Operaciones Unitarias II **Mérida, 14 de septiembre de 2007.**
Escuela de Ingeniería Química

Tercer Parcial

Problema 1:
Considérese un cilindro de radio R y longitud L que se encuentra sumergido en un líquido. El cilindro gira a una velocidad angular Ω causando el flujo del líquido alrededor del cilindro; a una distancia muy alejada de la superficie del cilindro ($r \rightarrow \infty$), el fluido se encuentra en reposo. La superficie del cilindro está a una temperatura T_R y el fluido, muy alejado de la superficie del cilindro, se encuentra a T_∞ ($T_R > T_\infty$). Obtenga los perfiles de velocidad y temperatura para el fluido, suponiendo que este se encuentra en estado estacionario, que el flujo es unidimensional y que las propiedades del fluido (ρ, μ, Cp y k) pueden considerarse constantes. Calcule también el flujo de calor $\dot{q}$ desde el cilindro hacia el fluido. (7 p)

Problema 2:
Se tiene una placa metálica de 99 cm de largo, a una temperatura constante de 80 °C. Por encima de la placa circula aire a 274 °C a una tasa de 249 kg/m^2 s. Por debajo de la placa circula glicerina a una velocidad de 0,85 m/s y una temperatura de 0ºC. a) Calcule la temperatura de película para cada fluido. b) Determine cuál es el patrón de flujo preponderante en cada fluido y por qué. c) Obtenga un estimado del coeficiente de película h para cada fluido. d) Calcule el coeficiente global de transferencia de calor, U, considerando que las superficies de la placa están limpias y que la resistencia térmica de la placa metálica es despreciable. Nota: Use exclusivamente los datos de las tablas que se anexan en la parte inferior. (7 p)

Preguntas:
a) ¿Qué significa la expresión "disipación viscosa" ?
b) ¿Cuál es el patrón de flujo bifásico más eficiente para la transferencia de calor? ¿El estratificado o el burbujeante? Explique.
c) ¿Qué es la condensación en gotas? ¿Qué ventaja tiene recubrir la superficie de los tubos con algún material hidrofóbico (repelente de agua, tal como la silicona y el Teflón) para condensación de agua por fuera de tubos?
d) Mencione tres aspectos en los cuales los intercambiadores de placas aventajan a los tubulares.

(6 p)

Datos para aire:

T, K	ρ, kg/m^3	Cp, J/kg K	$\mu \cdot 10^{-5}$, kg/m s	k, W/m K
350	0,998	1009	2,075	0,030
450	0,7833	1020,7	2,484	0,037
550	0,6423	1039,2	2,848	0,044

Datos para glicerina:

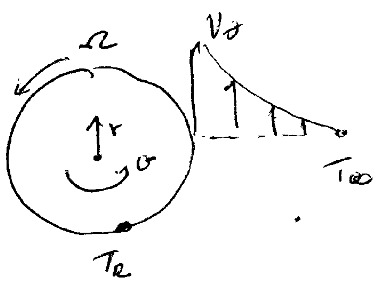
T, °C	ρ, kg/m^3	Cp, J/kg K	ν, m^2/s	Pr
0	1276	2261	0,00831	84.700
20	1264	2386	0,00118	12,5
40	1252	2512	0,00022	2,45

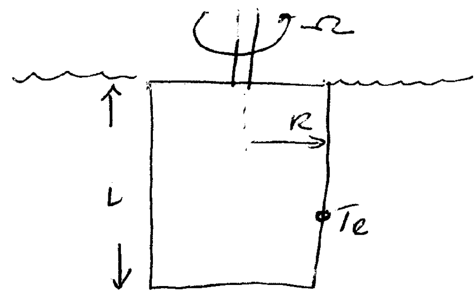
OPERACIONES UNITARIAS II 1/6

Tercer Parcial 14/09/07

Resolución

Problema 1:





$r \to \infty$, $v_\theta = 0$

$r \to \infty$, $T = T_\infty$

Observando las figuras se deduce que:

* $v_\theta = f(r)$; $v_r = v_z = 0$
* $T = f(r)$, $\frac{\partial T}{\partial \theta} = 0$, $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$

Balances microscópicos suponiendo estado estacionario, propiedades constantes

Balance de materia:

En vista de que $v_r = v_z = 0 \rightarrow \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial \theta}(\rho v_\theta) = 0$, $v_\theta = f(r)$

Balance de cantidad de movimiento:

$$\rho\left(\underbrace{\cancel{\frac{\partial v_\theta}{\partial t}}}_{0,\ \text{est. est.}} + \underbrace{\cancel{v_r}\frac{\partial v_\theta}{\partial r}}_{0} + \frac{v_\theta}{r}\underbrace{\cancel{\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta}}}_{\text{a cont.}} + \underbrace{\cancel{\frac{v_r v_\theta}{r}}}_{0} + \underbrace{\cancel{v_z\frac{\partial v_\theta}{\partial z}}}_{0}\right) = -\underbrace{\cancel{\frac{\partial p}{\partial \theta}}}_{0} + \mu\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial (r v_\theta)}{\partial r}\right)$$

$$+ \underbrace{\cancel{\rho g_\theta}}_{0,\ \text{flujo horizontal}}$$

Queda entonces: $\frac{d}{dr}\left(\frac{1}{r}\frac{d(r v_\theta)}{dr}\right) = 0$

Primera integración:

$$\frac{1}{r}\frac{d(r v_\theta)}{dr} = C_1$$

$$\frac{d}{dr}\left(r v_\theta\right) = c_1 r \rightarrow r v_\theta = \frac{c_1 r^2}{2} + c_2$$

$v_\theta = \dfrac{c_1 r}{2} + \dfrac{c_2}{r}$, Como $v_\theta \rightarrow 0$ cuando $r \rightarrow \infty$ $\Rightarrow c_1 = 0$

$v_\theta = \dfrac{c_2}{r}$; $v_\theta = \Omega R$ cuando $r = R \Rightarrow c_2 = \Omega R^2$

$$v_\theta = \frac{\Omega R^2}{r}$$ // perfil de velocidad

Balance de energía; se supone que el único gradiente de temperatura que importa es en la dirección de r; como $v_r = v_z = 0$, queda entonces

$$0 = k\left[\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{dT}{dr}\right)\right] + \mu\left[r\frac{d}{dr}\left(\frac{v_\theta}{r}\right)\right]^2$$

$\dfrac{d}{dr}\left(\dfrac{v_\theta}{r}\right) = -\dfrac{2\Omega R^2}{r^3}$; sustituyendo:

$$0 = \frac{k}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{dT}{dr}\right) + \mu\frac{4\Omega^2 R^4}{r^4}$$; separando:

$$\frac{d}{dr}\left(\frac{r\,dT}{dr}\right) = -\frac{4\mu\Omega^2 R^4}{k}\cdot\frac{1}{r^3}, \qquad A = \frac{4\mu\Omega^2 R^4}{k}$$

$$r\frac{dT}{dr} = \frac{A}{2r^2} + c_3; \quad \frac{dT}{dr} = \frac{A}{2r^3} + \frac{c_3}{r}$$

$$T = -\frac{A}{4r^2} + c_3 \ln r + c_4$$

Se tiene entonces:

$$(\mathrm{I})\quad \frac{dT}{dr} = \frac{\mathcal{A}}{2r^3} + \frac{C_3}{r}$$

$$(\mathrm{II})\quad T = -\frac{\mathcal{A}}{4r^2} + C_3 \ln r + C_4$$

Condiciones de frontera

$r = R$, $T = T_R$

$r \to \infty$, $T \to T_\infty$, $\Rightarrow \frac{dT}{dr} = 0$

El valor de C_3 no puede determinarse de la ec. I ya que todos los términos tienden a cero cuando $r \to \infty$

El valor de C_4 tiene que ~~ser~~ igual a T_∞ para que se cumpla la condición de frontera. Entonces, usando ambas condiciones de frontera y $C_4 = T_\infty$, se tiene que

$$T_R = -\frac{\mathcal{A}}{4R^2} + C_3 \ln R + T_\infty$$

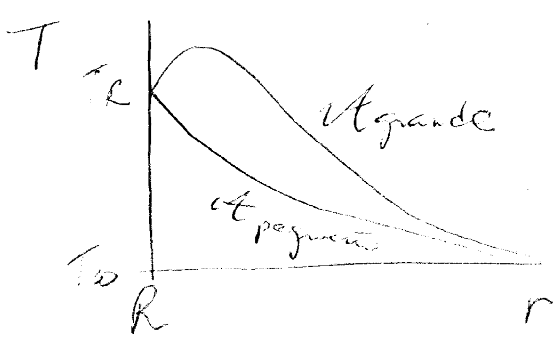
$$C_3 = \frac{1}{\ln R}\left(T_R - T_\infty + \frac{\mathcal{A}}{4R^2}\right)$$

Flujo de calor del cilindro $q = K\,2\pi R L \times \left(-\frac{dT}{dr}\right)_{r=R}$

Sustituyendo y recuperando las variables originales:

$$T = -\frac{\mu \Omega^2 R^4}{K r^2} + \frac{\ln r}{\ln R}\left(T_R - T_\infty + \frac{\mu \Omega^2 R^4}{K R^2}\right) + T_\infty$$

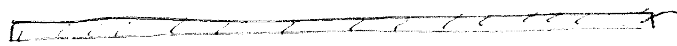
Esta solución cumple con ~~esa~~ las condiciones de frontera cuando $r > 0$.



Problema 2.

AIRE $T_\infty = 274°C$ $\qquad$ $L = 99\,cm$

$G = 249\ kg/m^2 s$



$T_p = 80°C$

GLICERINA $T_\infty = 0°C$

$v_\infty = 0,85\,m/s$

a) Para el aire $T_f = \dfrac{274+80}{2} = 177°C = 450\,K$ $\quad$ Respuesta de b

Para la glicerina $T_f = \dfrac{0+80}{2} = 40°C$

AIRE

$$Re_A = \frac{\rho v_\infty L}{\mu} = \frac{G L}{\mu} = \frac{249 \times 0,99}{2,484 \times 10^{-5}} = 9.923.913 = 9,9 \times 10^{6}$$

$$x_{c_A} = \frac{5 \times 10^5 \times 2,484 \times 10^{-5}}{249} = 0,05\,m = 5\,cm$$

Los primeros 5 cm por donde escurre el aire están en régimen laminar, los restantes 94 cm en régimen turbulento. Este último es el régimen de flujo preponderante para el aire

GLICERINA

$$Re_G = \frac{1252 \times 0,85 \times 0,99}{\mu} = \frac{0,85 \times 0,99}{0,00022} = 3825$$

Toda la ~~placa~~ capa límite de glicerina se encuentra en régimen laminar

c) Para el aire $\overline{Nu}_L = Pr^{1/3}\left(0,037\,Re_L^{0,8} - 871\right)$

$$Pr_A = \frac{\mu C_p}{k} = \frac{2,484 \times 10^{-5} \times 1020,7}{0,037} = 0,685$$

$$\overline{Nu}_L = 12139 \rightarrow h_A = \frac{\overline{Nu}_L \times k}{L} = 453,7\ W/m^2K$$

Para el glicerol $\overline{Nu_L} = 0,664 \times Re_L^{1/2} Pr^{1/3}$

$$\overline{Nu_L} = 0,664 \times 3825^{1/2} \times 2,45^{1/3} = 55,36$$

$$k = \frac{\mu C_p}{Pr} = \frac{\rho \nu C_p}{Pr} = \frac{1252 \times 0,00022 \times 2512}{2,45} = 282,4$$

$$h_G = \frac{55,36 \times 282,4}{0,99} = 15.791,6 \ \mathrm{W/m^2K}$$

$$U = \frac{1}{A\Sigma R} = \frac{1}{LW\left(\frac{1}{h_A LW} + \cancel{R_{placa}} + \frac{1}{h_G LW}\right)} = \frac{h_A h_G}{h_G + h_A}$$

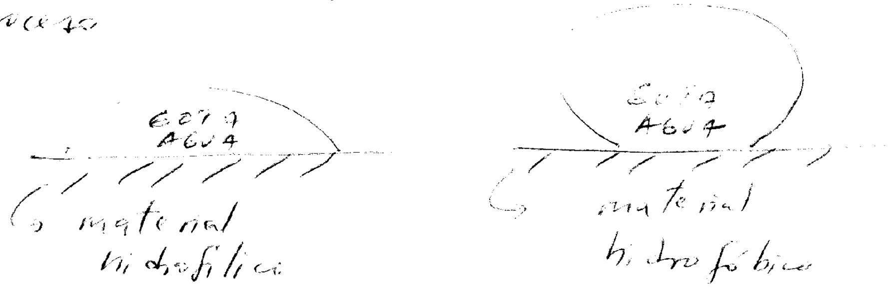
$$U = 441 \ \mathrm{W/m^2K}$$

Pregunta:

a) Es la energía que se disipa como calor debido a la fricción

b) El patrón de flujo más eficiente es el burbujeante porque hay más mezcla entre las fases. En flujo estratificado la transferencia de calor es a través de la interfase gas - líquido

c) Cuando un vapor entra en contacto con una superficie a una $T < T_{sat}$ del vapor, dicho vapor condensa formando pequeñas gotas. Si las gotas no escurren, terminan formando una película de líquido que aumenta la resistencia a la transferencia de calor. Al recubrir los tubos con algún material hidrofóbico, las gotas tienden a escurrir más prontamente, dejando la superficie del tubo libre de líquido. Esto mejora la eficiencia del proceso.



3)

d) Los intercambiadores de placa ocupan menos espacio que los tubulares para áreas similares; son más fáciles de mantener (limpieza); puede aumentarse o disminuirse fácilmente el área de transferencia de calor añadiendo o quitando placas en cuanto que esto no puede hacerse (aumento área) en un intercambiador tubular.