

ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR CON CAMBIO DE FASE EN ARREGLO DE FLUJO CONCÉNTRICO

Sánchez Calderón Alejandro (1), Elizalde Blancas Francisco (2)

1 [Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica, División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato] | [a.sanchezcalderon@ugto.mx]

2 [Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato] | [franciscoeb@ugto.mx]

Resumen

Un análisis de transferencia de calor en tubos concéntricos, donde se desea enfriar hidrógeno que fluye por el tubo interno del arreglo se presenta en este trabajo. Metano, que fluye por el tubo exterior es el fluido refrigerante en el proceso de intercambio de calor, experimenta un cambio de fase de líquido a gas. En este análisis se presenta el coeficiente convectivo obtenido mediante simulación numérica en software comercial de CFD, cuando se lleva a cabo el cambio de fase del metano.

Abstract

A heat transfer analysis in concentric pipes, where it is desired to cool hydrogen flowing through the inner pipe of the array is presented in this paper. Methane, which flows through the outer pipe is the refrigerant fluid in the heat exchange process, undergoes a phase change from liquid to gas. In this analysis, the convective heat transfer coefficient obtained by means of numerical simulation using a commercial CFD software is presented when methane experiences phase change.

Palabras Clave

Transferencia de Calor; Fases; Evaporación; Coeficiente Convectivo

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, diversas industrias demandan una gran cantidad de combustible diariamente, uno de los cuales es el hidrógeno. Para poder transportar más cantidad de hidrógeno, desde el área de obtención hasta el área donde se lleva a cabo el proceso donde se utiliza este elemento, el hidrógeno suele ser comprimido y enfriado a temperaturas muy bajas para que este pase de estado gaseoso a estado líquido, ya que en este estado ocupa menos volumen.

Para lograr enfriar el hidrógeno a tan baja temperatura se requieren de equipos especialmente diseñados para tal fin como un intercambiador de calor, y más específicamente, un intercambiador de calor de tubos concéntricos. Este tipo de intercambiador se puede diseñar tanto en arreglo de co-flujo donde los dos fluidos se mueven en la misma dirección, y en contra-flujo donde los fluidos fluyen en direcciones opuestas [1].

En varios análisis de intercambiadores de calor, independientemente del tipo de intercambiador, se suelen hacer algunas suposiciones que facilitan el cálculo y ayudan a reducir el tiempo de cómputo, tales suposiciones son; que las propiedades de los fluidos que se usan sean independientes de la temperatura y sólo se intercambia calor entre los fluidos, no hacia los alrededores [2].

Se conoce que la transferencia de calor se produce por una diferencia de temperaturas y existen tres mecanismos de transferencia de calor; conducción, convección y radiación. En la convección, la transferencia de calor se debe a dos fenómenos, uno gracias al transporte de energía debido a la interacción de las moléculas del fluido y otro debido al movimiento global de dicho fluido [3].

El modelo que nos permite conocer la transferencia de calor mediante convección es la ley de Newton de enfriamiento, donde se indica un coeficiente convectivo específico para cada situación. Dicho coeficiente convectivo no es una propiedad del fluido, este más bien es un parámetro determinado en la mayoría de los casos de forma experimental, cuyo valor depende de todas las variables que afectan la convección como son la geometría de la superficie, el acabado de la superficie, las propiedades termofísicas del fluido y la velocidad de flujo sobre la superficie [3].

Elección del refrigerante y definición de la geometría

Además del fluido que se desea enfriar, se hace uso de un fluido refrigerante el cual tiene como objetivo, para este caso, remover energía térmica del hidrógeno para así disminuir su temperatura. Este refrigerante también se denomina fluido de trabajo y es de vital importancia escoger un fluido de trabajo que proporcione una óptima transferencia de calor, temperaturas de refrigeración adecuadas y que sea relativamente fácil de conseguir. Un fluido de trabajo normalmente utilizado para refrigerar a bajas temperaturas en varias aplicaciones y que, además, es muy comercial, es el metano. La gran cantidad de aplicaciones y su excelente desempeño en procesos de transferencia de calor hacen que el metano sea uno de los refrigerantes más convenientes de usar [4]. Por lo mencionado anteriormente, se hará uso del metano para llevar a cabo el análisis que se presenta, donde el metano entra al arreglo a una temperatura de 155 K.

Es de suma importancia elegir las dimensiones apropiadas para el modelo con el que se va a trabajar, dado que, hacer una elección de diámetros de tubos comerciales hará que este proyecto pudiera implementarse en el área industrial con mayor facilidad pues los materiales serían relativamente sencillos de conseguir para dicha industria. Para diferenciar los dos tubos uno del otro en este análisis, al tubo exterior se le denomina coraza. En Tabla 1 se presentan las dimensiones elegidas para el arreglo con el que se realizará el análisis.

Por dentro del tubo fluye el hidrógeno, que entra a una temperatura de 188.7 K y, del lado de la coraza, fluye metano líquido que, al ser su temperatura de evaporación de 165.87 K, se espera que gran parte de este líquido se evapore y se aprecien las dos fases dentro del arreglo.

Tabla 1: Dimensiones del arreglo para el análisis.

Longitud del tubo (m)	Diámetro interno de la coraza (mm)	Diámetro exterior del tubo (mm)	Diámetro interior del tubo (mm)
5.28	46.30	33.70	32.10

Cálculo para un régimen de flujo para ambos fluidos y análisis de independencia de malla

Para este análisis, se propone usar un régimen de flujo laminar para cada fluido, proponiendo velocidades adecuadas y con las cuales no se exceda en número de Reynolds permitido para un flujo laminar en cuyo caso este no debe ser mayor a 2300.

Para el análisis de independencia de malla, se realizan diversas mallas en la geometría designada, en las que se llevarán a cabo simulaciones bajo las mismas condiciones de flujo y temperatura de cada fluido para cada una de las mallas. Terminada cada simulación, se grafican la transferencia de calor total de un fluido a otro contra el número de nodos para cada malla, lo anterior con la finalidad de observar si la transferencia de calor varía en cada malla y, de ser así, elegir una malla donde dicha transferencia de calor deje de variar lo más posible.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para este análisis se requiere de un equipo de cómputo con softwares para realizar simulaciones numéricas de CFD (Computational Fluid Dynamics) principalmente, un software que permita el diseño y mallado de dicho modelo, también de software que contenga las propiedades mínimas de los fluidos requeridos, además, se hace uso de hojas Excel y un software para graficar. Para este análisis, como herramientas de diseño y cómputo se usan, GAMBIT para el diseño y mallado de la geometría, el software REFPROP de donde se extraerán las propiedades para cada fluido, y FLUENT para llevar a cabo las simulaciones numéricas, observar el proceso de transferencia de calor y el fenómeno de cambio de fase, que en este caso es evaporación.

Haciendo uso del software GAMBIT, se dibuja la geometría y se generan distintas mallas, variando la cantidad de nodos en cada una de ellas, se debe tener en cuenta que una malla con un gran número de nodos tardará más tiempo en ser generada por el software. Para el diseño, gracias a que el software FLUENT permite indicar espesores de pared, se omite el espesor del tubo para así facilitar la malla en GAMBIT y, como el exterior de la coraza se supone como adiabático (inexistencia de transferencia de calor hacia los alrededores), tampoco se dibuja el espesor de la coraza. El modelo generado se presenta en la Figura 1.

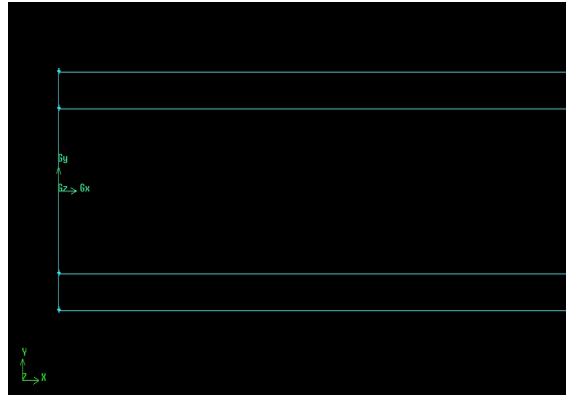


FIGURA 1: Diseño del modelo en GAMBIT (parte del lado izquierdo del tubo) omitiendo los espesores del tubo y la coraza.

Una vez que se ha dibujado la geometría, se procede a generar las mallas para, posteriormente, exportarlas y abrirlas con FLUENT donde se llevarán a cabo las simulaciones numéricas.

En FLUENT, se usarán las propiedades de los fluidos (hidrógeno y metano) que se encuentran en su propia base de datos para realizar el análisis de independencia de malla, pero antes, se deben definir las velocidades de entrada de cada fluido procurando que sean apropiadas para tener un flujo laminar. En este análisis se plantean velocidades de 0.2 m/s para el metano y de 0.5 m/s para el hidrógeno, así mismo, se tiene que, para el metano $Re=1170.5$ y para el hidrógeno $Re=123.6$. También, se debe declarar el espesor de las paredes del tubo que para este caso es de 0.8 mm. Ahora bien, se procede a graficar la transferencia de calor contra el número de nodos para cada malla. Para este análisis se encontró que una malla de 23760 nodos es la ideal pues a partir de este número de nodos, la transferencia de calor dejaba de variar significativamente.

Una vez realizado el análisis de independencia de malla, se procede a realizar los cálculos nuevamente, pero esta vez usando propiedades de una base de datos que se usarán para el análisis de cambio de fase. Utilizando FLUENT, se obtienen las propiedades del metano y el hidrógeno que contiene la base de datos REFPROP y, con ayuda del apartado de materiales con el que cuenta FLUENT, se hace una copia de material llamado "real-gas-methane" y se nombra "real-gas-methane-gas", esto para declarar al metano como una mezcla de dos fases, líquido y gas, posteriormente. Usando el modelo de multifases VOF en FLUENT, se declaran las fases de: hidrógeno, metano líquido y metano gaseoso. Como interacción entre fases, se elige un intercambio de masa entre el metano líquido y el metano gaseoso mediante la opción de evaporación, posterior a esto se introduce la temperatura de evaporación, que en este caso es de 165.87 K y, nuevamente, se realiza una simulación numérica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sin suponer un cambio de fase, se tienen los siguientes valores para la transferencia de calor total hacia el metano de 115.47 W y se alcanza un equilibrio térmico donde ambos fluidos salen del arreglo a una temperatura de 182.62 K.

Ahora bien, tomando en cuenta que existe un cambio de fase, de líquido a gas, por parte del metano para la simulación numérica, se encuentra que la transferencia de calor total al metano es de 164.3 W, que es de esperarse ya que cuando sucede un cambio de fase, como en este caso de líquido a gas, el fluido demanda mayores cantidades de energía para que dicho cambio de fase ocurra, a este calor requerido para evaporar un fluido se le conoce como calor latente que también se entiende como entalpía de transformación [5]. Por

otro lado, las temperaturas de salida para el hidrógeno y el metano son prácticamente las mismas, de 182.82 K.

Ahora se presenta una comparación de contornos de temperatura entre la simulación donde no se supone un cambio de fase y para la simulación donde sí ocurre el cambio de fase. Estos contornos se muestran en las Figuras 2 y 3 respectivamente, donde se puede apreciar que la temperatura de los fluidos cambia más rápidamente en la simulación donde se presenta un cambio de fase.

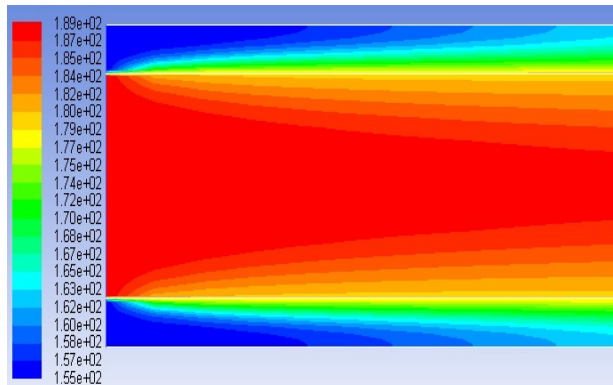


FIGURA 2: Contorno de temperatura para la simulación donde no se supone cambio de fase.

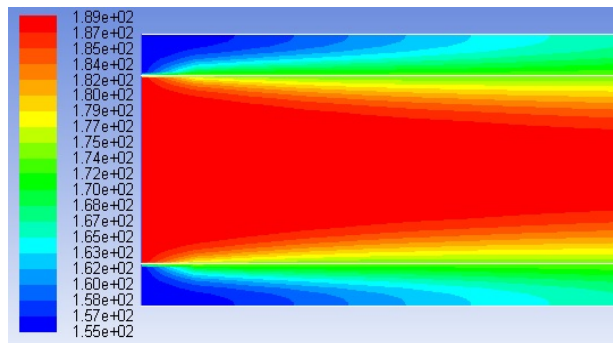


FIGURA 3: Contorno de temperatura para la simulación donde ocurre un cambio de fase.

El cambio de fase, por parte del metano, se puede apreciar en la Figura 4, donde se nota que el fluido comienza a evaporarse desde la pared externa del tubo, lo que también es de esperarse pues la pared externa del tubo tiene una temperatura superior a la del metano y esto hace que el líquido vaya aumentando su temperatura hasta llegar a la temperatura de evaporación.

Una vez que se da por hecho la existencia del cambio de fase por parte del metano, se procede a observar el comportamiento del coeficiente convectivo local, el cual se muestra en la Figura 5.

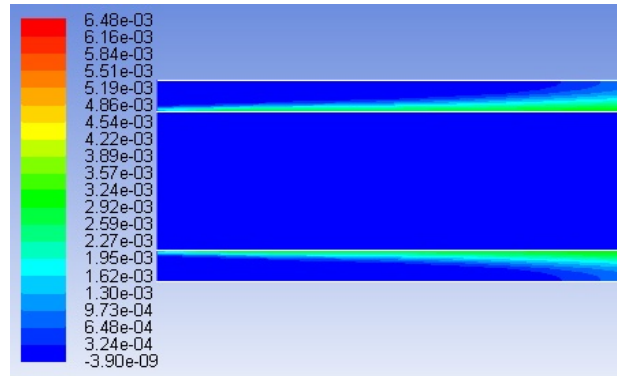


FIGURA 4: Proceso de cambio de fase, líquido a gas, por parte del metano, se muestra la interacción entre la fase líquida y la fase gaseosa.

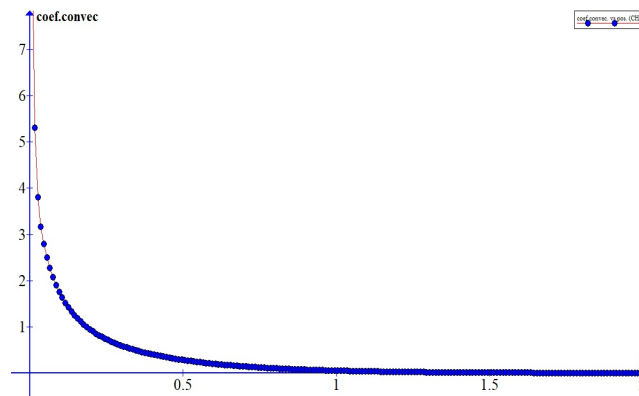


FIGURA 5: Comportamiento del coeficiente convectivo local a lo largo de la geometría.

Al observar el comportamiento del coeficiente convectivo local en la Figura 5, se puede razonar que este es más grande en las primeras secciones a lo largo de la geometría, lo que es congruente dado que las temperaturas a la entrada del arreglo son muy diferentes y por ende existe una mayor transferencia de calor, que va disminuyendo conforme los fluidos van alcanzando un equilibrio térmico.

CONCLUSIONES

Como se pudo observar durante las simulaciones, un cambio de fase, de líquido a gas en este caso, provoca que exista una mayor transferencia de calor entre los fluidos, dado que es necesario que un fluido ceda mayor cantidad de energía térmica al fluido que cambiará de fase.

Como es lógico, las temperaturas de entrada de los fluidos, es un factor que afecta a la transferencia de calor en cualquier intercambiador de calor, en este caso, si la diferencia de temperaturas entre los fluidos, a la entrada del arreglo, fuera aún más grande, se observaría una mayor transferencia de calor y, por ende, un incremento en la magnitud del coeficiente convectivo. Otro factor que, para este caso, también repercute en la transferencia de calor, son las velocidades de los fluidos, ya que en régimen laminar se produce una menor transferencia de calor que en régimen turbulento ya que en este último se tiene mayor movimiento del fluido.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer principalmente al Dr. Elizalde Blancas Francisco por todo el apoyo brindado durante esta investigación. Al personal de la biblioteca de DICIS por todas las atenciones recibidas y al trabajo que realizaron algunos de mis compañeros ya que fue de gran ayuda para sacar adelante este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] Yunus A. Cengel. (2011). Transferencia de calor y masa fundamentos y aplicaciones. Nevada, Reno: Mc Graw Hill
- [2] X.J. Luo. (2017). Parametric study of heat transfer enhancement on cross-flow heat exchangers. Chemical Engineering & Processing: Process Intensification, 121, 81-89
- [3] Incropera Frank P. David P. DeWitt (1999). Fundamentos de Transferencia de Calor. Universidad de Purdue: Prentice Hall
- [4] Bo R., Shizhang H., Hua M. & Xiaowei G. (2017) Transient responses of turbulent heat transfer of cryogenic methane at supercritical pressures. International Journal of Heat and Mass Transfer, 109, 326-335.
- [5] Mark W. Zemansky, Richard H. Dittman. (1985). Calor y Termodinámica. Universidad de New York: McGraw Hill.