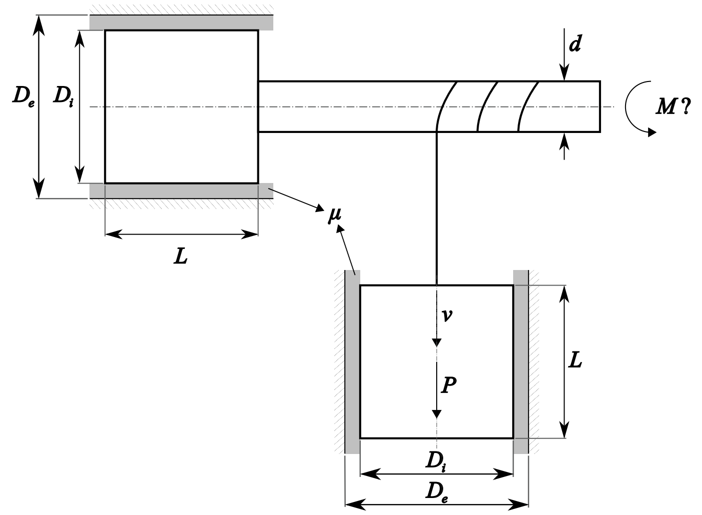
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PME3238 – FENÔMENOS DE TRANSPORTE   RECUPERAÇÃO   31/07/2017

Duração: 120 minutos

1ª Questão (3,0 pontos)

No sistema da figura, o corpo cilíndrico de peso P desce com velocidade constante v, fazendo girar o eixo acoplado ao mancal cilíndrico. Considerando que os perfis de velocidade no fluido são lineares, determine:

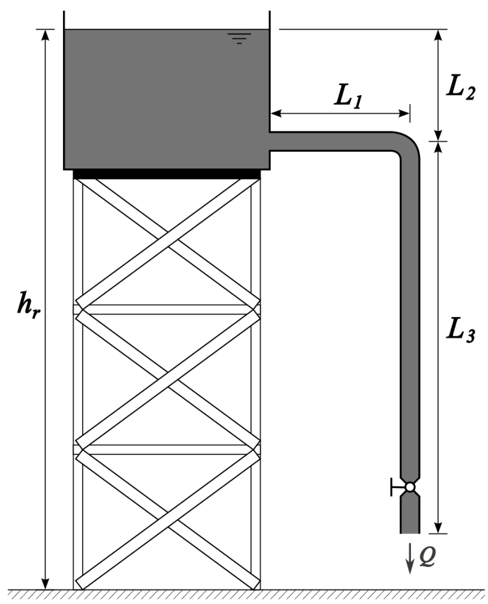


(a) A expressão analítica do momento externo M aplicado no eixo em função de v, da viscosidade dinâmica do fluido μ, do peso P e dos comprimentos indicados na figura. (***2,0 pontos***)

(b) O valor numérico do momento externo M quando $v = 2$ m/s, $\mu = 10^{-3}$ N·s/m^2, $P = 50$ N e as dimensões $L = 2/\pi$ m, $D_e = 50{,}2$ cm, $D_i = 50$ cm, $d = 10$ cm. Este momento é motor ou resistente? Qual a potência gasta? (***1,0 ponto***)

2ª Questão (3,5 pontos)

Uma tubulação de diâmetro interno D = 25mm e rugosidade média ε = 0,08mm é ligada a um reservatório elevado de água, conforme mostrado na figura. A vazão é controlada por uma válvula globo, localizada próxima à saída da tubulação. A água tem massa específica ρ = 1000kg/m^3 e viscosidade cinemática $\nu = 1\times10^{-6}$m^2/s e a aceleração da gravidade no local é g = 9,8m/s^2. Os comprimentos indicados na figura são h_r = 10 m, L_1 = 2 m, L_2 = 3 m, L_3 = 5,5 m.



a) Dados os coeficientes de perda de carga localizada da entrada K_{ent} = 0,5, da curva K_{curva} = 1,2 e da válvula globo quando totalmente aberta $K_{válvula}$ = 8,2, calcule a vazão que passa pela tubulação quando a válvula está totalmente aberta. (***2,0 pontos***)

b) A válvula é parcialmente fechada de forma se leve 5 segundos para encher um recipiente de 2 litros. Calcule o coeficiente de perda localizada da válvula nessa condição. (***1,5 ponto***)

3ª Questão (3,5 pontos)

Uma empresa europeia para a qual você está prestando consultoria está considerando mudar seus escritórios para um prédio mais moderno e pede para que você faça uma estimativa dos custos fixos que a empresa teria neste novo local. Um dos itens é o sistema de aquecimento, já que a empresa se situa numa cidade de invernos rigorosos e o prédio considerado tem a fachada toda em vidro de espessura de 15 mm e condutividade térmica de 1,4 W/(m·K). O escritório padrão neste novo prédio tem uma lateral envidraçada de 10 m de comprimento por 2,8 m de altura. Num dia típico de inverno, a temperatura do ar externo é de –5 °C e os ventos horizontais sopram a uma velocidade de 40 km/h, paralelamente à fachada do prédio. Calcule a carga térmica necessária, em kW, para manter o ar do ambiente interno a 20 °C, sabendo que as trocas térmicas que ocorrem nas demais paredes, teto e chão do escritório são desprezíveis frente à troca que acontece pela fachada envidraçada. Despreze também trocas por radiação e considere escoamento turbulento do vento sobre o vidro.

Convecção forçada – escoamento externo

Geometria	Condições	Correlação
Placa plana	Laminar; local; isotérmica; T_f; $0{,}6 \le Pr \le 50$	$Nu_x = 0{,}332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$
	Laminar; local; fluxo uniforme; T_f; $Pr \ge 0{,}6$	$Nu_x = 0{,}453 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$
	Laminar; médio; isotérmica; T_f; $0{,}6 \le Pr \le 50$	$\overline{Nu_L} = 0{,}664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3}$
	Turbulenta; local; isotérmica; T_f; $Re_x \le 10^8$; $0{,}6 \le Pr \le 60$	$Nu_x = 0{,}0296 Re_x^{4/5} Pr^{1/3}$
	Turbulenta; local; fluxo uniforme; T_f; $0{,}6 \le Pr \le 60$	$Nu_x = 0{,}0308 Re_x^{4/5} Pr^{1/3}$
	Turbulenta; médio; isotérmica; T_f; $Re_x \le 10^8$; $0{,}6 \le Pr \le 60$	$\overline{Nu_L} = 0{,}037 Re_L^{4/5} Pr^{1/3}$
	Mista; médio; isotérmica; T_f; $Re_x \le 10^8$; $0{,}6 \le Pr \le 60$	$\overline{Nu_L} = \left(0{,}037 Re_L^{4/5} - 871\right) Pr^{1/3}$
Cilindro	Médio; isotérmico; T_f;$Re_D\, Pr > 0{,}2$	$\overline{Nu_D} = 0{,}3 + \dfrac{0{,}62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1+\left(0{,}4/Pr\right)^{2/3}\right]^{1/4}}\left[1+\left(\dfrac{Re_D}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5}$

Convecção natural

Geometria	Correlação	Restrições
Placas verticais	$\overline{Nu_L} = \left\{0{,}825 + \dfrac{0{,}387 Ra_L^{1/6}}{\left[1+(0{,}492/Pr)^{9/16}\right]^{8/27}}\right\}^2$	Nenhuma
Placas inclinadas, com a superfície fria para cima ou com a superfície quente para baixo	$\overline{Nu_L} = \left\{0{,}825 + \dfrac{0{,}387 Ra_L^{1/6}}{\left[1+(0{,}492/Pr)^{9/16}\right]^{8/27}}\right\}^2$, $g \to g\cos\theta$	$0 \le \theta \le 60°$
Placas horizontais, com a superfície quente para cima ou a superfície fria para baixo	$\overline{Nu_L} = 0{,}54 Ra_L^{1/4}$ $\quad (L = A_s/P)$	$10^4 \le Ra_L \le 10^7$
	$\overline{Nu_L} = 0{,}15 Ra_L^{1/3}$ $\quad (L = A_s/P)$	$10^7 \le Ra_L \le 10^{11}$
Placas horizontais, com a superfície fria para cima ou com a superfície quente para baixo	$\overline{Nu_L} = 0{,}52 Ra_L^{1/5}$ $\quad (L = A_s/P)$	$10^4 \le Ra_L \le 10^9$; $Pr \ge 0{,}7$
Cilindro horizontal	$\overline{Nu_D} = \left\{0{,}60 + \dfrac{0{,}387 Ra_D^{1/6}}{\left[1+(0{,}559/Pr)^{9/16}\right]^{8/27}}\right\}^2$	$Ra_D \le 10^{12}$
Esfera	$\overline{Nu_D} = 2 + \dfrac{0{,}589 Ra_D^{1/4}}{\left[1+(0{,}469/Pr)^{9/16}\right]^{4/9}}$	$Ra_D \le 10^{11}$; $Pr \ge 0{,}7$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+q''' = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \qquad q''_{\text{cond}} = -k\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x} \qquad R_{t,\text{cond}} = \frac{L}{kA}$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(kr\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(k\frac{\partial T}{\partial \theta}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+q''' = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \qquad R_{t,\text{cond}} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi kL}$$

$$q''_{\text{conv}} = h(T_\infty - T_s) \qquad R_{t,\text{conv}} = \frac{1}{hA} \qquad Nu_L = \frac{hL}{k_f} \qquad Re_L = \frac{VL}{\nu} \qquad Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

$$Ra_L = \frac{g\beta\left|T_s - T_\infty\right|L^3}{\nu\alpha} \qquad \beta = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)_p \qquad q = mc_p\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}$$

$$E_{cn} = \sigma T^4 \qquad q''_{\text{rad}} = \varepsilon\sigma(T_{\text{viz}}^4 - T_s^4) \qquad \sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}\ \mathrm{W/(m^2{\cdot}K^4)}$$

$$\tau = \mu\frac{du}{dy} \qquad p_1 = \gamma h + p_2$$

$$\left(\frac{p_1}{\gamma}+\frac{\alpha_1\bar{V}_1^2}{2g}+z_1\right)-\left(\frac{p_2}{\gamma}+\frac{\alpha_2\bar{V}_2^2}{2g}+z_2\right)-h_m = h_{L_T} \qquad h_L = f\frac{L}{D}\frac{\bar{V}^2}{2g} \qquad h_s = K\frac{\bar{V}^2}{2g}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2{,}0\log\left(\frac{\varepsilon/D}{3{,}7}+\frac{2{,}51}{Re\sqrt{f}}\right) \qquad f = \frac{64}{Re} \qquad h_m = \frac{\dot{W}_m}{\gamma Q}$$

Questão 1.

a) Chamando o momento gerado pela tração no fio de M_f e o momento gerado pelas tensões viscosas no mancal de M_m, e considerando que o momento M seja motor, o diagrama de corpo livre do eixo fornece:

$$M = M_m - M_f \quad \text{0,2 pt}$$

M_m é dado por:

0,3 pt

$$M_m = \tau_m A_m \frac{D_i}{2} = \boxed{\mu \frac{\omega D_i / 2}{(D_e - D_i)/2}} \times \pi D_i L \times \frac{D_i}{2} \quad \text{0,3 pt}$$

0,3 pt

A rotação do eixo é dada por $\omega = \frac{v}{d/2}$, portanto:

$$M_m = \frac{\pi \mu v L D_i^3}{d(D_e - D_i)}$$

0,3 pt

M_f é dado por $M_f = \frac{F\,d}{2}$, onde F é a tração no fio. Para calcular o valor de F, fazemos o diagrama de corpo livre no corpo que desce, que resulta na equação:

0,3 pt

$$F = P - \tau A = P - \boxed{\mu \frac{v}{(D_e - D_i)/2}} \times \pi D_i L = P - \frac{2\pi \mu v D_i L}{D_e - D_i} \quad \text{0,3 pt}$$

Assim, o momento M é dado por:

$$M = \frac{\pi \mu v L D_i^3}{d(D_e - D_i)} - \left(P - \frac{2\pi \mu v D_i L}{D_e - D_i}\right)\frac{d}{2}$$

b) Substituindo os valores numéricos na expressão acima, chegamos a:

$$M = \frac{\pi \times 10^{-3} \times 2 \times 2/\pi \times 0{,}5^3}{0{,}1 \times 0{,}002} - \left(50 - \frac{2\pi \times 10^{-3} \times 2 \times 0{,}5 \times 2/\pi}{0{,}002}\right) \times \frac{0{,}1}{2} = 0{,}1\,\text{N.m}$$

O momento é motor (valor positivo). 0,5 pt

A potência é $M\omega = M\,2v/d = 4$ W. 0,5 pt

Questão 2

a) *2,0 pontos*

Sabemos que $Q = \overline{V} A_t$. Como temos o diâmetro do tubo, podemos calcular a área da seção A_t diretamente. Falta então calcular a velocidade média do escoamento. Chamando de L_T o comprimento total de tubulação ($L_T = L_1 + L_3$) e ΣK a somatória dos coeficientes de perda de carga singular ($\Sigma K = K_{ent} + K_{curva} + K_{válvula}$), podemos escrever a equação da energia entre a superfície livre do reservatório (ponto R) e a saída da tubulação (ponto S):

$$\left(\frac{p}{\gamma} + \cancel{\frac{\alpha \overline{V}^2}{2g}} + \cancel{z}\right)_R - \left(\frac{p}{\gamma} + \cancel{\frac{\alpha \overline{V}^2}{2g}} + z\right)_S = f \frac{L_T}{D}\frac{\overline{V}^2}{2g} + \Sigma K \frac{\overline{V}^2}{2g} \Rightarrow (z_R - z_S) = \left(f \frac{L_T}{D} + \Sigma K + \alpha\right)\frac{\overline{V}^2}{2g}$$

$$\overline{V} = \sqrt{\frac{2g(z_R - z_S)}{\left(f \frac{L_T}{D} + \Sigma K + \alpha\right)}} = \sqrt{\frac{2 \times 9{,}8 \times 8{,}5}{\left(f \frac{7{,}5}{0{,}025} + 9{,}9 + 1{,}0\right)}} = \sqrt{\frac{166{,}6}{300 f + 10{,}9}}$$

1,0 ponto

Para calcular o fator de atrito *f* precisamos da rugosidade relativa e do número de Reynolds:

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0{,}08}{25} = 0{,}0032 \qquad \text{Re} = \frac{\overline{V} D}{\nu} = \frac{0{,}025}{1 \times 10^{-6}} \overline{V} = 25000 \overline{V}$$

0,5 pontos

Para achar o valor de $\overline{V}$, precisamos recorrer a um procedimento iterativo. Usamos como primeira estimativa para *f*, por exemplo, o fator de atrito para regime completamente rugoso:

$$\frac{1}{\sqrt{f_{cr}}} = -2\log\left(\frac{\varepsilon / D}{3{,}7}\right) \Rightarrow f_{cr} = \left[-2\log\left(\frac{0{,}0032}{3{,}7}\right)\right]^{-2} = 0{,}0266$$

A partir daí, calculamos $\overline{V}$ através da equação da energia, e com $\overline{V}$ podemos calcular *Re*. A partir daí, calculamos um novo valor de *f* através da equação de Colebrook ou do diagrama de Moody. Iteramos até que o valor de *f* não varie mais dentro da tolerância desejada.

f	$\overline{V}$ (m/s)	*Re*	*f'*
0,0266	2,97	$7{,}43 \times 10^4$	0,0283
0,0283	2,93	$7{,}33 \times 10^4$	0,0283

Assim, a vazão que passa pelo tubo é:

$$Q = \overline{V} A_t = \overline{V} \frac{\pi D^2}{4} = 2{,}93 \times \frac{\pi \times 0{,}025^2}{4} = 0{,}00144 \text{m}^3/\text{s}$$

0,5 pontos

b) *1,5 ponto*

A equação da energia entre os mesmos pontos R e S é:

$$(z_R - z_S) = \left(f \frac{L_T}{D} + K_{ent} + K_{curva} + K_{valv} + \alpha\right)\frac{\overline{V}^2}{2g}$$

$$K_{valv} = \frac{2g(z_R - z_S)}{\overline{V}^2} - f\frac{L_T}{D} - K_{ent} - K_{curva} - \alpha$$

0,3 pontos

Sabe-se que $Q = \Delta\forall / \Delta t = 2 \times 10^{-3} / 5 = 0{,}0004\text{m}^3\text{/s}$, donde podemos calcular:

$$\overline{V} = Q / A = 4Q / \pi D^2 = 4 \times 0{,}0004 / \left(\pi \times 0{,}025^2\right) = 0{,}815\text{m/s}$$

0,5 pontos

Com o valor da velocidade, podemos calcular o número de Reynolds:

$$\text{Re} = \frac{\overline{V}D}{\nu} = \frac{0{,}815 \times 0{,}025}{1 \times 10^{-6}} = 2{,}04 \times 10^4$$

Usando a eq. de Colebrook ou o diagrama de Moody, obtemos $f = 0{,}0317$.

0,5 pontos

Substituindo os valores numéricos na equação da energia:

$$K_{valv} = \frac{2 \times 9{,}8 \times 8{,}5}{0{,}815^2} - 0{,}0317 \frac{7{,}5}{0{,}025} - 0{,}5 - 1{,}2 - 1 = 239$$

0,2 pontos

Questão 3:

Para calcular a carga térmica necessária, consideramos o fluxo unidimensional através da janela. O calor flui do ambiente interno por convecção natural para a superfície interna do vidro, daí por condução para a superfície externa do vidro e então por convecção forçada para o ar externo. Utilizando o conceito de circuito térmico, a taxa de transferência será dada por:

$$q_x = \frac{(L \times H)(T_{\infty,i} - T_{\infty,e})}{\frac{1}{h_i} + \frac{e}{k_v} + \frac{1}{h_e}} \tag{1}$$

1 ponto

É preciso determinar os coeficientes de película h_i (convecção natural) e h_e (convecção forçada).

Convecção natural – superfície interna:

Estimando que a temperatura da superfície interna do vidro seja $T_{s,i} = 277\,\mathrm{K}$, teremos uma temperatura de filme $T_{f,i} = 285\,\mathrm{K}$. As propriedades do ar a esta temperatura são:

$$\nu = 1{,}456 \times 10^{-5}\,\mathrm{m^2/s} \qquad k = 2{,}51 \times 10^{-2}\,\mathrm{W/(m \cdot K)} \qquad Pr = 0{,}711$$

$$\alpha = 2{,}05 \times 10^{-5}\,\mathrm{m^2/s} \qquad \beta = \frac{1}{T_{f,i}} = 3{,}51 \times 10^{-3}\,\mathrm{K^{-1}}$$

Calculando os adimensionais:

$$Ra_H = \frac{g\beta(T_{\infty,i} - T_{s,i})H^3}{\nu\alpha} = 4{,}04 \times 10^{10} \qquad \overline{Nu_H} = \left\{0{,}825 + \frac{0{,}387 Ra_H^{1/6}}{[1 + (0{,}492/Pr)^{9/16}]^{8/27}}\right\}^2 = 393$$

Portanto:

$$h_i = \frac{\overline{Nu_H} k}{H} = 3{,}53\,\mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$$

1 ponto

Convecção forçada – superfície externa:

Estimando que a temperatura da superfície externa do vidro seja $T_{s,e} = 272\,\mathrm{K}$, teremos uma temperatura de filme $T_{f,e} = 270\,\mathrm{K}$. As propriedades do ar a esta temperatura são:

$$\nu = 1{,}322 \times 10^{-5}\,\mathrm{m^2/s} \qquad k = 2{,}39 \times 10^{-2}\,\mathrm{W/(m \cdot K)} \qquad Pr = 0{,}715$$

Calculando os adimensionais:

$$Re_L = \frac{V_\infty L}{\nu} = 8{,}405 \times 10^6 \qquad \overline{Nu_L} = 0{,}037 Re^{4/5} Pr^{1/3} = 11461$$

Portanto:

$$h_e = \frac{\overline{Nu_L} k}{L} = 27{,}39\,\mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$$

1 ponto

Substituindo na eq. 1, temos $q_x = 2116\,\mathrm{W}$. Verificando as estimativas das superfícies interna e externa: $T_{s,i} = 272\,\mathrm{K}$ e $T_{s,e} = 271\,\mathrm{K}$. Vamos recalcular os coeficientes de película com estas temperaturas.

Convecção natural – superfície interna:

As propriedades do ar à temperatura de filme $T_{f,i} = 282{,}5\,\mathrm{K}$ são:

$$\nu = 1{,}433 \times 10^{-5}\,\mathrm{m^2/s} \qquad k = 2{,}49 \times 10^{-2}\,\mathrm{W/(m \cdot K)} \qquad Pr = 0{,}712$$
$$\alpha = 2{,}02 \times 10^{-5}\,\mathrm{m^2/s} \qquad \beta = 3{,}54 \times 10^{-3}\,\mathrm{K^{-1}}$$

Calculando os adimensionais: $Ra_H = 5{,}53 \times 10^{10}$ e $\overline{Nu_H} = 435$. Portanto, $h_i = 3{,}87\,\mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$.

Convecção forçada – superfície externa:

As propriedades do ar à temperatura de filme $T_{f,e} = 269{,}5\,\mathrm{K}$ são:

$$\nu = 1{,}318 \times 10^{-5}\,\mathrm{m^2/s} \qquad k = 2{,}39 \times 10^{-2}\,\mathrm{W/(m \cdot K)} \qquad Pr = 0{,}715$$

Calculando os adimensionais: $Re_L = 8{,}433 \times 10^6$ e $\overline{Nu_L} = 11493$. Portanto: $h_e = 27{,}42\,\mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$

Substituindo na eq. 1, temos $q_x = 2289\,\mathrm{W}$. Verificando as estimativas das superfícies interna e externa: $T_{s,i} = 272\,\mathrm{K}$ e $T_{s,e} = 271\,\mathrm{K}$, portanto os cálculos convegiram e a resposta final é

$$\boxed{q_x = 2289\,\mathrm{W}}$$

0,5 ponto