

TRANSFERENCIA DE CALOR EN EVAPORADORES DE TUBOS DE CIRCULACIÓN FORZADA: INFLUENCIA DEL DIÁMETRO DE TUBO

Rubio, Luis; Chernikoff¹, Raúl; Muñoz Ernesto; Carullo, Carlos; Sini, Sergio ; Possa, Heber

RESUMEN

Se operó un evaporador de un tubo de escala industrial, que puede ser armado según seis principios diferentes, lo que permite comparar los resultados obtenidos para los distintos casos. Se desarrolló un método modelístico para la identificación y reducción de variables utilizando el modelo de caja negra aplicado a la situación local y a la global. Se evaluó experimentalmente en la configuración de circulación forzada ascendente con tubos internos de distintos diámetros. Con los datos obtenidos, aplicando parcialmente el método modelístico, se obtuvo una ecuación predictiva en función de variables macroscópicas independientes.

INTRODUCCIÓN

Los estudios sobre evaporadores existentes en la literatura han sido realizados sobre equipos, sea a escala piloto o industrial, de configuración fija y totalmente distintos unos de otros, asumiendo que, por el principio de similitud, los resultados son escalables, es decir, válidos a una escala distinta y por ello también comparables. Sin embargo, en fenómenos que implican simultáneamente transferencias de masa, calor y cantidad de movimiento, como es el caso de la evaporación, la similitud sólo puede lograrse en forma parcial. Esto limita seriamente la validez de las ecuaciones obtenidas [1] y ha llevado a cuestionar los resultados alcanzados para este tipo de fenómenos [2]. Una revisión crítica de los distintos métodos modelísticos [3] ha constatado

¹ ¹Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria (U.N.Cuyo)
San Martín 358. San Rafael. Mendoza. Argentina. FAX: 02627-421947. E-mail: lrubio@facai.uncu.edu.ar

las inconsistencias del marco teórico en uso. Se propone un nuevo enfoque para los fenómenos de transferencia complejos, lográndose resultados parciales con gran respaldo experimental.

OBJETIVOS

1. Identificar variables macroscópicas significativas;
2. Evaluar el equipo con fluidos newtonianos operando en su configuración de circulación forzada ascendente;
3. Experimentar con tubos internos de distinto diámetro;
4. Obtener modelos predictivos.

METODOLOGÍA APLICADA Y RESULTADO

Identificación y selección de variables macroscópicas

Las variables macroscópicas identificadas en la bibliografía se resumen en la TABLA 1.

Variables seleccionadas

TABLA 1. Resumen de variables macroscópicas

Primer grupo: Características geométricas y físicas:	1. Tipo de configuración
	2. Diámetro del tubo (d)
	3. Largo del tubo (L)
	4. Material de construcción
	5. Espesor de pared del tubo (e_w)
	6. Naturaleza de la superficie (r_w)
Segundo Grupo: Parámetros operativos:	7. Velocidad media de producto. (u)
	8. Temperatura de vahos (t_v)
	9. Temperatura de vapor de calefacción (t_s)
	10. Diferencia de temperatura (ΔT)
	11. Alejamiento de la temperatura de equilibrio
	12. Concentración de sólidos solubles (C_C)
	13. Tipo de producto
Tercer grupo: Propiedades del fluido líquido a la temperatura de la masa del producto	14. Temperatura de la masa de producto (t_i)
	15. Tensión superficial (σ)
	16. Viscosidad: (μ_L)
	17. Calor específico
	18. Conductividad térmica
	19. Calor latente de vaporización
	20. Gradiente crítico de temperaturas ($\Delta T_{\text{crítico}}$)
	21. Elevación del punto de ebullición

Las variables de la TABLA 1 pueden ser reducidas de la siguiente manera:

1. Considerando el modelo local como una caja negra, por aplicación de la Regla de las fases, se reducen las propiedades del tercer grupo a tres parámetros operativos: temperatura de producto, temperatura exterior y concentración de sólidos solubles.
2. Considerando el modelo global como una caja negra, a partir de la definición de variable independiente se obtienen como variables macroscópicas: tipo de producto; temperatura de vapor de calefacción (t_s); temperatura de vahos (t_v); velocidad media de producto (u); y concentración de sólidos solubles (c_c).
3. Los parámetros de temperatura del modelo local se pueden, a su vez reducir, a los ya elegidos para el modelo global.

Matemáticamente el modelo global ha de expresarse: $q = f(t_s, t_v, u, c_c)$

Materiales y equipos

Se utiliza un equipo de evaporación con un intercambiador de calor de doble tubo de de 6 m de longitud que puede ser armado según seis principios diferentes, permitiendo la comparación de los resultados obtenidos para los distintos casos.

Se experimenta en la configuración de circulación forzada ascendente con dos diámetros de tubo interno, uno de 1" y el otro de 1¼", estudiando su influencia sobre la transferencia de calor.

El equipo se pone a punto con agua y luego se lo hace operar con soluciones diluidas de sacarosa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos son obtenidos utilizando un sistema de adquisición especialmente configurado para tal fin, TAS[®], para ser luego volcados a una planilla electrónica EXCEL[®] donde son equiespaciados, recortándose aquellos correspondientes a los estados estacionarios; por corrida y por variable se

toman 150 lecturas, obteniendo aproximadamente 45.000 datos, de los que se calcula la media y la desviación standard. Sobre estos se realizan los cálculos necesarios para los balances.

Finalmente, utilizando el programa comercial STATGRAPHICS se realiza una regresión múltiple partiendo de una expresión potencial de la forma: $y = b_0 \cdot x_1^{b1} \cdot x_2^{b2} \cdot \dots \cdot x_n^{bn}$

El modelo obtenido para el flujo de calor en función de parámetros macroscópicos es:

$$q = 4.184 \cdot \left(\frac{T_V^{1/4} \cdot C_C^4 + 12 \cdot (d/D)^{19} \cdot u^2}{T_V \cdot u^2} \right)^{0.58} \cdot (d/D)^{4.1} \cdot (\Delta T)^{1.01} \cdot (d/D)^{1/2} \quad (\text{Ec.1})$$

Los estadígrafos más importantes correspondientes al modelo se resumen en la TABLA 2.

La Ecuación 1 es directamente comparable con la expresión obtenida [4] en estudios previos del evaporador para idénticas condiciones de operación, pero utilizando un tubo interno de 1” de diámetro. En aquel caso el modelo obtenido fue:

$$q = 4,184 \cdot \left(\frac{T_V^{1/4} \cdot c_C^4 + 12 \cdot u^2}{T_V \cdot u^2} \right)^{0,58} \cdot (T_S - T_V) \quad (\text{Ec..2})$$

En la Ecuación 1, d/D es la relación entre diámetros para distintos tubos internos. Si en la Ecuación 1 se hace $d/D = 1$, se obtiene la Ecuación 2.

La FIGURA 1 muestra el flujo de calor calculado con el modelo obtenido y con dos ecuaciones de referencia: la de Fragen-Badger y la de Dittus-Boelter modificada para evaporadores de circulación forzada.

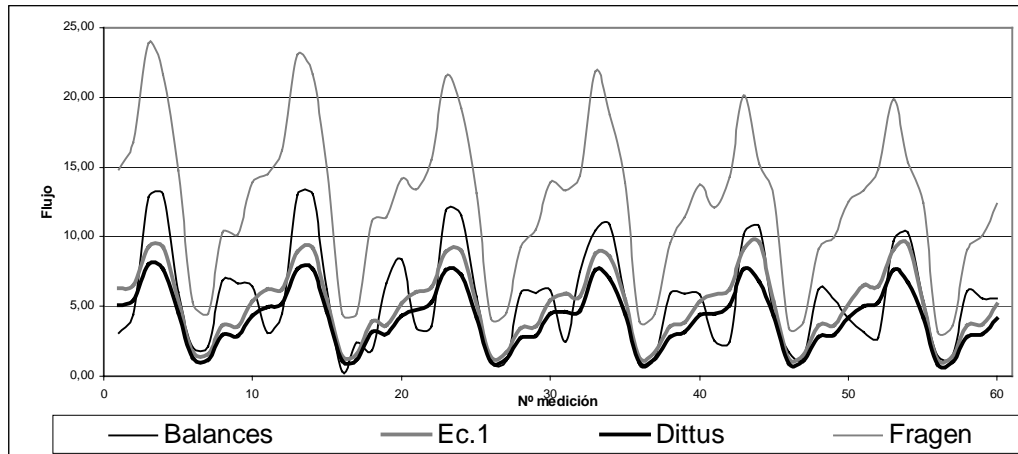


FIGURA 1. Comparación de flujos obtenidos con distintos modelos

CONCLUSIONES

- 1.- Se obtuvo un modelo sencillo que da cuenta en gran medida de la variabilidad de la información experimental obtenida, utilizando parámetros macroscópicos de fácil medición.
- 2.- El modelo muestra, respecto a estudios previos, la influencia del diámetro de tubo interno al flujo de calor.
- 3.- El ajuste logrado manifiesta ser mejor cuanto mayor es la concentración en el evaporador.

REFERENCIAS

- 1 - Chen, J. C. (1966) *Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow*. I&EC Process Design and Development, Vol. 5 N^o 3.
- 2 - Cao, E.(1995) *Correlaciones para diseño de reboilers del tipo kettle* - Procesos - Marzo 10-18
- 3 - Rubio, L.; et al. (2003) *Una nueva mirada a los fenómenos de transferencia: aplicación al caso de evaporadores*. IV Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos (CIBIA IV) Viña del Mar (Chile), 26–30/ 09
- 4 - Chernikoff, R., “*Diseño, construcción y evaluación experimental de un evaporador*”, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia - España, (2004)