

2) Vapor escoar no anel tubular de um trocador duplo-tubo condensando na superfície externa do tubo interno à temperatura de 80 °C. Sabendo que água a 60 °C entra no tubo interno (com diâmetro de 2,54 cm) a uma velocidade média de 2 cm/s. Supondo que o trocador de calor tenha 3,5 m de comprimento, pede-se:

2.a) Calcule a temperatura de saída da água no tubo interno, empregando uma correlação empírica na solução.

[  $T_s$  = : ..... ]

2.b) Calcule a vazão mássica de condensado gerado (na superfície externa do tubo interno).

[  $M_{\text{cond}}$  = : ..... ]

2.c) Admitindo que o trocador de calor esteja na posição vertical e que haja condensação pelicular, calcule o coeficiente de transferência de calor médio sobre todo o comprimento do tubo e avalie qual é o regime de condensação.

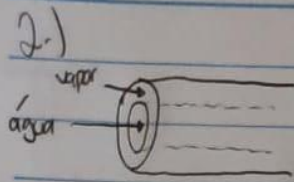
[  $h$  = : ..... ]

[  $Re$  = : ..... ]

2.d) Apresente a análise crítica dos resultados encontrados.

Resolução nas páginas abaixo!

a)



Dados:  $T_w = 80^\circ\text{C}$

$T_o = 60^\circ\text{C}$

$D = 0,0254\text{ m}$

$L = 3,5\text{ m}$

$\dot{Q}_x = 0,02\text{ m/s}$

Hipóteses: escoamento totalmente desenvolvido, radiação desprezível, sem efeitos de entrada.

Iteração

$\bullet N = 1 \quad T_{\text{arbitrário}} = 80^\circ\text{C}$

$\Rightarrow T_{\text{bulk}} = \frac{T_o + T_L}{2} = \frac{60^\circ\text{C} + 80^\circ\text{C}}{2} = 70^\circ\text{C}$

$\bullet$  Dados da água em  $T_{\text{bulk}}$  - TABELA B.2 OGIS h

$\bullet \rho = 979,77\text{ kg/m}^3$

$\bullet c_p = 4190,4\text{ J/kg}^\circ\text{C}$

$\bullet \nu = 4,21 \cdot 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$

$\bullet k = 0,6595\text{ W/mK}$

$\bullet Pr = 2,62$

$\bullet$  Cálculo de Reynolds:  $Re = \frac{\dot{Q}_x D}{\nu} = \frac{0,02 \cdot 0,0254}{4,21 \cdot 10^{-7}} = 1207 < 10^4 \Rightarrow \text{LAMINAR}$

$\bullet$  Correlação de Seider e Tittle p/ regime Laminar:

$\bullet \mu_{\text{bulk}} = 4,04 \cdot 10^{-4}\text{ Pa.s} \quad \bullet \mu_w = 3,55 \cdot 10^{-4}\text{ Pa.s} \quad \mu_{\text{bulk}} = 1,14 \quad \Rightarrow 0,044 < \frac{\mu_{\text{bulk}}}{\mu_w} < 0,75 \checkmark$

$\bullet G_z = \frac{Re \cdot Pr}{L/D} = 22,94$

$\Rightarrow G_z^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu_{\text{bulk}}}{\mu_w} \right)^{0,14} = 2,893817 > 2 \checkmark$

$\bullet 0,48 < Pr < 16700 \checkmark$

tilibra

As condições foram atingidas! Portanto:

$$Num = 1,86 \cdot G_z^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu_{bulk}}{\mu_w} \right)^{0,14} = 1,86 \cdot 2,893817 = 5,3825$$

$$Num = \frac{h \cdot D}{k} \Rightarrow h = \frac{Num \cdot k}{D} = \frac{5,3825 \cdot 0,6595}{0,0254} = 139,75$$

$$St = \frac{h}{Pr \cdot Cp} = \frac{139,75}{979,77 \cdot 0,02 \cdot 4190,4} = 0,0017$$

Portanto:  $Pr \frac{T_L - T_w}{T_o - T_w} + St \cdot \frac{4L}{D} = 0$ . Isolando  $T_L$  e substituindo os valores, encontra-se:

$$T_L = 72,17^\circ\text{C}$$

$$\bullet \text{Convergência: } T_L - T_{L(\text{arbitrário})} = 72,17^\circ\text{C} - 80 = 7,83 > 7$$

$N = 2$  Segundo os mesmos passos:

$$T_{L(\text{arbitrário})} = 72,17^\circ\text{C}$$

$$T_{bulk} = 66,09$$

• Dados da Tabela 3-2 em Tbulk:

$$p = 981,9947 \text{ kg/m}^3$$

$$Cp = 4188,0 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

$$v = 4,433 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k = 0,6562 \text{ W/mK}$$

$$Pr = 2,7764$$

$$Re = 1146 < 10^4$$

tilibra

LAMINAR

$$\left. \begin{array}{l} \mu_{bulk} = 4,29 \cdot 10^{-4} \text{ Pa.s} \\ \mu_w = 3,55 \cdot 10^{-4} \text{ Pa.s} \end{array} \right\} \frac{\mu_{bulk}}{\mu_w} = 1,21$$

$$G_z = 23,09$$

$$G_z^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu_{bulk}}{\mu_w} \right)^{0,14} = 2,9237$$

$$Num = 5,43836$$

$$h = 140,50$$

$$St = 0,0017$$

$$T_L = 72,20^\circ\text{C}$$

$$\bullet \text{Convergência: } 72,20 - 72,17 = 0,03 \checkmark$$

$$T_L = 72,20^\circ\text{C}$$

Portanto,  $T_L = 72,20^\circ\text{C}$ .

b)

b)

$$T_L = 72,20^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{bulb}} = \frac{T_L + T_0}{2} = \frac{72,20 + 60}{2} = 66,0995^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{filme}} = \frac{T_{\text{bulb}} + T_w}{2} = \frac{66,0995 + 80}{2} = 73,0498^\circ\text{C}$$

Dados das Tabelas B.2 e B.7 para água em filme:

$$\rho = 978,035 \text{ kg/m}^3$$

$$k_f = 0,6621 \text{ W/mK}$$

$$\mu = 3,9 \cdot 10^{-4} \text{ Pa.s}$$

$$h_{fg} = 2326237$$

$$Pe = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = 1277 < 1800 \checkmark$$

Equação da condensação em tubo horizontal:

$$h_m = 0,725 \left( \frac{g \cdot \rho \cdot (\rho - \rho_v) \cdot h_{fg} \cdot D^3}{\mu \cdot \Delta T \cdot D} \right)^{1/4}$$

$$h_m = 0,725 \left( \frac{9,81 \cdot 978,035^2 \cdot 2326237 \cdot 0,6621^3}{3,9 \cdot 10^{-4} \cdot (80 - 66,0995) \cdot 0,0054} \right)^{1/4}$$

$$h_m = 10623,8 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$Q = A \cdot h_m \cdot \Delta T = \pi \cdot D \cdot L \cdot h_m \cdot \Delta T = \pi \cdot 0,0054 \cdot 3,5 \cdot 10623,8 \cdot (80 - 66,0995)$$

$$Q = 41244,1 \text{ W}$$

$$Q = h_{fg} \cdot \dot{m} \Rightarrow \dot{m} = \frac{Q}{h_{fg}} = \frac{41244,1}{2326237}$$

$$\dot{m} = 0,01773 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m} = 63,8278 \text{ kg/h}$$

Portanto,  $\dot{m} = 0,01773 \text{ kg/s} = 62,83 \text{ kg/h}$ .



c)

c) Pela relação de  $h_{m, \text{horizontal}}$  e  $h_{m, \text{vertical}}$ :

$$h_{m, \text{horiz}} = 2,432 \cdot h_{m, \text{vert}}$$
$$10623,8 \text{ W/m}^2\text{K} = 2,432 \cdot h_{m, \text{vert}} \Rightarrow h_{m, \text{vert}} = 4368,33 \text{ W/m}^2\text{K}$$

• Cálculo de  $Re$ :

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\mu \cdot P} \Rightarrow Re = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\mu \cdot \pi \cdot D} = \frac{4 \cdot 0,017773 \text{ kg/s}}{3,9 \cdot 10^{-4} \cdot \pi \cdot 0,0054} = 2279$$
$$Re > 1800 \Rightarrow \text{turbulento!}$$

Portanto,  $h_{m, \text{vert}} = 4368,33 \text{ W/m}^2\text{K}$

E também  $Re = 2279 > 1800 \rightarrow \text{turbulento!}$

d)

d) Os valores estão condizentes! A temperatura da saída calculada na letra a) está entre  $60^\circ\text{C}$  e  $80^\circ\text{C}$ , o que é esperado.

O regime do tubo horizontal é laminar, enquanto no tubo vertical é turbulento. Sabe-se que quando o regime é turbulento, é mais preferível usar os tubos verticais, que proporcionam maior troca de energia. Portanto, o resultado é condizente!

