

FA673 – Transferência de Calor e Massa

Lista 2

OBS.: Estas respostas podem conter erros. Assim, sejam críticos, questionem os resultados. Em caso de dúvidas, falar com Prof. Rafael ou PED/PAD.

1 – Sistemas de armazenamento de energia térmica em geral envolvem um leito de esferas sólidas, através do qual um gás quente escoar se o sistema está sendo carregado ou um gás frio se está sendo descarregado. No processo de carregamento, o calor transferido do gás quente aumenta a energia térmica armazenada dentro das esferas frias; durante a descarga, a energia armazenada diminui conforme o calor é transferido das esferas aquecidas para o gás refrigerante. Considere o leito com esferas de alumínio de 75 mm de diâmetro ($\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$, $c_p = 950 \text{ J/kg.K}$ e $k = 240 \text{ W/m.K}$) e o processo de carregamento para o qual o gás entra na unidade de armazenamento à temperatura de $T_\infty = 300^\circ\text{C}$. Se a temperatura inicial das esferas é de $T_i = 25^\circ\text{C}$ e o coeficiente de convecção é $h = 75 \text{ W/m}^2.\text{K}$, quanto tempo leva uma esfera próxima à entrada do sistema para acumular 90% da máxima energia térmica possível? Qual é a temperatura correspondente no centro da esfera? Há alguma vantagem em utilizar cobre em vez de alumínio?

2 – O coeficiente de transferência de calor para o ar escoando sobre uma esfera deve ser determinado pela observação do comportamento dinâmico da temperatura de uma esfera, que é fabricada em puro cobre. A esfera, que possui 12,7 mm de diâmetro, encontra-se a 66°C antes de ser inserido em uma corrente de ar a 27°C . Um termopar sobre a superfície externa da esfera indica uma temperatura de 55°C após transcorridos 69s da inserção da esfera na corrente de ar. Admita, e então justifique, que a esfera se comporta como um objeto espacialmente isotérmico e calcule o coeficiente de transferência de calor por convecção.

Resp.: $35 \text{ W/m}^2.\text{K}$

3 – Considere a solução em forma de série infinita para a parede plana com convecção. Calcule as temperaturas θ^* no seu plano intermediário ($x^* = 0$) e na superfície ($x^* = 1$), para $Fo = 0,1$ e 1 , usando $Bi = 0,1$; 1 e 10 . Considere somente os quatro primeiros autovalores. Com base nesses resultados, discuta a validade das soluções aproximadas.

4 – A parede de um forno a gás com 150 mm de espessura é composta de tijolo refratário ($k = 1,5 \text{ W/m.K}$, $\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$, $c_p = 1000 \text{ J/kg.K}$) e é bem isolada em sua superfície externa. A parede encontra-se a uma temperatura inicial uniforme de 20°C , quando os queimadores são ativados e a superfície interna exposta a produtos da combustão para os quais $T_\infty = 950^\circ\text{C}$ e $h = 100 \text{ W/m}^2.\text{K}$.

a) Qual a temperatura depois de duas horas do momento do acionamento dos queimadores no meio da parede de tijolos?

b) E a temperatura na superfície externa?

c) Refaça o exercício considerando a solução aproximada para condução transiente. Compare os resultados e comente.

5 – Uma grande chapa de alumínio (liga 2024), com espessura de 0,15 m, está inicialmente na temperatura uniforme de 300 K e é colocada num forno cuja temperatura ambiente é 800 K, e que tem um coeficiente de transferência de calor por convecção estimado em $500 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

- (a) Determinar o tempo necessário para o plano meridiano da chapa atingir 700 K.
- (b) Qual é a temperatura superficial da chapa, nestas condições?
- (c) Repetir os cálculos para uma chapa de aço inoxidável (tipo 304).

Resp.:

- (a) **12 min e 23 s**
- (b) **$T_s = 710 \text{ K}$**
- (c) **32 min e 36 s**
752,5 K

6 – Em um processo de têmpera, uma placa de vidro, que se encontra inicialmente a uma temperatura uniforme T_i , é resfriada pela redução de temperaturas em ambas as superfícies a T_s . A placa tem 20 mm de espessura, e o vidro tem difusividade térmica de $6 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

- a.) Quanto tempo levará para que a temperatura no plano médio atinja 50% de sua redução máxima de temperatura possível?
- b.) Se $(T_i - T_s) = 300^\circ\text{C}$, qual o máximo gradiente de temperatura no vidro no tempo acima?

Resp.:

- (a) **63,15s**
- (b) **$-2,36 \times 10^4^\circ\text{C/m}$**

7 – Um longo fio com diâmetro $D = 1 \text{ mm}$ está submerso em um banho de óleo que se encontra a $T_\infty = 25^\circ\text{C}$. O fio apresenta uma resistência elétrica por unidade de comprimento de $Re' = 0,01 \text{ }\Omega/\text{m}$. Se uma corrente de $I = 100\text{A}$ passa pelo fio e o coeficiente convectivo é $h = 500 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, qual é a sua temperatura em condições de regime estacionário? A partir do instante no qual a corrente é aplicada, quanto tempo é necessário para que a temperatura no fio seja 1°C inferior ao valor do regime estacionário? As propriedades termofísicas do fio são $\rho = 8000 \text{ kg/m}^3$, $c = 500 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ e $k = 20 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

8 – Uma camada de gelo é formada sobre o pára-brisa de um carro estacionado durante uma noite fria na qual a temperatura ambiente é de -20°C . Após o início da utilização do sistema de descongelamento, a superfície interna é subitamente exposta a uma corrente de ar a 30°C . Considerando que a espessura do pára-brisa é de 5mm e que o gelo se comporte como uma camada isolante na superfície externa, qual coeficiente de convecção interna irá permitir que a superfície externa alcance 0°C em 60s? As propriedades físicas do pára-brisa são $\rho = 2200 \text{ kg/m}^3$, $c = 830 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ e $k = 1,2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Resp.: $96 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

9 – Uma barra longa de 40 mm de diâmetro, fabricada em safira (óxido de alumínio) e inicialmente a uma temperatura uniforme de 800 K, é subitamente resfriada por um fluido

a 300 K tendo um coeficiente de transmissão de calor de $1600 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Após 35 s, a barra é enrolada em um isolante e não experimenta perdas de calor. Qual será a temperatura da barra após um longo período de tempo?

Resp: 497K

10 – Uma longa barra de plástico de 30 mm de diâmetro ($k = 0,3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ e $\rho c_p = 1040 \text{ kJ/m}^3\cdot\text{K}$) é uniformemente aquecida em um forno como preparação de uma operação de prensagem. Para melhores resultados, a temperatura na barra não deve ser menor que 200°C . Para qual temperatura uniforme a barra deve ser aquecida no forno, se, no pior caso, a barra permanece sobre um transportador por 3 min enquanto exposta a um resfriamento por convecção com o ar ambiente a 25°C e com um coeficiente de convecção de $8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$? Uma condição adicional para bons resultados é manter a diferença de temperatura máxima-mínima menor que 10°C . Essa condição é satisfeita, e, caso contrário, o que você poderia fazer para satisfazê-la?

Resp.: 254°C

11 – Esferas de rolamento de aço inoxidável (AISI 304) uniformemente aquecidas até 850°C são temperadas pelo resfriamento em um banho de óleo mantido a 40°C . O diâmetro da esfera é de 20 mm, e o coeficiente de convecção associado com o banho de óleo é de $1000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

a) Se o resfriamento ocorre até a temperatura da superfície da esfera atingir 100°C , quanto tempo a esfera deverá ser mantida no banho? Qual será a temperatura do centro ao término do período de resfriamento?

b) Se 10.000 esferas são resfriadas por hora, qual a taxa em que a energia deve ser removida pelo sistema de resfriamento do banho de óleo a fim de que a sua temperatura seja de 40°C ?

Resp.: a) 42s e 115°C

b) 39,13kW

12 – Uma pedra esférica de granizo de 5 mm de diâmetro é formada em nuvens de elevada altitude a -30°C . Se a pedra começa a cair através do ar morno a 5°C , quanto tempo ela levará para que a superfície externa comece a descongelar? Qual é a temperatura do centro do granizo nesse instante e quanto de energia (J) é transferida para a pedra? Um coeficiente de transmissão de calor por convecção de $250 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ pode ser considerado, e as propriedades do granizo podem ser tomadas como as propriedades do gelo.

Resp.: 12,1s; $-0,8^\circ\text{C}$ e -3,54J

13 - Um vaso esférico utilizado como um reator para a produção de produtos farmacêuticos tem uma parede de aço inoxidável ($k = 17 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) de 5 mm de espessura e diâmetro interno $D_i = 1,0 \text{ m}$. Durante a produção, o vaso é enchido com reagentes para os quais $\rho = 1100 \text{ kg/m}^3$, $c = 2400 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, enquanto reações exotérmicas desencadeiam energia à taxa volumétrica de $\dot{q} = 10^4 \text{ W/m}^3$. Como uma primeira aproximação, os reagentes podem ser considerados bem misturados e a capacidade térmica do vaso pode ser desprezada.

a) A superfície exterior do vaso é exposta ao ar ambiente ($T_\infty = 25^\circ\text{C}$) para o qual o coeficiente de convecção $h = 6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ pode ser considerado. Se a temperatura

inicial dos reagentes for 25°C , qual será a temperatura dos reagentes após 5 horas de processo? Qual será a temperatura correspondente na superfície externa do vaso?

- b) Explore o efeito da variação do coeficiente de convecção nas condições térmicas transientes no interior do reator.

Resp.: $84,1^{\circ}\text{C}$ e 83°C

14 - Uma parede plana de um forno é fabricada de aço carbono ($k = 60 \text{ W/m K}$, $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, $c = 430 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$) com espessura $L = 10 \text{ mm}$. A fim de proteger a parede dos efeitos da corrosão dos gases de combustão do forno, uma superfície da parede é revestida com um fino filme de cerâmica, para uma unidade de área superficial, tem uma resistência térmica de $R''_{\text{tf}} = 0,01 \text{ m}^2 \text{ K/W}$. A superfície oposta é bem isolada do ambiente.

Quando o forno entra em operação, a parede encontra-se a uma temperatura inicial $T_i = 300\text{K}$, e os gases de combustão a $T_{\infty} = 1300\text{K}$ entram no forno, promovendo um coeficiente de convecção de $h = 25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ no filme cerâmico. Considerando que a capacidade térmica do filme é desprezível, quanto tempo levará para a superfície interna do aço atingir a temperatura de $T_{s,i} = 1200\text{K}$? Qual é a temperatura $T_{s,o}$ da superfície exposta do filme cerâmico nesse instante?

Resp.: 3886 s e 1220 K