

ESTIMACION DE LA VELOCIDAD DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN REACTORES DE LECHO FIJO CON FLUJO BIFASICO ASCENDENTE

M.J. Taulamet*, O.M. Martínez, G.F. Barreto, N.J. Mariani

Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina

Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencias Aplicadas “Dr. J. J. Ronco” (CINDECA) CONICET- CIC – UNLP Calle 47 No. 257, CP B1900AJK, La Plata, Argentina

* mariajose.taulamet@ing.unlp.edu.ar

Palabras claves: TRANSFERENCIA DE CALOR, REACTORES UPFLOW, CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EFECTIVA RADIAL, COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA PARED

RESUMEN

Se relevaron los estudios experimentales y las correlaciones propuestas para los parámetros de transferencia de calor entre un lecho relleno con flujo bifásico ascendente y un medio externo existentes en la bibliografía. A partir de la revisión se generó una base de datos que permitió, por una parte, comparar las correlaciones existentes para los parámetros del modelo bidimensional pseudohomogéneo (*i.e.*, conductividad térmica efectiva radial y coeficiente de transferencia de calor en la pared) y, por otra, proponer nuevas correlaciones para los mismos, las cuales mejoran la capacidad predictiva de las existentes y amplían el rango de aplicación.

Introducción

Los lechos rellenos con flujo bifásico ascendente (*upflow*) se utilizan en una variedad de operaciones como destilación, absorción sin y con reacción química y procesos catalíticos. Una aplicación reciente y de interés de este tipo de reactores involucra a los sistemas de almacenamiento de H₂ mediante el empleo de *liquid organic hydrogen carrier*, en los cuales cobra importancia el análisis de la transferencia de calor debido a que tanto la reacción de deshidrogenación (endotérmica) como la de hidrogenación (exotérmica) requieren del intercambio de calor con una fuente térmica externa [1].

El objetivo de esta contribución es proponer nuevas correlaciones para los parámetros de transferencia de calor en reactores *upflow* que mejoren la capacidad predictiva de las existentes. Dado que en la mayor parte de los trabajos se emplea un modelo bidimensional

pseudohomogéneo para la interpretación de los datos experimentales, el trabajo se centró en los dos parámetros que presenta el mismo: la conductividad térmica efectiva radial (k_{er}) y el coeficiente de transferencia de calor en la pared (Nu_w).

Análisis de datos experimentales y correlaciones disponibles en la literatura

En la literatura se dispone de distintas correlaciones para estimar k_{er} y Nu_w [3,10,11,9,7,8,4,12]. Con el objetivo de estudiar el desempeño de las mismas, se generó una base de datos experimentales a partir de los trabajos de la bibliografía [3,4,5,6,7,8,9,10], que incluye rellenos esféricos con a (cociente entre el diámetro del tubo y del relleno) >14 y aire y agua como fluidos. Estos datos fueron agrupados en función del tamaño del relleno y del régimen de flujo: $d_p \leq 2$ mm (régimen separado) y $d_p > 2$ mm (regímenes burbuja y pulsante). Debe señalarse que los datos experimentales presentan un nivel de dispersión propio, asignable a múltiples factores desde la dispersión intrínseca de las medidas hasta el hecho de que corresponden a distintas fuentes. Para cada régimen de flujo se llevó a cabo un análisis comparativo de las predicciones de correlaciones de bibliografía entre sí y con la información experimental llegando a la conclusión de que ninguna permite predecir con certidumbre el conjunto de datos incluidos en la base dado que los errores relativos superan el 34% tanto en régimen burbuja como pulsante, mientras que si bien para k_{er} en régimen separado algunas expresiones presentan un error aceptable [8,9] ($\approx 11\%$) las mismas tienen una tendencia a sobrepredecir. Adicionalmente, en el análisis se incluyeron algunas correlaciones para sistemas *downflow* [13,14,15], de las cuales la de Taulamet y col. [14] resultó la más adecuada para una primera estimación del k_{er} en régimen separado con errores relativos en torno al 10% con una distribución balanceada de valores positivos y negativos.

Propuesta de nuevas correlaciones

Debido a que no fue posible encontrar una correlación de bibliografía que permita predecir los parámetros con razonable nivel de certidumbre, se propusieron las siguientes expresiones:

$$k_{er} = k_{e0} + b_k \beta_t^{c_k} Re_L^{e_k} (1 + a_k Re_G^{f_k}) Pr_L k_L \quad (1) \quad Nu_w = Nu_{w0} + b_w \beta_t^{c_w} Re_L^{e_w} (1 + a_w Re_G^{f_w}) Pr_L^{1/3} \quad (2)$$

Las expresiones para estimar k_{e0} , Nu_{w0} y β_t pueden consultarse en [16,14,7], respectivamente.

El criterio empleado para llevar a cabo el ajuste de los parámetros (a_k , b_k , c_k , e_k , f_k , a_w , b_w , c_w , e_w , f_w) fue el de minimizar la suma de los errores relativos promedio:

$$\varepsilon_k = \sum_{i=1}^N 100 \frac{|\varepsilon_{er,i}|}{N} \quad \text{con} \quad \varepsilon_{er,i} = \frac{k_{er,i}^{calc} - k_{er,i}^{exp}}{k_{er,i}^{exp}} \quad (3) \quad \varepsilon_{Nu} = \sum_{i=1}^N 100 \frac{|\varepsilon_{Nu,i}|}{N} \quad \text{con} \quad \varepsilon_{Nu,i} = \frac{Nu_{w,i}^{calc} - Nu_{w,i}^{exp}}{Nu_{w,i}^{exp}} \quad (4)$$

donde N es el número de datos experimentales de la base incluidos en el ajuste.

En la Tabla 1 se presentan los valores de los parámetros resultantes, mientras que en la Tabla 2

se informan ε_k y ε_{Nu} , junto con el número de datos con desviaciones positivas y negativas. En todos los casos los errores resultan aceptables y su distribución razonablemente bien balanceada. Para k_{er} en régimen burbuja fue necesario incorporar una dependencia del parámetro a_k con Re_L para poder ajustar más apropiadamente los datos. A pesar de esta incorporación, las mayores desviaciones de k_{er} se detectaron para este régimen. Para Nu_w se logró alcanzar un ajuste adecuado de los datos con $d_p > 2$ mm en los regímenes burbuja y pulsante empleando un único conjunto de parámetros. Las bandas de incertidumbre para el caso de Nu_w resultaron mayores que en el caso de k_{er} , dado que los datos experimentales del primero se encuentran considerablemente más dispersos y su número es sustantivamente menor.

Tabla 1: Parámetros de ajuste para las correlaciones de k_{er} y Nu_w propuestas (Ecs. 1 y 2).

Régimen	a_k	b_k	c_k	e_k	f_k	a_w	b_w	c_w	e_w	f_w
Separado	0.99	0.077	0	1	0.25	2.86	0.054	0.94	1	0.12
Burbuja	$38.82 / Re_L$	0.077	0	1	0.40	2.52	1.635	1.73	0.41	0.30
Pulsante	0	5.156	1	0.38	0					

Tabla 2: ε y desviaciones para la correlación de k_{er} y Nu_w propuestas (Ecs. 1 y 2).

Régimen	N	ε_k	$\varepsilon_{er,i} > 0$	$\varepsilon_{er,i} < 0$	N	ε_{Nu}	$\varepsilon_{Nu,i} > 0$	$\varepsilon_{Nu,i} < 0$
Separado	114	7.6	51	63	69	12.9	28	41
Burbuja	48	15.6	26	22	33+39=72	16.0	30	42
Pulsante	30	9.5	13	17				

En las Figuras 1a y b se muestra un conjunto de datos experimentales representativo y los valores predichos de k_{er} en función de Re_L para diferentes Re_G (régimen separado) y de Nu_w vs. Re_L para distintos Re_G (régimen burbuja-pulsante), respectivamente.

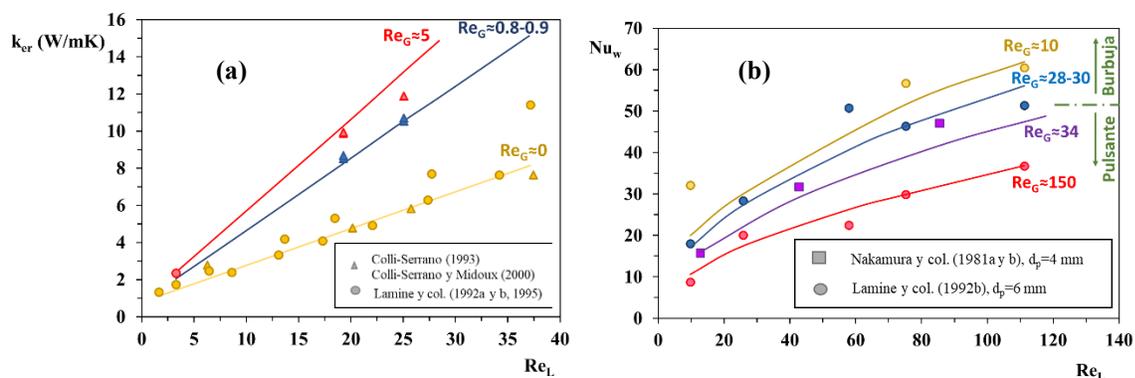


Figura 1: (a) k_{er} vs Re_L ($d_p=2$ mm, régimen separado) (b) Nu_w vs Re_L . ($d_p=4$ y 6 mm, régimen burbuja-pulsante)

Conclusiones

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica referida a la transferencia de calor en reactores de lecho fijo con flujo bifásico ascendente (*upflow*) de la que surgió que el modelo mayoritariamente empleado para la interpretación de los datos experimentales es el bidimensional pseudohomogéneo, el cual cuenta con dos parámetros, k_{er} y Nu_w . A partir de la información experimental disponible para los mismos se generó una base de datos en función del tamaño del relleno y del régimen de flujo. Para cada grupo de datos se llevó a cabo una comparación de la información experimental con las predicciones de correlaciones de bibliografía, llegándose a la conclusión de que ninguna permite predecir con certidumbre los datos incluidos en la base elaborada. Debido a esto, se propusieron nuevas expresiones para k_{er} y Nu_w en cada uno de los regímenes, las cuales permiten predecir los parámetros con desviaciones inferiores al 16% para todo el conjunto de datos y, adicionalmente, amplían el rango de caudales de aplicación.

Agradecimientos

Los autores agradecen el aporte financiero de las siguientes instituciones CONICET (PIP 2005) y UNLP. MJT, OMM, GFB y NJM son investigadores del CONICET.

Referencias

- [1] J. Geiling, M. Steinberger, F. Ortner, R. Seyfried, A. Nuß, F. Uhrig, C. Lange, R. Öchsner, P. Wasserscheid, M. März, P. Preuster; Int. J. Hydrog. Energy 46 (2021) 35662-35677.
- [3] M. Nakamura, T. Tanahashi, D. Takada, K. Ohsasa., S. Sugiyama; Heat Transfer: Japanese Research 10, 92–99 (1981).
- [4] M.T. Colli Serrano; Ph.D. Dissertation in French, Institut National Polytechnique de Lorraine (1993).
- [5] M.T. Colli-Serrano, N. Midoux; Chem. Eng. Sci. 55 4149-4157 (2000).
- [6] A.S. Lamine, M.T. Colli Serrano, G. Wild; Chem. Eng. Process., 31, 385-394 (1992a).
- [7] A.S. Lamine, M.T. Colli Serrano, G. Wild; Chem. Eng. Sci., 47 (13-14) 3493-3500 (1992b).
- [8] A.S. Lamine, M.T. Colli Serrano., G. Wild; Chem. Eng. Res. & Des., 73 (A3) 280-285 (1995).
- [9] S. Gutsche, G. Wild, N. Midoux, H. Martin; Chem.-Ing.-Tech. 61 (9) 733-736 (1989).
- [10] V.N. Sokolov, M. Yablokova ; J. Appl. Chem. USSR (Zh. Prikl. Khim.), 56 551-553 (1983).
- [11] V.N. Sokolov, M. Yablokova, V.M. Krylov.; J. Appl. Chem. USSR (Zh. Prikl. Khim.), 56 554-558 (1983).
- [12] M.F. Pinto Moreira; Ph.D. Thesis, Universidad Federal de São Carlos (2004).
- [13] A.S. Lamine., L. Gerth., H. Le Gall, G. Wild; Chem. Eng. Sci., 51 (15) 3813- 3827 (1996).
- [14] M.J. Taulamet, N.J. Mariani, G.F. Barreto, O.M. Martínez; Reviews in Chem. Eng., 31 (2) 97–118 (2015).
- [15] M.J. Taulamet, N.J. Mariani, G.F. Barreto, O.M.; Fuel, 202 631–640 (2017).
- [16] N.J. Mariani; Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata (2000).