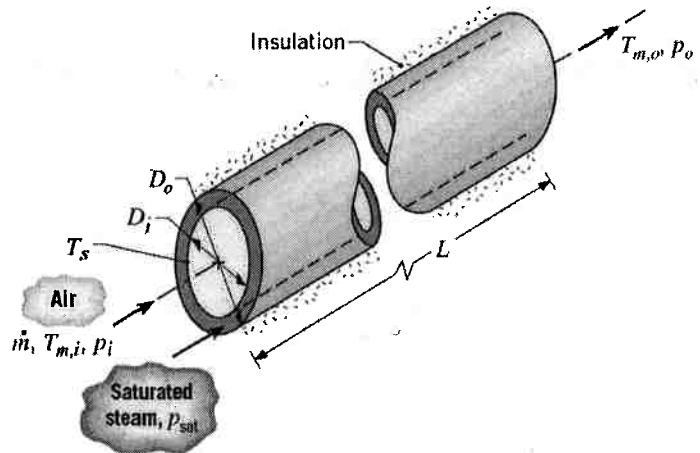


TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO: FORÇADA, ESCOAMENTO INTERNO

Um aquecedor de ar para aplicação industrial é constituído por dois tubos concêntricos, isolados para o lado externo. Nesse sistema o ar escoia através do tubo central (interior), que tem parede delgada. Vapor d'água saturado escoia através da região anular e a condensação do vapor mantém uma temperatura uniforme T_s na superfície do tubo. Considere condições nas quais o ar entra no tubo central, de diâmetro 50 mm, com uma pressão de 500 kPa e a uma temperatura $T_{m,i} = 17^\circ\text{C}$ e uma vazão de $0,005\text{ m}^3/\text{s}$, enquanto vapor saturado a 250 kPa condensa na superfície externa do tubo. Sendo o comprimento do sistema $L = 5\text{ m}$, quais é a temperatura de saída do ar, $T_{m,o}$? Qual é a vazão mássica do condensado que deixa o sistema?



Adota-se para o ar $T_m \approx 325\text{ K}$; $p = 500\text{ kPa}$

; $C_p = 1008\text{ J/kg}\cdot\text{K}$, $\mu = 196,4 \times 10^{-7}\text{ Pa}\cdot\text{s}$

$k = 0,0281\text{ W/m}\cdot\text{K}$; $Pr = 0,703$

Para vapor a $250\text{ kPa} \Rightarrow h_{ev} = 2181,55\text{ kJ/kg}$ ($T_{sat} = 400\text{ K}$)

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} = \frac{500}{0,287 \cdot (17 + 273)} \cdot 0,005 = 0,03\text{ kg/s}$$

$$Re_D = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot D_i \cdot \mu} = 38897 \text{ (esc. turb.; assumir-se compl. des.)}$$

$$Nu_D = 0,023 \cdot Re_D^{4/5} \cdot Pr^{0,4} = 93,85$$

$$h_i = (Nu_D \cdot k) / D = 52,7\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$

$$\frac{T_s - T_{m,o}}{T_s - T_{m,i}} = \exp\left(\frac{-\pi \cdot D_i \cdot h_i \cdot L}{\dot{m} \cdot C_p}\right)$$

$$\frac{127 - T_{m,o}}{127 - 17} = \exp\left(\frac{-\pi \cdot 0,05 \cdot 52,7 \cdot 5}{0,03 \cdot 1008}\right) \therefore \boxed{T_{m,o} = 99^\circ\text{C}}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{mo} - T_{mi}) = 0,03 \cdot 1008 \cdot (99 - 17)$$

$$\dot{Q} = 2480 \text{ W} = 2,48 \text{ kW}$$

Assumindo que o que o ar ganha o vapor perde:

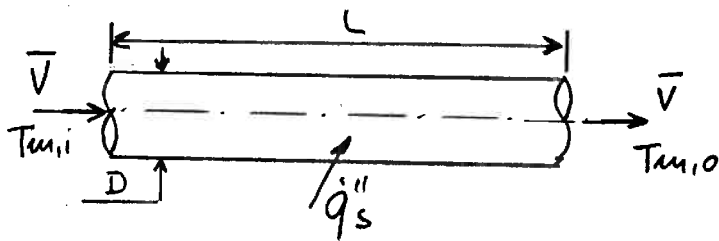
$$\dot{Q}_{\text{vap}} = \dot{m}_c \cdot h_{oe} \quad (h_{oe} = -h_{ew})$$

$$-2,48 = \dot{m}_c \cdot (-2181,55)$$

$$\therefore \dot{m}_c = 1,14 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO: FORÇADA, ESCOAMENTO INTERNO

No estágio final de produção, um produto farmacêutico é esterilizado pelo aquecimento de 25 °C a 75 °C à medida que ele se desloca, a 0,2 m/s, através de um tubo reto de aço inoxidável, com parede delgada e diâmetro de 12,7 mm. Um fluxo térmico uniforme é mantido por um aquecedor de resistência elétrica que se encontra enrolado ao redor da superfície externa do tubo. Se o tubo possui 10 m de comprimento, qual é o fluxo térmico requerido? Se o fluido entra no tubo com um perfil de velocidades plenamente desenvolvido e um perfil de temperaturas uniforme, qual é a temperatura da superfície na saída do tubo? As propriedades do fluido podem ser aproximadas por $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $C_p = 4000 \text{ J/(kg.K)}$, $\mu = 2 \times 10^{-3} \text{ kg/(m.s)}$, $k = 0,8 \text{ W/(m.K)}$ e $Pr = 10$.



$$L = 10 \text{ m}; \bar{V} = 0,2 \text{ m/s}; D = 12,7 \text{ mm}$$

$$T_{m,i} = 25^\circ\text{C}; T_{m,o} = 75^\circ\text{C}$$

$$\dot{m} = \rho \cdot \bar{V} \cdot A = 10^3 \cdot 0,2 \cdot (\pi/4) (0,0127)^2 = 0,0253 \text{ kg/s}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{m,o} - T_{m,i}) = 0,0253 \cdot 4000 \cdot (75 - 25) = 5060 \text{ W}$$

$$\dot{q}_s'' = \frac{\dot{Q}}{A_s} = \frac{5060}{\pi \cdot 0,0127 \cdot 10} \Rightarrow \boxed{\dot{q}_s'' = 12682 \text{ W/m}^2}$$

$$Re_D = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 0,2 \cdot 0,0127}{2 \times 10^{-3}} = 1270 \text{ (Esc. Laminar)}$$

$$x_{fd,t} = 0,05 \cdot Re_D \cdot Pr \cdot D = 0,05 \cdot 1270 \cdot 10 \cdot 0,0127 = 8,06 \text{ m}$$

Como na saída do tubo $x = L = 10 > x_{fd,t}$, então em $x = L$ o esc. é compl. desenv. $\Rightarrow Nu = 4,36$.

$$h)_{x=L} = \frac{Nu \cdot k}{D} = \frac{4,36 \cdot 0,8}{0,0127} = 274,6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

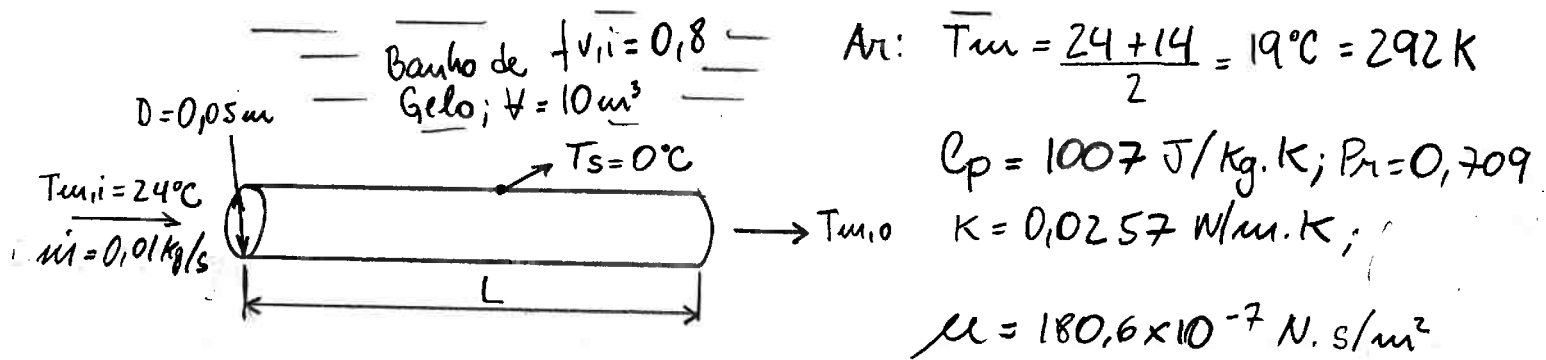
$$\dot{q}_s'' = h)_{x=L} \cdot (T_{s,o} - T_{m,o}) \Rightarrow T_{s,o} = T_{m,o} + \dot{q}_s'' / h)_{x=L}$$

$$T_{s,o} = 75 + 12682 / 274,6 \Rightarrow \boxed{T_{s,o} = 121^\circ\text{C}}$$

Notar que o fluido entra hidraulicamente desenvolvido, mas não termicamente, pois o perfil de temperatura na entrada é uniforme.

TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO: FORÇADA, ESCOAMENTO INTERNO

A seção de evaporação de uma bomba de calor está instalada no interior de um grande tanque de água, que é usado como uma fonte de calor durante o inverno. À medida que a energia é extraída da água, ela começa a congelar, criando um banho de água e gelo a 0°C , que pode ser usado para o resfriamento do ar durante o verão. Considere condições para o resfriamento durante o verão, nas quais o ar é passado pelo interior de um conjunto de tubos de cobre, cada um com diâmetro interno $D = 50\text{ mm}$, submerso no banho de água e gelo. Se o ar entra em cada tubo a uma temperatura média de $T_{m,e} = 24^\circ\text{C}$ e a uma vazão de $0,01\text{ kg/s}$, qual comprimento de tubo L fornecerá uma temperatura na saída de $T_{m,s} = 14^\circ\text{C}$? Com 10 tubos passando através de um tanque com volume total $V = 10\text{ m}^3$, que contém inicialmente 80% de gelo em volume, quanto tempo irá levar para fundir a totalidade do gelo? A massa específica e o calor latente de fusão do gelo são 920 kg/m^3 e $3,34 \times 10^5\text{ J/kg}$, respectivamente.



p/gelo: $\rho = 920\text{ kg/m}^3$ e $h_{se} = 3,34 \times 10^5\text{ J/kg}$.

$$Re_D = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot D \cdot \mu} = \frac{4 \cdot 0,01}{\pi \cdot 0,05 \cdot 180,6 \times 10^{-7}} = 14100$$

$$h = \frac{Nu_D \cdot K}{D} = \frac{K}{D} \cdot 0,023 \cdot Re_D^{4/5} \cdot Pr^{0,3} = 22,2\text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\frac{T_s - T_{m,o}}{T_s - T_{m,i}} = \exp\left(-\frac{\pi \cdot D \cdot L \cdot h}{\dot{m} \cdot C_p}\right) \Rightarrow \frac{0 - 14}{0 - 24} = \exp\left(-\frac{\pi \cdot 0,05 \cdot L \cdot 22,2}{0,01 \cdot 1007}\right)$$

$$\therefore \boxed{L = 1,56\text{ m}}$$

obs: $\dot{m} = 0,01\text{ kg/s}$ e em cada tubo.

$$\dot{Q}_{\text{ar}} = N \cdot \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{m,o} - T_{m,i}) = 10 \cdot 0,01 \cdot 1007 (14 - 24) = -1007\text{ W}$$

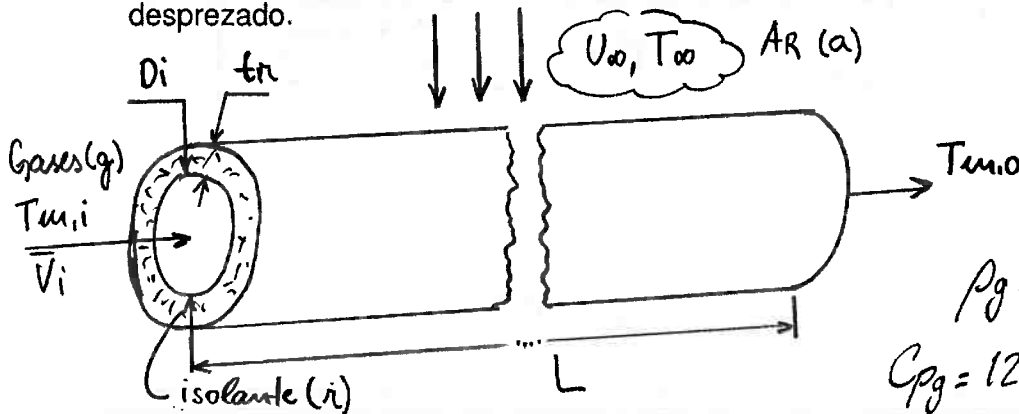
$$\dot{Q}_{\text{gelo}} = -\dot{Q}_{\text{ar}} = 1007\text{ W}$$

$$\dot{Q}_{\text{gelo}} \cdot \Delta t = m_{\text{gelo}} \cdot h_{se} = f_{v,i} \cdot V \cdot \rho \cdot h_{se} \Rightarrow \Delta t = \frac{f_{v,i} \cdot V \cdot \rho \cdot h_{se}}{\dot{Q}_{\text{gelo}}}$$

$$\Delta t = \frac{0,8 \cdot 10 \cdot 920 \cdot 3,34 \times 10^5}{1007} = 2,44 \times 10^6\text{ s} \Rightarrow \boxed{\Delta t = 28,3\text{ dias}}$$

TRANSFERÊNCIA DE CALOR: MODOS COMBINADOS

Os produtos de combustão de um queimador são direcionados para uma aplicação industrial através de um tubo metálico de parede delgada, com diâmetro $D_i = 1\text{ m}$ e comprimento $L = 100\text{ m}$. O gás entra no tubo a pressão atmosférica, com temperatura média e velocidade de $T_{m,e} = 1600\text{ K}$ e $u_{m,e} = 10\text{ m/s}$, respectivamente. Eles tem que sair do tubo com uma temperatura não inferior a $T_{m,s} = 1400\text{ K}$. Qual é a espessura mínima de um isolamento de alumina-sílica ($k_{iso} = 0,125\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) necessária para satisfazer a exigência na saída no caso das piores condições, que são o tubo exposto ao ar ambiente a $T_\infty = 250\text{ K}$ e com uma velocidade de escoamento cruzado $V = 15\text{ m/s}$? As propriedades do gás podem ser aproximadas pelas do ar e, como uma primeira estimativa, o efeito da espessura do isolante no coeficiente convectivo e na resistência térmica associada ao escoamento cruzado pode ser desprezado.



Gases são tratados como ar:

$$\bar{T}_m = \frac{1600 + 1400}{2} = 1500\text{ K}$$

$$\rho_g = 0,232\text{ kg/m}^3; \Pr_g = 0,685$$

$$C_{p,g} = 1230\text{ J/kg}\cdot\text{K}; \mu_g = 557 \times 10^{-7}\text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$k_g = 0,1\text{ W/m}\cdot\text{K}$$

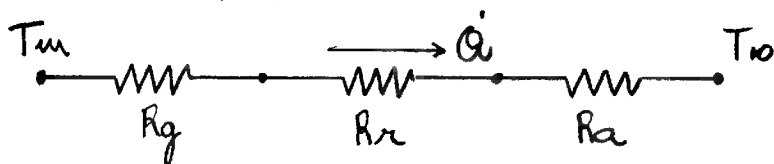
Aumentando $T_f \approx 300\text{ K}$ (escoamento externo ao tubo): $V_a = 15,89 \times 10^{-6}\text{ m/s}$,

$$k_a = 0,0263\text{ W/m}\cdot\text{K}; \Pr_a = 0,707$$

$$\dot{m}_g = \rho_i \cdot A \cdot \bar{V}_i = \rho_a(T_{m,i}) \cdot (\pi/4) \cdot D_i^2 \cdot \bar{V}_i = 0,218 \cdot (\pi/4) \cdot 1^2 \cdot 10 = 1,712\text{ kg/s}$$

$$Re_{Di} = \frac{4 \cdot \dot{m}_g}{\pi \cdot D_i \cdot \mu_g} = 39130 > 2100 \text{ (Esc. turb. Anunciado e compl. desenv.)}$$

$$h_g = \frac{Nu_{Di} \cdot k_g}{D_i} = \frac{k_g}{D_i} \cdot 0,023 \cdot Re_{Di}^{4/5} \cdot \Pr_g^{0,3} = 9,69\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$



$$\dot{Q} = (T_m - T_\infty) / R_{tot}$$

$$R_{tot} = R_g + R_r + R_a$$

$$R_{tot} = \frac{1}{U \cdot A}$$

$$\frac{T_\infty - T_{m,o}}{T_\infty - T_{m,i}} = \exp\left(-\frac{U \cdot A}{\dot{m} \cdot C_p}\right) = \exp\left(-\frac{1}{R_{tot} \cdot \dot{m} \cdot C_p}\right)$$

$$\frac{250 - 1400}{250 - 1600} = \exp\left(-\frac{1}{R_{tot} \cdot 1,712 \cdot 1230}\right) \Rightarrow R_{tot} = 2,96 \times 10^{-3}\text{ K/W}$$

$$R_g = \frac{l}{\pi \cdot D_i \cdot L \cdot h_g} = \frac{l}{\pi \cdot 1 \cdot 100 \cdot 9,69} = 3,285 \times 10^{-4} \text{ K/W}$$

O enunciado permite, como primeira aproximação, fazer $D_r \approx D_i$.

Assim,

$$Re_{D_i} = \frac{U_m \cdot D_i}{\nu_a} = 9,44 \times 10^5$$

$$h_a = \frac{Nu_{D_i} \cdot k_a}{D_i} = \frac{k_a}{D_i} \left\{ 0,3 + \frac{0,62 \cdot Re_{D_i}^{1/2} \cdot Pr_a^{1/3}}{\left[1 + (0,4/Pr_a)^{2/3}\right]^{1/4}} \cdot \left[1 + \left(\frac{Re_{D_i}}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \right\}$$

$$h_a = 30,86 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$R_a = \frac{l}{\pi \cdot D_i \cdot L \cdot h_a} = \frac{l}{\pi \cdot 1 \cdot 100 \cdot 30,86} = 1,031 \times 10^{-4} \text{ K/W}$$

$$R_r = R_{tot} - R_g - R_a = 2,528 \times 10^{-3} \text{ K/W}$$

$$R_r = \frac{\ln(D_r/D_i)}{2\pi \cdot k_r \cdot L} \Rightarrow 2,528 \times 10^{-3} = \frac{\ln(D_r/1)}{2\pi \cdot 0,125 \cdot 100}$$

$$D_r = 1,22 \text{ m} \Rightarrow r_r = (D_r - D_i)/2 = (1,22 - 1)/2 = 0,11 \text{ m}$$

$$\boxed{r_r = 11 \text{ cm}}$$

→ Reavaliar R_a e R_r , calculando T_s também e iterar até convergência.

TRANSFERÊNCIA DE CALOR: MODOS COMBINADOS

R-134a é transportado a 0,1 kg/s através de um tubo de Teflon com diâmetro interno $D_i = 25$ mm e diâmetro externo $D_o = 28$ mm, enquanto ar atmosférico a $V = 25$ m/s e 300 K escoam em escoamento cruzado sobre o tubo. Qual é a taxa de calor para o R-134a a 240 K, por unidade de comprimento do tubo?

Obs : $T_m = T_{m,i} = T_{m,o}$ q^{do} o R-134a está mudando de fase.

Subscritores : a \equiv ar, p \equiv teflon, R \equiv R-134a

p/ R-134a a $T_m = 240$ K $\Rightarrow \mu_R = 420,33 \times 10^{-6}$ Pa.s; $K_R = 0,1073$ W/m.K;

$C_{pR} = 1,2669$ kJ/kg.K; $Pr_R = 4,96$ (www.webbook.nist.gov/chemistry/fluid)

$T_f \approx 300$ K $\Rightarrow \nu_a = 15,89 \times 10^{-6}$ m²/s; $k_a = 0,0263$ W/m.K; $Pr_a = 0,707$

Teflon a ≈ 300 K $\Rightarrow K_p = 0,35$ W/m.K

$$Re_{D_o} = \frac{V_{\infty} \cdot D_o}{\nu_a} = \frac{25 \cdot 0,028}{15,89 \times 10^{-6}} = 4,405 \times 10^4$$

$$h_a = \frac{Nu_{D_o} \cdot k_a}{D_o} = \frac{k_a}{D_o} \left\{ 0,3 + \frac{0,62 \cdot Re_{D_o}^{1/2} \cdot Pr_a^{1/3}}{\left[1 + (0,4/Pr_a)^{1/4}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_{D_o}}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \right\} = 119,2 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$Re_{D_i} = \frac{4 \cdot \dot{m}_R}{\pi \cdot D_i \cdot \mu_R} = \frac{4 \cdot 0,1}{\pi \cdot 0,025 \cdot 420,33 \times 10^{-6}} = 12117 > 2100 \Rightarrow \text{Turb.}$$

$$h_R = \frac{Nu_{D_i} \cdot K_R}{D_i} = \frac{K_R \cdot 0,023 \cdot Re_{D_i}^{4/5} \cdot Pr^{0,4}}{D_i} = 346,2 \text{ W/m}^2 \cdot K$$

$$\dot{q}' = \frac{T_{\infty} - T_m}{\frac{1}{\pi \cdot D_i \cdot h_R} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2 \cdot \pi \cdot K_p} + \frac{1}{\pi \cdot D_o \cdot h_a}}$$

$$\dot{q}' = \frac{300 - 240}{\frac{1}{\pi \cdot 0,025 \cdot 346,2} + \frac{\ln(28/25)}{2 \cdot \pi \cdot 0,35} + \frac{1}{\pi \cdot 0,028 \cdot 119,2}}$$

$$\boxed{\dot{q}' = 326,7 \text{ W/m}}$$

Agora, achar $T_{s,o}$ e T_f e reiterar