

11S.1

Método da Média Log das Diferenças de Temperatura para Trocadores de Calor com Múltiplos Passes e com Escoamento Cruzado

Embora as condições de escoamento em trocadores de calor com múltiplos passes ou com escoamento cruzado sejam mais complicadas, as Equações 11.6, 11.7, 11.14 e 11.15 ainda podem ser utilizadas caso a seguinte modificação seja efetuada na média logarítmica das diferenças de temperaturas [1]:

$$\Delta T_{ml} = F \Delta T_{ml,CC} \quad (11S.1)$$

Isto é, a forma apropriada para ΔT_{ml} é obtida aplicando-se um fator de correção ao valor de ΔT_{ml} que seria calculado na hipótese de escoamento em contracorrente. Assim, da Equação 11.17, $\Delta T_1 = T_{q,ent} - T_{f,sai}$ e $\Delta T_2 = T_{q,sai} - T_{f,ent}$.

Foram desenvolvidas expressões algébricas para o fator de correção F para diversas configurações de trocadores de calor casco e tubos e trocadores de calor com escoamento cruzado [1-3], e suas previsões podem ser representadas graficamente. Alguns resultados para configurações usuais de trocadores de calor são mostrados nas Figuras 11S.1 a 11S.4. A notação (T, t) é usada para especificar as temperaturas dos fluidos, estando a variável t sempre associada ao fluido que escoa no interior dos tubos. Com essa convenção, não importa qual fluido, se o quente ou o frio, escoa através do casco ou dos tubos. Uma implicação importante das Figuras 11S.1 a 11S.4 é que, se a variação de temperatura em um dos fluidos for desprezível, P ou R será igual a zero e F será igual a 1. Assim, o comportamento do trocador de calor é independente de sua configuração específica. Tal seria o caso se um dos fluidos mudasse de fase.

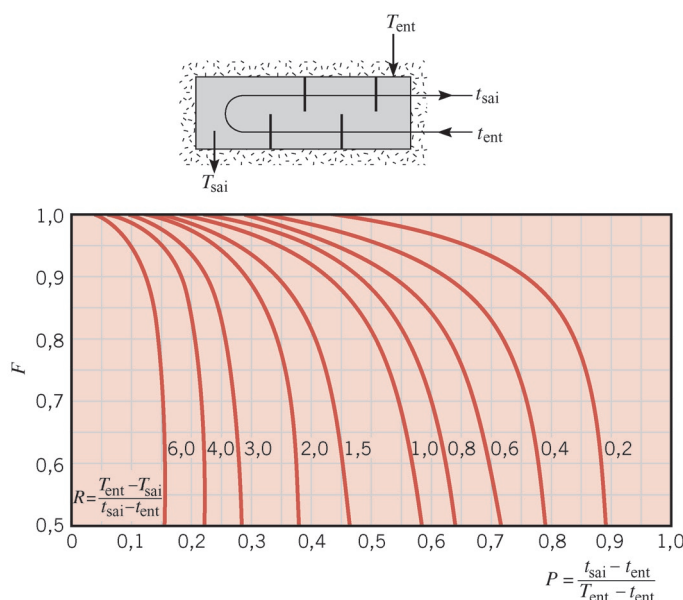


FIGURA 11S.1 Fator de correção para um trocador de calor casco e tubos com um passe no casco e qualquer múltiplo de dois (dois, quatro etc.) passes nos tubos.

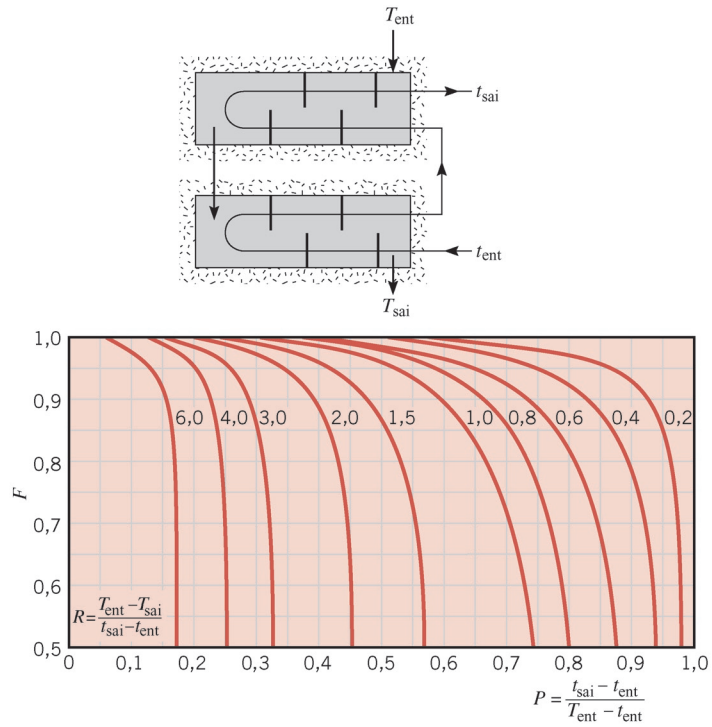


FIGURA 11S.2 Fator de correção para um trocador de calor casco e tubos com dois passes no casco e qualquer múltiplo de quatro (quatro, oito etc.) passes nos tubos.

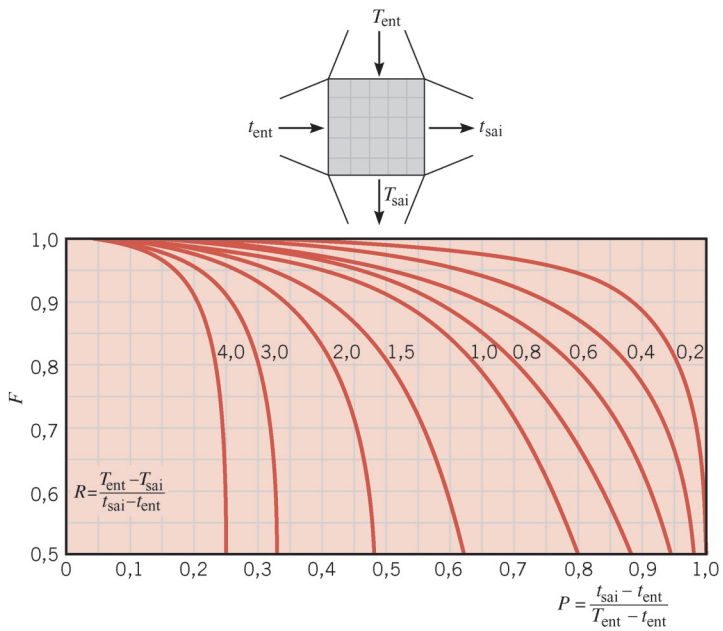


FIGURA 11S.3 Fator de correção para um trocador de calor de escoamento cruzado, com passe único, com os dois fluidos não-misturados.

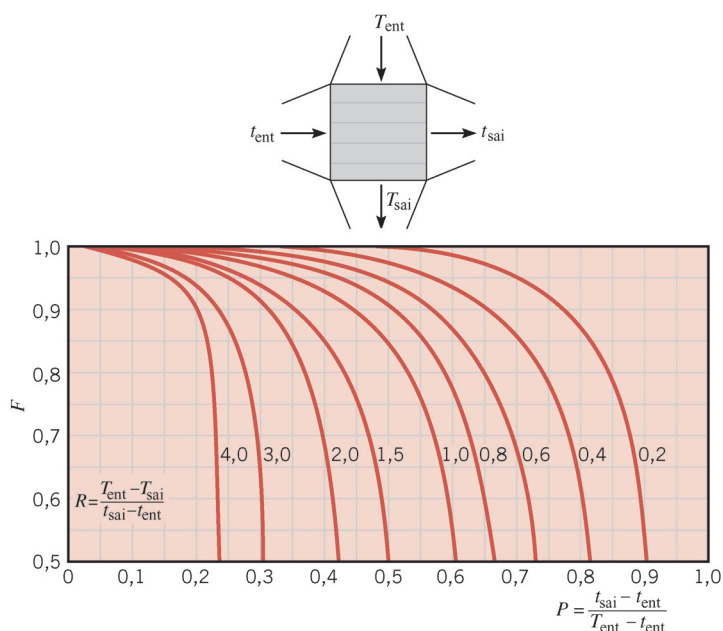


FIGURA 11S.4 Fator de correção para um trocador de calor de escoamento cruzado, com passe único, com um fluido misturado e o outro não-misturado.

EXEMPLO 11S.1

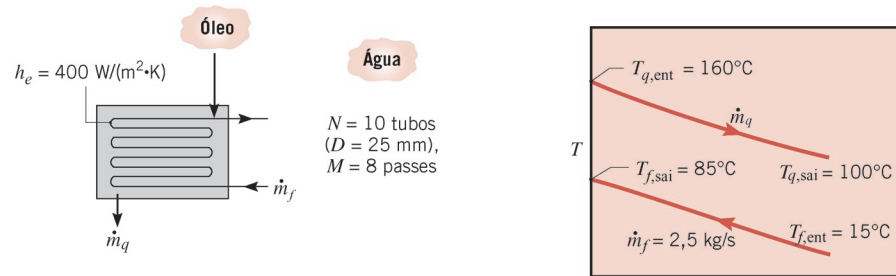
Um trocador de calor casco e tubos deve ser projetado para aquecer 2,5 kg/s de água de 15 a 85°C. O aquecimento deve ser feito pela passagem de óleo de motor aquecido, que está disponível a 160°C, pelo lado do casco do trocador de calor. Sabe-se que o óleo proporciona um coeficiente convectivo médio na superfície externa dos tubos igual a $h_e = 400 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. A água escoa no interior dos tubos, que são em número de dez. Os tubos, que possuem paredes delgadas, têm diâmetro $D = 25 \text{ mm}$, e cada um deles faz oito passes através do casco. Se o óleo deixa o trocador a uma temperatura de 100°C, qual é a sua vazão mássica? Qual deve ser o comprimento dos tubos para se atingir o aquecimento desejado?

SOLUÇÃO

Dados: Temperaturas de entrada e de saída dos fluidos em um trocador de calor casco e tubos, com 10 tubos que fazem oito passes.

Achar:

1. Vazão mássica do óleo necessária para atingir a temperatura de saída especificada.
2. Comprimento dos tubos necessário para se atingir o aquecimento especificado para a água.

Esquema:**Considerações:**

1. Perda de calor para a vizinhança e mudanças nas energias cinética e potencial desprezíveis.
2. Propriedades constantes.
3. Resistência térmica na parede do tubo e efeitos da deposição desprezíveis.
4. Escoamento da água nos tubos completamente desenvolvido.

Propriedades: Tabela A.5, óleo de motor novo ($\bar{T}_q = 130^\circ\text{C}$): $c_p = 2350 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$. Tabela A.6, água ($\bar{T}_f = 50^\circ\text{C}$): $c_p = 4181 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, $\mu = 548 \times 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$, $k = 0,643 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, $Pr = 3,56$.

Análise:

1. A partir do balanço de energia global, Equação 11.7b, a transferência de calor necessária no trocador é

$$q = \dot{m}_f c_{p,f} (T_{f,\text{sai}} - T_{f,\text{ent}}) = 2,5 \text{ kg/s} \times 4181 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} (85 - 15)^\circ\text{C}$$

$$q = 7,317 \times 10^5 \text{ W}$$

Assim, da Equação 11.6b,

$$\dot{m}_q = \frac{q}{c_{p,q} (T_{q,\text{ent}} - T_{q,\text{sai}})} = \frac{7,317 \times 10^5 \text{ W}}{2350 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \times (160 - 100)^\circ\text{C}} = 5,19 \text{ kg/s} \quad \triangleleft$$

2. O comprimento requerido dos tubos pode ser obtido a partir das Equações 11.14 e 11S.1, onde

$$q = UAF \Delta T_{\text{ml,CC}}$$

Da Equação 11.5,

$$U = \frac{1}{(1/h_i) + (1/h_e)}$$

onde h_i pode ser obtido primeiramente calculando-se o valor de Re_D . Com $\dot{m}_1 \equiv \dot{m}_f/N = 0,25 \text{ kg/s}$, definida como a vazão de água por tubo, a Equação 8.6 fornece

$$Re_D = \frac{4\dot{m}_1}{\pi D \mu} = \frac{4 \times 0,25 \text{ kg/s}}{\pi (0,025 \text{ m}) 548 \times 10^{-6} \text{ kg/(s} \cdot \text{m)}} = 23.234$$

Assim, o escoamento da água é turbulento e, usando a Equação 8.60, temos

$$Nu_D = 0,023 Re_D^{4/5} Pr^{0,4} = 0,023 (23.234)^{4/5} (3,56)^{0,4} = 119$$

$$h_i = \frac{k}{D} Nu_D = \frac{0,643 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}}{0,025 \text{ m}} 119 = 3061 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Donde

$$U = \frac{1}{(1/400) + (1/3061)} = 354 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

O fator de correção F é obtido a partir da Figura 11S.1, onde

$$R = \frac{160 - 100}{85 - 15} = 0,86 \quad P = \frac{85 - 15}{160 - 15} = 0,48$$

Portanto, $F \approx 0,87$. A partir das Equações 11.15 e 11.17, tem-se que

$$\Delta T_{\text{ml,CC}} = \frac{(T_{q,\text{ent}} - T_{f,\text{sai}}) - (T_{q,\text{sai}} - T_{f,\text{ent}})}{\ln [(T_{q,\text{ent}} - T_{f,\text{sai}})/(T_{q,\text{sai}} - T_{f,\text{ent}})]} = \frac{75 - 85}{\ln (75/85)} = 79,9^\circ\text{C}$$

Donde, como $A = N\pi DL$, onde $N = 10$ é o número de tubos,

$$L = \frac{q}{UN\pi DF \Delta T_{\text{ml,CC}}} = \frac{7,317 \times 10^5 \text{ W}}{354 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \times 10\pi(0,025 \text{ m})0,87(79,9^\circ\text{C})}$$

$$L = 37,9 \text{ m}$$

Comentários:

1. Com $(L/D) = 37,9 \text{ m}/0,025 \text{ m} = 1516$, a hipótese de condições de escoamento completamente desenvolvidas em todo o tubo é justificada.
2. Com oito passes, o comprimento do casco é de aproximadamente $L/M = 4,7 \text{ m}$.

Referências

1. Bowman, R. A., A. C. Mueller, and W. M. Nagle, *Trans. ASME*, **62**, 283, 1940.
2. *Standards of the Tubular Exchange Manufacturers Association*, 6th ed., Tubular Exchange Manufacturers Association, New York, 1978.
3. Jakob, M., *Heat Transfer*, Vol. 2, Wiley, New York, 1957.

Problemas

Método da Média Log das Diferenças de Temperaturas

- 11S.1** Resolva o Problema 11.9 usando o método MLDT.
11S.2 Resolva o Problema 11.10 usando o método MLDT.
11S.3 Resolva o Problema 11.14 usando o método MLDT.
11S.4 Resolva o Problema 11.15 usando o método MLDT.
11S.5 Resolva o Problema 11.23 usando o método MLDT.

- 11S.6** Resolva o Problema 11.32 usando o método MLDT.
11S.7 Resolva o Problema 11.44 usando o método MLDT.
11S.8 Resolva o Problema 11.47 usando o método MLDT.
11S.9 Resolva o Problema 11.52 usando o método MLDT.
11S.10 Resolva o Problema 11.59 usando o método MLDT.
11S.11 Resolva o Problema 11.70 usando o método MLDT.