

Transferencia de calor incrementada en espacios anulares con elementos helicoidales insertados

Review of augmentation techniques for heat transfer coefficient in annular spaces using helical elements

Josué Imbert-González^I, Octavio García-Valladares^{II}, A. Viedma^{III}, Reinaldo Guillen-Gordín^I.

I. Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Mecánica, Santiago de Cuba, Cuba

Correo electrónico: imbert@fim.uo.edu.cu

II. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Energías Renovables. Morelos, México

III. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena, España.

Recibido: 17 de marzo de 2014 Aceptado: 4 de agosto de 2014

Resumen

La transferencia de calor incrementada por métodos pasivos se emplea en diversos intercambiadores de calor de alta efectividad. El objetivo del trabajo presentado fue la evaluación del estado de las investigaciones en el campo de la transferencia de calor mejorada en espacios anulares, a partir del empleo de elementos turbulizadores helicoidales como técnicas pasivas. La revisión se centró en el empleo de láminas helicoidales y espirales, la obtención de ecuaciones de correlación del coeficiente de transferencia de calor incrementado, el coeficiente de fricción y la evaluación que se realiza de este proceso por parte de diferentes autores. El análisis crítico permitió realizar valoraciones integradas y recomendar sobre los aspectos que podrían ser analizados en el futuro en esta temática.

Palabras claves: transferencia de calor incrementada, láminas helicoidales, espirales, espacios anulares, métodos pasivos.

Abstract

The transfer enhancement by passive methods is used in several heat exchanger of high effectiveness. The objective of the presented work was the evaluation of the state of the investigations in heat transfer enhancement in annular spaces, from the employment of elements helical. The revision was centered in the employment of twisted tape and wire coil in spiral, the equations of correlation obtained of the coefficient of transfer of increased heat, the coefficient of friction and the evaluation that was carried out of this process on the part of different authors. From the critical analysis of the published results, the authors recommend on the topics that can be analyzed in the future in this area.

Key words: heat transfer enhancement, twisted tape, helical springs, annular spaces, passive methods.

Introducción

El incremento de los coeficientes de transferencia de calor, es referido como mejora a la transferencia de calor. Un número significativo de investigadores han desarrollado nuevos métodos para mejorar la transferencia de calor entre las superficies y los fluidos que se encuentran en contacto con ellas. Esto parte de criterios basados en que un incremento de los coeficientes de transferencia de calor, pueden significar un ahorro considerable de recursos y una elevación de la eficiencia.

La clasificación de las técnicas de incremento realizada por Arthur E. Bergles y Ralf L. Webb [1], divide las técnicas en dos grupos: activas o pasivas, dependiendo de si requieren o no de energía externa. Dentro de los métodos pasivos, aquellos basados en el incremento de la rugosidad integral, y los dispositivos helicoidales o de flujo de remolino, son los que han reportado mayor interés práctico para los fabricantes de intercambiadores de calor. Aun bajo el constante crecimiento de la demanda de transferencia de calor en equipos intercambiadores y el auge de investigaciones de nuevas técnicas de incremento basadas en la incorporación de nanofluidos [2], y las nuevas aplicaciones de las técnicas activas usando materiales electroactivos [3], son las técnicas pasivas no sólo las más atractivas desde el punto de vista económico, sino las de mayores posibilidades de aplicación inmediata en la industria.

Existen actualmente muchas formas disponibles y comercializadas de elementos turbulizadores del flujo tal como lo refiere Thakur R. *et al* [4], estando sometido a investigación el impacto de este tipo de dispositivos y su optimización. De estos dispositivos, las láminas helicoidales y las espirales helicoidales, tipo "muelles" han sido las más empleadas para aumentar el calor transferido en flujo laminar y turbulento, existiendo gran cantidad de publicaciones disponibles. Sin embargo, el empleo de estos dispositivos en espacios anulares ha sido reducido; por el alcance de sus resultados pueden mencionarse las investigaciones desarrolladas por [5-7].

En este artículo se abordan los resultados del empleo de las técnicas pasivas de incremento de la transferencia de calor en espacios anulares rectos y sin cambio de fase, por ser esta configuración una de las más empleadas en intercambiadores de calor. El análisis se centra en el empleo de las láminas helicoidales y de las espirales como elementos turbulizadores del flujo. Se realiza un análisis crítico de los resultados obtenidos y se recomienda acerca de determinados aspectos que pueden ser analizados en el futuro en esta temática.

Resultados del empleo de elementos turbulizadores en espacios anulares

De acuerdo con investigaciones experimentales ya publicadas por diversos investigadores [8-10], el flujo de fluidos en espacios anulares presenta características que difieren de las ya conocidas para el flujo en tubos de sección circular. Existe además, para esta configuración, una divergencia notable entre las correlaciones desarrolladas para el factor de fricción f , y el número de Nusselt Nu , las cuales no coinciden en sus soluciones, a pesar de cubrir una amplia gama de condiciones para flujo turbulento y relaciones de diámetro, figura 1.

El empleo de diferentes técnicas de medición, diferentes relaciones de diámetros y errores en el balance térmico, se incluyen entre las posibles razones de estas divergencias, por lo que se hace necesaria la construcción de instalaciones experimentales específicas, como las desarrolladas por Ho K. *et al.* [11], y Tiruselvam R., Raghavan R.V. [12], para estudiar este sistema termo-hidráulico.

Tres revisiones del estado del arte recientes enfocados en las técnicas de incremento, publicadas por Prajapati Ch. *et al* [13], Joshis S., Kriplani V.M. [14] y Siddique M. *et al.* [15], no agregaron un solo resultado experimental referente al empleo de las técnicas de incremento de los coeficientes de transferencia de calor en espacios anulares, a los ya habían sido presentados por una revisión anteriormente publicada [16], en 1990.

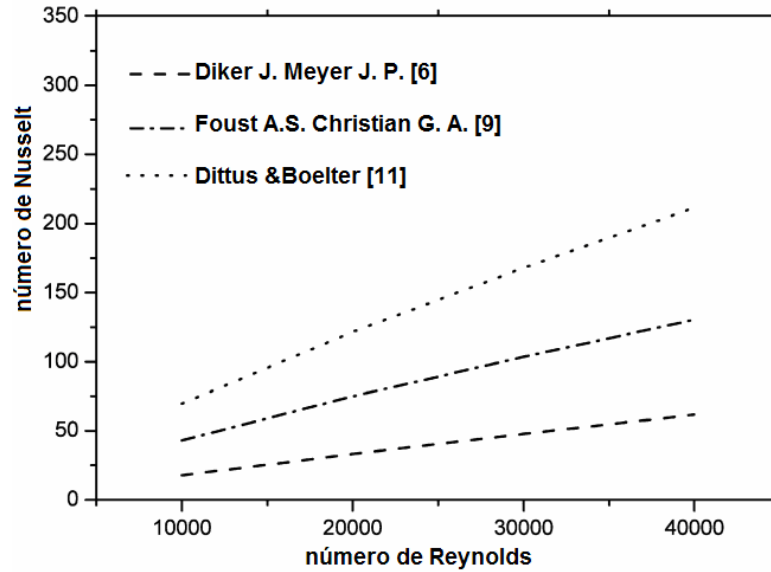


Fig. 1. Correlaciones del número de Nusselt en ánuos lisos para flujo turbulento

El incremento de la transferencia de calor por la incorporación de estos elementos, es causado por la componente tangencial de la velocidad en el flujo y el incremento correspondiente de la velocidad, especialmente en la cercanía de la pared del tubo. El efecto de las fuerzas cortantes y el mezclado provocado por el flujo secundario en remolinos que experimenta el fluido, son también componentes importantes a considerar de este incremento.

Las láminas helicoidales actúan de dos formas. Por un lado al aumentar la superficie de intercambio térmico, especialmente si hay buen contacto con las paredes del tubo, reducen el diámetro hidráulico lo que significa por sí un aumento del coeficiente de transferencia de calor, pero el efecto más importante es el cambio de la hidrodinámica del flujo. En el caso de las espirales, éstas producen un flujo helicoidal en la periferia superpuesto al flujo axial principal. Como consecuencia se incrementa la convección debido al aumento de la velocidad del fluido y a la aparición de fuerzas centrífugas, que favorecen la convección en procesos de calentamiento.

Tanto para láminas como para espirales se ha comprobado de manera experimental que, en espacios anulares, es el incremento de la turbulencia lo que más influye en el incremento de la transferencia de calor, sobre la promoción de un flujo secundario. En flujos laminares y transitorios la componente radial del fluido, tiene mayor significación y tiende a tener la mayor importancia en este proceso térmico. A continuación se exponen algunos resultados publicados del empleo de ambos elementos turbulizadores en esta geometría, que marcan tendencia en esta línea de investigación.

Láminas helicoidales insertadas

Los resultados obtenidos en los ensayos desarrollados empleando láminas helicoidales delgadas para flujos turbulentos, han condicionado que sean ellas los elementos mas estudiados. Así fue reportado [17], en los trabajos experimentales para flujos turbulentos donde las láminas se incorporan en el conducto anular de manera helicoidal. A partir de un amplio intervalo en los números de Reynolds, se formuló el comportamiento del factor de fricción en términos de la geometría de las láminas. La figura 2 presenta los elementos geométricos de una lámina en espiral insertada en el ánulo.

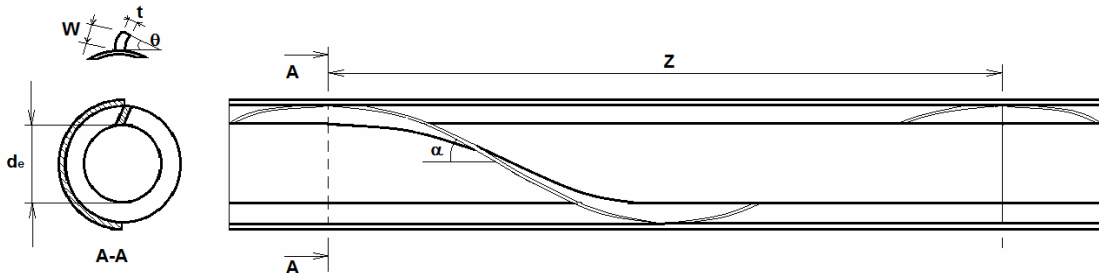


Figura 2. Elementos geométricos de una lámina en espiral en el ánulo. **t**: espesor, **w**: altura, **Z**: Distancia para producir un giro de 360°, **α**: ángulo de la lamina respecto al eje del tubo, **θ**: ángulo de inclinación de la lámina respecto a la superficie del tubo

El flujo de fluidos en espacios anulares formados por láminas espirales rayadas y tubos de rugosidad artificial ubicados en el interior de tubos lisos, fue investigado por Garimella S. & Christensen, R.N [5]. Sus resultados permitieron obtener por métodos de visualización del flujo el comportamiento laminar, de transición y turbulento del fluido en el sistema. Esto facilitó la determinación de la variante geométrica que permite mayor eficiencia en el intercambio de calor. El valor del Reynolds crítico, Re_c se ubicó en 300, dando lugar a la transición en el intervalo entre 310 y 1 000.

Los efectos de laminas helicoidales continuas ubicadas al interior de un tubo, láminas intercaladas y laminas helicoidales continuas en un espacio anular fueron comparadas por Promvong P., Eiamsa-ard S. [7,18], determinando que estas combinaciones provocaban un aumento en la tasa de transferencia de calor en el intervalo entre el 20 % y el 50 %, por encima de cuando se utiliza un único dispositivo de mejora, sin embargo esto también incidía en un aumento sustancial de las pérdidas de presión. Este análisis comparativo concluyó que en el espacio anular, el número de Nusselt experimentaba valores de incremento de 160 %, respecto al tubo liso. Este incremento es superior al obtenido incorporando las láminas helicoidales continuas al interior de tubos (150 %), siendo solo del 145 %, cuando estas láminas helicoidales se incorporaban regularmente espaciadas al interior de los tubos, aumentando la velocidad de transferencia del calor con la disminución del espaciado.

Analizando el comportamiento de la transferencia de calor y el factor de fricción Bhuiya M. M. K. *et al* [19], presentaron la influencia de láminas helicoidales insertadas para diferentes ángulos de la lámina, α : 9°, 13°, 17° y 21°, en flujos turbulentos de aire para números de Reynolds entre 22.000 hasta 51.000. Las ecuaciones de correlación propuestas para el número de Nusselt en estas condiciones experimentales son:

$$Nu = CRe^m Pr^{0.33} \quad (1)$$

$$C = 0.174(\tan \alpha)^2 - 0.109(\tan \alpha) + 0.0212 \quad (2)$$

Para el factor de fricción fueron obtenidas también ecuaciones de correlación en función del ángulo de la lámina α .

$$f = C_1 Re^{m_1} \quad (3)$$

$$C_1 = -9873.4(\tan \alpha)^2 - 4823(\tan \alpha) + 24.378 \quad (4)$$

$$m_1 = 1.7736(\tan \alpha)^2 - 0.9243(\tan \alpha) - 0.7792 \quad (5)$$

Los resultados publicados reportan un incremento del número de Nusselt Nu , y el factor de fricción f , de 305 % y 170 % respectivamente, respecto a los parámetros obtenidos para ánuos lisos. La eficiencia del incremento registrada fue de 3.7 para un flujo de aire constante.

La determinación de las características de la caída de presión y la transferencia de calor de un flujo de agua fluyendo en espacios anulares con láminas insertadas bajo diferentes ángulos de la espiral respecto al eje del tubo α , fue estudiada [20] para valores de Reynolds entre 2.500 y 25.000. Elementos de esta investigación fueron publicados [21], exponiendo ecuaciones para el número de Nusselt Nu y el factor de fricción f que dependían del ángulo de inclinación de la lámina respecto a la superficie del tubo θ , y la dirección del flujo respecto a esta inclinación. Las ecuaciones propuestas son:

$$Nu = 0.072 Re^{0.8} Pr^{0.33} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} * \left[f_1(y) Re^2 + f_2(y) Re + f_3(y) \right] \quad (6)$$

$$f = g_1 Re^{g_2(y)} \quad (7)$$

$$y = \left(\frac{z}{2d_i} \right) \quad (8)$$

Donde $f_{1, 2, 3}$ y $g_{1,2}$ son factores adimensionales que dependen de la geometría y la ubicación de las láminas, respecto a la orientación del flujo.

Esta investigación obtuvo que la inserción puede elevar la transferencia de calor hasta 206 % y la caída de presión del 203 %, para láminas de paso corto ($Z=25$ mm) respecto al comportamiento en ánulos lisos, siendo los valores de incremento para la transferencia de calor de 70 % y caída de presión de 58 %, para las láminas de paso largo ($Z=100$ mm).

Recientemente se publicaron resultados de exámenes experimentales realizados por Çakmak G. *et al* [22], basados en la inserción en espacios anulares de láminas internas onduladas para generar turbulencias en un flujo de aire. Las correlaciones obtenidas para el número de Nusselt y el factor de fricción son:

$$Nu = 0.05267(Re)^{0.698} Pr^{0.549} \left(\frac{d_e}{D_h}\right)^{-0.416} \quad (10)$$

$$f = 3.254367(Re)^{0.646} \left(\frac{d_e}{D_h}\right)^{-1.214} \quad (11)$$

Los experimentos fueron realizados con números de Reynolds entre 2.700 y 8.800 obteniendo una formulación experimental por el método de Wilson para el número de Nusselt y el factor de fricción, a partir de la relación entre el diámetro de la ondulación del tubo interno, d_e y el diámetro hidráulico, D_h .

En las ecuaciones expuestas de las investigaciones del empleo de láminas en espacios anulares lisos se puede observar que al igual que en espacios anulares lisos, se mantiene una dependencia directa del coeficiente de transferencia de calor con la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas del fluido (Reynolds), así como de la efectividad relativa del transporte de momento y energía por difusión en las capas límite hidrodinámica y térmica del sistema Prandtl. Como elemento distintivo se puede apreciar que las correlaciones incorporan coeficientes derivados de los elementos de la geometría del elemento turbulizador empleado.

Se puede observar que en las correlaciones propuestas, solo la ecuación de Coetzee [22] incorpora la corrección de Sieder & Tate [11], para afectar el valor del Nusselt, lo que denota que en este tipo de incremento pasivo se considera a los elementos geométricos de los turbulizadores de mayor influencia en el proceso de transferencia que la variación de propiedades del fluido en la capa límite térmica.

Espirales insertados

En la comparación del desarrollo termo-hidráulico de flujos de fluidos en canales anulares con la inserción de láminas y espirales, los resultados publicados [23], mostraron que la inserción de láminas en los flujos en espacios anulares tiene un comportamiento mejor que la inserción de espirales para el mismo ángulo de hélice y relación de espesor. Estos resultados no son discrepantes con los resultados posteriormente publicados por García A. [24], que indicaban a las espirales helicoidales como la mejor alternativa entre los dispositivos insertados para valores del Reynolds entre 200 y hasta 2000, siendo a partir de este valor del Reynolds, similar su comportamiento al de los tubos corrugados, en dependencia de los valores de caída de presión.

Swanepoelland W. [25], publicó resultados de las investigaciones insertando espirales helicoidales en el interior de espacios anulares en un intercambiador de tubo en tubo, para números de Reynolds desde 4 000 hasta 20.000. Los ángulos evaluados, en las espiras respecto al eje central de tubo β , fueron 30° y 60° con diámetro de hilo e , de 0.5 y 1 mm en las espirales ($\frac{e}{D_h} = 0.10 - 0.07$). La investigación arrojó

para $\beta = 60^\circ$ y relación ($\frac{e}{D_h} = 0.07$) los mejores resultados. El incremento de los coeficientes de

transferencia de calor estuvieron en el orden entre 160 % y 280 %, dependiendo del diámetro de hilo e , y del ángulo β , evaluado entre la espiral y el eje del tubo interno. Estos estudios, aunque no exponen ecuaciones de correlación para esta configuración, ponen de relieve las potencialidades de esta técnica de incremento, recomendando, estudios posteriores. La figura 3 representa las geometrías características de la inserción de espirales en espacios anulares.

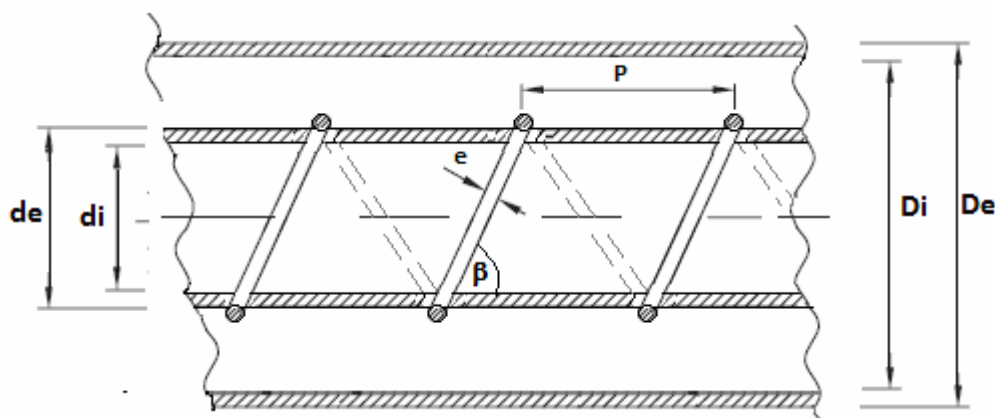


Fig. 3. Representación de las espirales insertadas en espacios anulares lisos y las geometrías que caracterizan esta inserción

Zimparov V. [26], estudió las características de los elementos geométricos de los turbulizadores, basados en los diferentes criterios de evaluación en intercambiadores en espacios anulares. Este estudio complementó una investigación ya publicada anteriormente por el propio autor [27], sobre una evaluación comparativa de 10 tubos de diferentes geometrías en las rugosidades integrales en el tubo interior del sistema anular, para conocer la influencia de estas en la transferencia de calor, valorando desde el punto de vista teórico la generación de entropía. De los resultados se obtiene que la relación $\frac{h}{D_h} = 0.04$,

indicaba los mejores resultados. A partir de la afirmación de Bergles A. E. [1], de que el mecanismo que provoca la turbulencia dado por las rugosidades integrales de los tubos, es semejante a la que provocan las espirales helicoidales, existe una equivalencia entre la altura de las rugosidades y el espesor de las espirales ($e = h$), los resultados publicados recomiendan ampliar las investigaciones con elementos turbulizadores en el intervalo de la relación, $\frac{e}{D_h}$ entre 0.02 y 0.04.

Resultados de un estudio de la inserción de espirales fue publicado exponiendo la influencia de la altura de los elementos turbulizadores en el incremento [28], indicando que la relación $\frac{e}{D_h}$ para mejor rendimiento varía entre 0.02 y 0.04 de acuerdo con el número de Reynolds del fluido. Sin embargo es necesario tomar en cuenta que las paredes de los tubos con rugosidad integral no cambian estructuralmente la dirección del flujo en vectores rotacionales como los provocados por las espirales.

Análisis crítico

Los estudios publicados se limitan a la experimentación por medio de técnicas comparativas de diversos diseños de elementos helicoidales de determinada geometría, los cuales someten a examen comparativo. Partiendo de datos experimentales, los autores emplean las técnicas de Wilson y sus diferentes modificaciones publicadas por Fernandez-Seara J. *et al* [29], para la obtención acertada de correlaciones para el Nusselt. Estas ecuaciones presentan errores cercanos al 15 % de aproximación en los intervalos medidos y limitadas a las condiciones que se han tenido en cuenta en cada experimentación.

A medida que se incrementa la turbulencia mejora la transferencia de calor, sin embargo al incorporar en el área de flujo elementos como láminas helicoidales o espirales, la tensión de cizallamiento y la presión de arrastre aumentan en consecuencia. Para este tipo de incremento pasivo el número de Reynolds Re , la relación de paso de la espiral Z , y la relación de giro de la lámina y , son los parámetros a considerar para evaluar la caída de presión y las características de la transferencia calor. Sin embargo, existen pocas comparaciones entre las diferentes geometrías disponibles como se ha señalado por Shoji Y. [30].

Las referencias respecto al modo en que los investigadores realizan la selección de la geometría de los elementos a ensayar son muy escasas o nulas, a pesar de existir trabajos publicados por Zimparov [26] y Slanciauskas [31] desde el año 2001, referentes a la selección de promotores de turbulencias en el fluido. Solo García A. [24], recomienda mediante una guía general la selección de estos elementos basado en el comportamiento de los diferentes elementos bajo diferentes regímenes de flujo. Sin embargo este

comportamiento se corresponde con flujos en conductos circulares, y solo puede tomarse como referencias para espacios anulares, donde la hidrodinámica del sistema se comporta de manera diferenciada.

No se reportan estudios que hayan obtenido ecuaciones funcionales de correlación, a partir de analizar el comportamiento de las espirales como elemento turbulizador, para predecir su comportamiento relativo del sistema térmico. Los experimentos ya publicados han demostrado que las espirales son altamente eficaces como turbulizadores en espacios anulares, tanto en la región de transición, como en la región de turbulencia y no existe referencia económica en las investigaciones desarrolladas, ni respecto al costo constructivo del elemento turbulizador, ni en lo referente a su impacto en el costo del proceso de transferencia de calor.

Por otra parte, la evaluación del proceso de transferencia de calor se ha realizado por los investigadores empleando el factor de incremento η . Este elemento empleado por Hwang S. D. *et al* [32], imprime mayor importancia a la relativa diferencia en el coeficiente de fricción, respecto al coeficiente de transferencia de calor.

$$\eta = \frac{\left(\frac{Nu_t}{Nu_s}\right)}{\left(\frac{f_t}{f_s}\right)^{0.33}} \quad (12)$$

Sin embargo en la investigación desarrollada por Bhuiya M.M.K. *y col.* [19], se prefiere calcular la el factor de incremento como el comportamiento a un valor constante del flujo, de la razón del coeficiente de transferencia de calor bajo los efectos de su incremento h_t , con el mismo espacio sin este efecto h_s .

$$\eta = \frac{h_t}{h_s} = \frac{Nu_t}{Nu_s} \quad (13)$$

La razón de incremento EA [33], también se ha calculado para evaluar este proceso, incluyendo el área de intercambio considerada A .

$$EA = \frac{h_t A}{h_s A} \quad (14)$$

La evaluación del desempeño teniendo en cuenta los criterios de Bergles A. E. [1], debe partir de un punto de vista integral partiendo de considerar tres condiciones:

1. Idéntico flujo másico, IMF

$$IMF: \left(\frac{ARe}{D_h}\right)_t = \left(\frac{ARe}{D_h}\right)_s \quad (15)$$

2. Idéntica caída de presión, ICP

$$ICP: \left(\frac{fRe^2}{D_h^3}\right)_t = \left(\frac{fRe^2}{D_h^3}\right)_s \quad (16)$$

3. Idéntica potencia de bombeo, IPP

$$IPP: \left(\frac{fRe^3 A}{D_h^4}\right)_t = \left(\frac{fRe^3 A}{D_h^4}\right)_s \quad (17)$$

Un enfoque similar a esta propuesta ha sido utilizado para evaluar el incremento de determinados dispositivos [33], con buenos resultados por diversos investigadores.

Además de los modos de evaluación expuestos, existen otros enfoques publicados [34,35] para evaluar este aspecto. Esta divergencia en el modo en que se evalúa la eficiencia del incremento en la transferencia de calor y el factor de fricción de un autor a otro, hace que los resultados no puedan ser comparados entre si.

Perspectivas de desarrollo

Las posibilidades de desarrollo en la esfera de la transferencia de calor incrementada en espacios anulares son amplias. No obstante el análisis de los resultados obtenidos por diferentes investigadores permite predecir aspectos que podrían aportar soluciones relevantes, partiendo de bases conocidas.

La tabla 1 recoge los resultados en el incremento de la transferencia de calor y la caída de presión al emplear láminas y espirales helicoidales como elementos turbulizadores en espacios anulares. En este resumen se puede observar que hace necesario obtener ecuaciones de correlación para el número de Nusselt y el coeficiente de fricción a partir de la incorporación de espirales helicoidales en espacios anulares, las cuales a pesar de haber reportado buenos resultados en las investigaciones desarrolladas, entre los objetivos propuestos no se han contemplado la obtención de ecuaciones de correlación.

Tabla 1. Incrementos de la transferencia de calor y la caída de presión, respecto ánnulos lisos, para láminas helicoidales y espirales helicoidales incorporadas en el espacio anular

Turbulizador	Autor	Reynolds 10 ²	Incremento %		Ecuación	Fluido
			Transferencia de calor	Coefficiente de fricción		
Láminas helicoidales	[7,18]	23 - 88	160 %	30 %	No especificado	Aire
	[20]	25 - 250	206 % (Z=25 mm)	203 % (Z=25 mm)	7, 8, 9	Agua
			70 % (Z= 100 mm)	58 % (Z= 100 mm)		
	[22]	27 - 88	200 %	58 %	10, 11	Aire
[19]	220 - 510	305 %	170 %	1, 2, 3, 4, 5, 6	Aire	
Espirales helicoidales	[25]	40 - 200	160 % $\beta = 30^\circ$	No especificado	No especificado	Agua
			280 % $\beta = 60^\circ$	No especificado		

Los estudios experimentales futuros podrían evaluar las posibilidades de incremento de los coeficientes de transferencia de calor, bajo combinaciones de empleo de elementos turbulizadores y rugosidades integrales. Muestra de ello son los resultados que analizan combinaciones del empleo de tubos de rugosidad integral con la inserción de láminas en espiral [35-37], mostrando que el efecto combinado puede ser superior al empleo estas técnicas por separado. Estos estudios podrían incluir el empleo de campos magnéticos de baja intensidad [38] y nanofluidos [2], en el proceso de intercambio de calor.

La limitación que tienen estos estudios, a juicio de los autores, esta dada en lo fundamental por la ausencia de elementos evaluativos integrales que permitan realizar valoraciones comparativas del incremento orientado a la disminución de la degradación energética que se experimenta en los intercambiadores de calor. Ampliar y desarrollar métodos de análisis evaluativos como el propuesto por Bergles A. E. [1], o procedimientos gráficos como el propuesto por Fan J. F [34], permitirían valorar la selección y efectividad potencial del empleo de elementos turbulizadores en espacios anulares.

Conclusiones

Las técnicas pasivas de incremento de transferencia de calor que han sido desarrolladas por diferentes investigadores en espacios anulares, reportan incrementos de los coeficientes de transferencia de calor entre 70 % y 305 %, cuando se emplean laminas helicoidales como elementos turbulizadores, quedando este rango en el intervalo de 160 % y 280 %, cuando se emplean espirales helicoidales. El incremento reportado del factor de fricción respecto a los ánnulos lisos por el empleo de estas técnicas se encuentra entre 30 % y 200 % cuando son empleadas láminas helicoidales como turbulizadores de flujo en espacios anulares.

El análisis de los resultados del empleo de las técnicas de incremento en espacios anulares por medio de elementos helicoidales insertados, ha puesto de manifiesto que no han sido reportado estudios que brinden ecuaciones de correlación para la determinación del coeficiente de transferencia de calor, ni el factor de fricción, a partir del empleo de láminas helicoidales.

El desarrollado de las técnicas pasivas de incremento evidencia que la geometría de los turbulizadores se considera de mayor influencia en la transferencia de calor, que la variación de las propiedades del flujo. El empleo de turbulizadores para incrementar el coeficiente de transferencia de calor es una opción adecuada, siempre que en la selección de espirales o láminas helicoidales como elemento turbulizador se contemple el incremento de la caída de presión provocada en el sistema.

Son insuficientes los criterios aportados para la selección de los elementos turbulizadores en espacios anulares. Estos criterios se deben elaborar sobre la base del comportamiento de los turbulizadores bajo diferentes regímenes hidrodinámico de flujo. El modo de evaluación del incremento del coeficiente de transferencia de calor provocado por los elementos insertados es desigual de un autor a otro. Esto impide una valoración integral de los resultados y dificulta la comparación y la selección de la variante más adecuada para cada caso.

Agradecimientos

El primer autor agradece el apoyo a La Unidad de Educación Continua y a la Coordinación de Docencia del Instituto de Energías Renovables (IER), de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), por el apoyo para llevar a cabo las bases de esta investigación.

Referencias

1. Bergles, A. E., Nirmalan, V., Junkhan, G. H., *et al.* *Bibliography on Augmentation of Convective Heat and Mass Transfer-II. Bibliographic Report.* Iowa State University, 1983. Vol. 335, p. Disponible en: www.osti.gov/scitech/biblio/5028987 ISBN 978-1575240602.
2. Haghghi, E. B., Saleemi, M., Nikkam, N., *et al.* 2013. "Cooling performance of nanofluids in a small diameter tube". *Journal of Experimental Heat Transfer, Thermodynamics, and Fluid Mechanics.* vol. 49, p. 114-122. ISSN 0894-1777. DOI
3. Léal, L., Miscevic, M., Lavieille, P., *et al.* 2013. "An overview of heat transfer enhancement methods and new perspectives: Focus on active methods using electroactive materials". *International Journal of Heat and Mass Transfer.* vol. 61, p. 505–524. ISSN 0017-9310.
4. Thakur, R., Vial, C., Nigam, K., *et al.* 2013. "Static mixers in the process industries – a review". *Chemical Engineering Research and Design.* vol. 81, nº. A7, p. 787-826. ISSN 0263-8762.
5. Garimella, S. y Christensen, R. N. 1993. "Experimental investigation of fluid flow mechanisms in annuli with spirally fluted inner tubes". *ASHRAE Transactions.* vol. 99-1, p. 1205-1216. ISSN 0001-2491.
6. Dirker, J. y Meyer, J. P. 2005. "Convective Heat Transfer Coefficients in Concentric Annuli". *Heat Transfer Engineering.* vol. 26, nº. 2, p. 38-44. ISSN 0145-7632.
7. Promvong, P. y Eiamsa-Ard, S. 2006. "Heat transfer enhancement in a tube with combined conical-nozzle inserts and swirl generator". *Energy Conversion and Manage.* vol. 47, p. 2867-2882. ISSN 0196-8904.
8. Warren R, V. Z., Dirker, J. y Meyer, J. P. 2013. "Single-Phase Convective Heat Transfer and Pressure Drop Coefficients in Concentric Annuli". *Heat Transfer Engineering.* vol. 34, nº. 13, p. 112-1123. ISSN 0145-7632.
9. Foust, A. S. y Christian, G. A. 1940. "Non-boiling heat transfer coefficients in annuli". *American Institute of Chemical Engineers Journal.* vol. 36, p. 541–554. ISSN 1547-5905.
10. Sreenivasulu, T. y Prasad, B. V. S. 2009. "Flow and heat transfer characteristics in an annulus wrapped with a helical wire". *International Journal of Thermal Sciences.* vol. 48, p. 1377–1391. ISSN 1290-0729
11. Tirusevram, R. y Raghavan, R. V. 2012. "Double tube heat exchanger with novel enhancement: part I- flow development length and adiabatic friction factor ". *Heat Mass Transfer.* vol. 48, p. 641–651. ISSN 1432-1181.
12. Ho, K., Abdalla, Y. y Chan, A. 2011. "An experimental set-up for investigating swirling decaying flow in an annular pipe". *International Communications in Heat and Mass Transfer.* vol. 38, p. 125-126. ISSN 0735-1933.
13. Prajapati, C. H., Patel, P., Patel, J., *et al.* 2012. "A Review of heat transfer enhancement using twisted tape ". *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies.* vol. II, p. 162-164. ISSN 2249 – 8974.
14. Joshis, S. y Kriplani, V. M. 2011. "Review of heat transfer augmentation with tape inserts". *International Journal of Engineering Science and Technology.* vol. 3, p. 162-164. ISSN 2141-2820.

15. Siddique, M., Khaled, A.-R., Abdulhafiz, N. I., *et al.* 2010. "Recent Advances in Heat Transfer Enhancements: A Review Report". *International Journal of Chemical Engineering*. vol. 1, p. 1-28. ISSN 1385-8947.
16. Balaras, C. A. 1990. "A Review of augmentation techniques for heat transfer surfaces in single-phase heat exchangers". *Energy*. vol. 15, p. 900-906. ISSN 0360-5442.
17. Pan, M., Jamaliniya, S., Robin Smith, R., *et al.* 2013. "New insights to implement heat transfer intensification for shell and tube heat exchangers". *Energy*. vol. 57, n^o. p. 208-221. ISSN 0360-5442.
18. Eiamsa-Ard, S., Thianpong, C. y Eiamsa-Ard, P. 2010. "Turbulent heat transfer enhancement by counter/co-swirling flow in a tube fitted with twin twisted tapes". *Experimental Thermal and Fluid Science*. vol. 34, n^o. p. 53-62. ISSN 0894-1777. DOI
19. Bhuiya, M. M. K., Ahamed, J. U., Chowdhury, M. S. U., *et al.* 2012. "Heat transfer enhancement and development of correlation for turbulent flow through a tube with triple helical tape inserts". *International Communications in Heat and Mass Transfer*. vol. 39, p. 94-101. ISSN 0735-1933.
20. Coetzee, H., Liebenberg, L. y Meyer, J. P. 2003. "Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Angled Spiraling Tape Inserts in a Heat Exchanger Annulus". *Heat Transfer Engineering*. vol. 24, n^o. 6, p. 29-39. ISSN 0145-7632.
21. Coetzee, H., Liebenberg, L., Vyef Vd, S., *et al.* 2003. "Angled Spiraling Tape Inserts in a Heat Exchanger Annulus". *R & D Journal*. vol. 19, p. 2-10. ISSN 0257-9669.
22. Çakmak G. y Lütfiyücel H., A. Z., Cengiz Y. 2012. "Experimental investigation of Thermal Performance in a Concentric-Tube Heat Exchanger with Wavy Inner Pipe". *International Journal Thermophys.* vol. 33, p. 1055–1067. ISSN 0195-9284.
23. Kumar, S., Mahanta, P. y Dewan, A. 2003. "A study of laminar flow in a large diameter annulus with twisted tape inserts". 2nd Int". En: *Conf. Heat Transfer Fluid Mechanics and Thermodynamics*. Victoria Falls, Zambia.
24. Garcia, A., Solano, J. P., Vicente, G. P., *et al.* 2012. "The influence of artificial roughness shape on heat transfer enhancement: Corrugated tubes, dimpled tubes and wire coils". *Applied Thermal Engineering*. vol. 35, p. 196-201. ISSN 1359-4311.
25. Swanepoelland, W. y Meyer, J. P. 1997. "Research Note: Preliminary investigation of heat transfer augmentation by means of spiral wires in the annulus of tube-in-tube heat exchangers". *R & D Journal*. vol. 13, n^o. 3, p. 98-100. ISSN 0257-9669.
26. Zimparov, V., Penchev, P. J. y Meyer, J. P. 2006. "Performance evaluation of tube-in-tube heat exchangers with heat transfer enhancement in the annulus". *Journal of Thermal Science*. vol. 10, n^o. 1, p. 45-46. ISSN 1003-2169.
27. Zimparov, V. 2001. "Extended performance evaluation criteria for enhanced heat transfer surfaces: heat transfer through ducts with constant heat flux". *International Journal of Heat and Mass Transfer*. vol. 44, p. 169-180. ISSN 0017-9310.
28. Ravigururajan, T. S. y Bergles, A. E. 1996. "Development and Verification of General Correlations for Pressure Drop and Heat Transfer in Single-Phase Turbulent Flow in Enhanced Tubes". *Experimental Thermal and Fluid Science*. vol. 13, p. 55-70. ISSN 0894-1777.
29. Fernandez-Seara, J., Uhia, F. J., Sieres, J., *et al.* 2007. "A general review of the Wilson plot method and its modifications to determine convection coefficients in heat exchange devices". *Applied Thermal Engineering*. vol. 27, p. 2745–2757. ISSN 1359-4311.
30. Shoji, Y. y Sato, K. 2003. "Heat transfer enhancement in round tube using coiled wire: influence of length and segmentation". *Heat Transfer–Asian Res.* vol. 32, n^o. 2, p. 99-107.
31. Slanciauskas, A. 2001. "Two friendly rules for the turbulent heat transfer enhancement". *International Journal of Heat and Mass Transfer*. vol. 44, p. 2155-2161. ISSN 0017-9310.
32. Hwang, S. D., Kwon, H. G. y Cho, H. H. 2010. "Local heat transfer and thermal performance on periodically dimple-protrusion patterned walls for compact heat exchangers". *Energy*. vol. 35, p. 53-57. ISSN 0360-5442.
33. David, J., Kukulka Smith, R. y Fuller, K. G. 2011. "Development and evaluation of enhanced heat transfer tubes". *Applied Thermal Engineering*. vol. 3, p. 2141-2145. ISSN 1359-4311.
34. Fan, J. F., Ding, W. K., Zhang, J. F., *et al.* 2009. "A performance evaluation plot of enhanced heat transfer techniques oriented for energy-saving". *International Journal of Heat and Mass Transfer*. vol. 52, p. 33-44. ISSN 0017-9310.

35. Garcia, A., Solano, J. P., Vicente, P. G., *et al.* 2012. "The influence of artificial roughness shape on heat transfer enhancement: Corrugated tubes, dimpled tubes and wire coils". *Applied Thermal Engineering*. vol. 35, p. 96-201. ISSN 1359-4311.
36. Kumar, S., Bhattacharyya, S. y Dayanidhi, G. L. 2012. "Enhancement of heat transfer of laminar flow of viscous oil through a circular tube having integral axial rib roughness and fitted with helical screw-tape inserts". *Heat Transfer Research*. vol. 43, n°. 3, p. 207-227. ISSN 1064-2285.
37. Promvongse, P., Pethkool, S., Pimsarn, M., *et al.* 2012. "Heat transfer augmentation in a helical-ribbed tube with double twisted tape inserts". *International Communications in Heat and Mass Transfer*. vol. 39, p. 953–959. ISSN 0735-1933.
38. Wrobel, W., Fornalik-Wajs, E. y Szmyd, J. S. 2010. "Experimental and numerical analysis of thermo-magnetic convection in a vertical annular enclosure". *International Journal of Heat and Fluid Flow*. vol. 31, p. 1019-1031. ISSN 0142-7272.