluación para determinar cuantitativamente la mejora real conseguida. La caracterización de las dos familias de tubos realizada en este trabajo ha permitido determinar expresiones de la pérdida de presión y la transferencia de calor en estos tubos. Conocido el comportamiento termo-hidráulico de los tubos deformados, se pueden evaluar los beneficios reales obtenidos al emplear los mismos.

Los criterios de evaluación de la mejora más empleados en la literatura, son los propuestos por Bergles et al. [1974] y por Webb [1981]. Se trata de criterios de evaluación donde se fijan unas funciones objetivos a optimizar bajo ciertas restricciones.

Las funciones objetivo son las siguientes: (1) reducir el tamaño del equipo, (2) aumentar el calor total intercambiado o (3) reducir la potencia de bombeo.

Las funciones objetivo deben obtenerse bajo ciertas restricciones que consisten en mantener constante una o varias de las siguientes variables: (1) tamaño del equipo, (2) caudal de producto, (3) pérdida de presión, (4) potencia de bombeo y/o (5) calor total transferido.

En lo sucesivo se van a seguir los criterios de evaluación de la mejora propuestos por Bergles et al. [1974]. Se trata de criterios de evaluación simplificados que proporcionan una aproximación cuantitativa de los beneficios de las técnicas de mejora. Las simplificaciones son las siguientes:

1. Se supone que el coeficiente de transmisión de calor interior es de orden inferior al exterior y a la resistividad térmica del tubo.
2. No se consideran factores de ensuciamiento.
3. No se tiene en cuenta la variación en el salto térmico que se produce al mejorar la transferencia de calor.

Además de estas simplificaciones, se va a suponer que el diámetro característico de los tubos mejorados es el mismo que el del tubo liso. Siguiendo la recomendación de Marnier et al. [1983] todos los números adimensionales se evalúan al diámetro interior máximo. En tubos con rugosidad artificial mediante deformación plástica se toma el diámetro del tubo liso previo a la deformación.

De los diferentes criterios de evaluación propuestos por Bergles et al. [1974], se han calculado los siguientes:

1. Criterio R1: Aumento de la transferencia de calor para el mismo gasto másico y área de intercambio.
2. Criterio R3: Aumento de la transferencia de calor para la misma potencia de bombeo y superficie de intercambio.
3. Criterio R5: Reducción del área de intercambio para la misma potencia de bombeo y calor total intercambiado.

3. Resultados Experimentales

Se ha realizado un amplio estudio experimental en dos familias de tubos deformados mecánicamente: corrugados y con abolladuras, determinándose las siguientes expresiones para el factor de fricción de Fanning y para el número de Nusselt:

Tubos deformados mediante abolladuras:

$$f_a = 5,52 (h/d)^{1,67} (d^2/pl)^{0,26} \text{Re}^{-0,19}$$

$$\text{Nu}_a = 1,07 (h/d)^{0,69} (d^2/pl)^{0,12} (\text{Re}-1000)^{0,63} \text{Pr}^{0,4}$$

siendo h la profundidad de las abolladuras, p el paso de la espiral de abolladuras, l la distancia entre abolladuras y (d^2/pl) la densidad de abolladuras.

Tubos corrugados en espiral

$$f_a = 1,53 (\phi)^{0,46} \text{Re}^{-0,16}$$

$$\text{Nu}_a = 0,374 (\phi)^{0,25} (\text{Re}-1500)^{0,74} \text{Pr}^{0,44}$$

donde $\phi = h^2/pd$ es el índice de severidad, siendo h la profundidad de la huella y p el paso de la espiral.

El detalle de la instalación de medida y el procedimiento seguido puede verse con en el trabajo de los autores Vicente et al. [2002].

4. Criterios de evaluación de la mejora

4.1 Criterio de mejora R1

Se trata de un parámetro que muestra el aumento de la transmisión de calor obtenido cuando el haz de tubos lisos de un intercambiador se reemplaza por un haz de tubos mejorados manteniéndose constante el gasto másico. Este cambio produce un aumento de la potencia de bombeo; aumentan los costes de explotación, y por lo general se debe cambiar la bomba de impulsión.

Este criterio R1 es directamente el aumento del número del número de Nusselt respecto al tubo liso, resultando:

Tubos deformados mediante abolladuras: $R1 = 64,1 (h/d)^{0,69} (d^2/pl)^{0,12} (Re-1000)^{-0,21}$.

Tubos corrugados en espiral: $R1 = 10,9 (\phi)^{0,25} (Re-1500)^{-0,04} Pr^{0,07}$.

4.2 Criterio de mejora R3

Este criterio de evaluación proporciona el aumento de la transferencia de calor producido cuando los tubos lisos se cambian por tubos corrugados manteniendo constante la potencia de bombeo. Para mantener constante la potencia de bombeo se debe cumplir la siguiente relación: $f_a Re_a^3 = f_o Re_o^3$. El criterio de evaluación de la mejora R3 se calcula mediante $R3 = Nu_a / Nu_o$, donde Nu_a se calcula a Re_a y Nu_o se calcula al número de Reynolds equivalente liso Re_o . (Figura 2 izquierda)

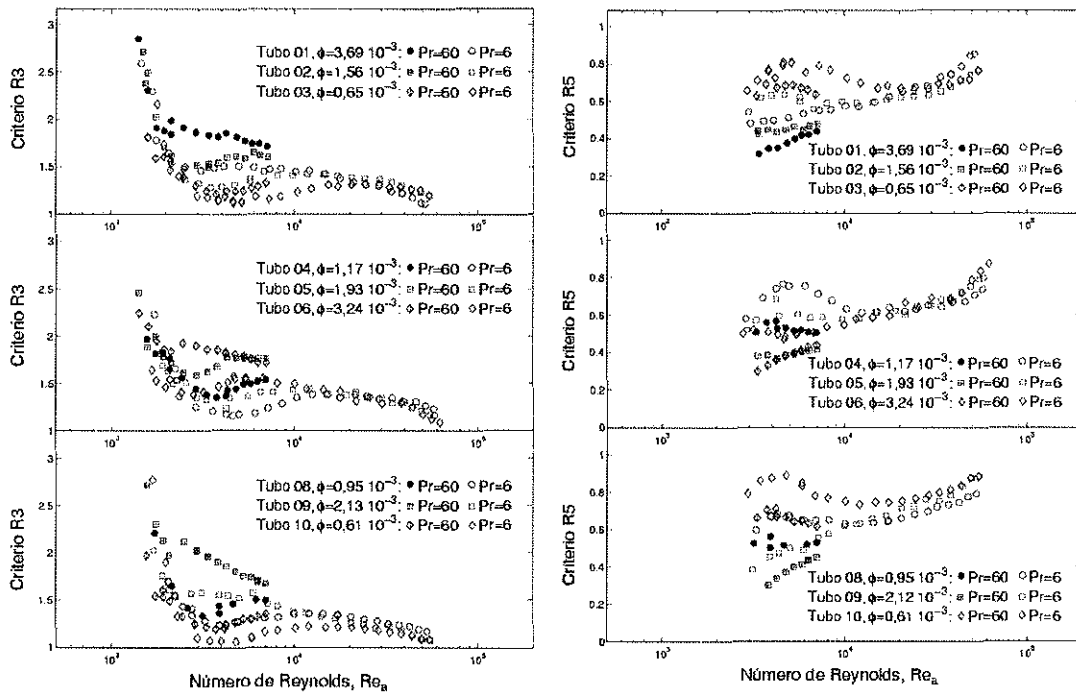


Figura 2. Criterios de Evaluación de la mejora R3 y R5 para números de Prandtl de 6 y 60.

Familia de tubos corrugados en régimen turbulento

La figura muestra que para tubos corrugados resulta de interés emplear tubos de rugosidad intermedia $\phi \cong 1-2 \cdot 10^{-3}$ para la región de números de Reynolds entre 10,000 y 40,000 ($R3 \cong 1,4$). A bajos números de Reynolds los números de mayor interés son los de mayor rugosidad $\phi \cong 3 \cdot 10^{-3}$, obteniéndose mejoras del 100% ($R3=2$). Los tubos con abolladuras (no mostrados) ofrecen menores mejoras de la transferencia de calor.

4.2 Criterio de mejora R5

Este parámetro estima la reducción de la superficie de un intercambiador de calor que se obtiene si en el diseño del mismo se emplean tubos corrugados en lugar de tubos lisos. Esta reducción de la superficie se determina para una misma potencia de bombeo y calor intercambiado.

En este caso la geometría es variable, el diámetro de los tubos se supone constante, y la reducción de la superficie puede obtenerse reduciendo el número de tubos y/o la longitud de los mismos. El número de Reynolds equivalente liso Re_o se obtiene mediante: $f_a Re_a^3 / Nu_a = f_o Re_o^3 / Nu_o$, donde el factor de fricción f_o y Nu_o se calculan para el tubo liso a Re_o .

Al igual que se concluyó anteriormente con el criterio R3, la figura 2 (derecha) muestra la conveniencia de emplear tubos corrugados de rugosidad intermedia $\phi \cong 1-2 \times 10^{-3}$ para la región de números de Reynolds entre 10,000 y 40,000. Aquí la reducción del área requerida el del 30-40%, es decir, el área requerida por un intercambiador de tubos corrugados sería un 60-70% de la necesaria para un intercambiador de tubos lisos.

5. Referencias

1. A. E. Bergles, A. R. Blumenkantz, J. Taborek, *Proceedings of the 5th Int. Heat Transfer Conference*, Tokyo, (1974).
2. W. J. Marner, A. E. Bergles, J. M. Chenoweth, *JHT*, Vol. 105 (1983) 358.
3. R. L. Webb, *IJHMT*, Vol. 24 (1981) 715.
4. P. G. Vicente, A. García, A. Viedma, *IJHMT*, Vol. 45 (2002) 543.

6. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por la Dirección General de Enseñanza Superior e Investigación Científica a través del proyecto de investigación CICYT-FEDER 1FD1997-0211 y la empresa HRS Spiratube de Murcia.