Principi di Ingegneria Chimica
Anno Accademico 2010-2011

Cognome	Nome	Matricola	Firma

Problema 1. Uno scambiatore di calore è costituito da due tubi coassiali di diametri D_1 e D_2, con pareti di spessore trascurabile e lunghezza utile per lo scambio L. Nel tubo interno entra acqua calda, con portata $\dot{m}_H$ e temperatura T_H^{IN}. Nella sezione anulare entra, in controcorrente col fluido caldo, acqua fredda a temperatura T_C^{IN}. Due manometri, disposti alle sezioni di ingresso e di uscita della sezione anulare, registrano le pressioni P_1 e P_2. Calcolare:

1. La portata di acqua fredda che circola nella sezione anulare, $\dot{m}_C$, ipotizzando che i parametri fisici dell'acqua fredda siano costanti e pari ai loro valori a T_C^{IN};
2. Il coefficiente globale di scambio tra il fluido caldo e il fluido freddo, U, ipotizzando che i parametri fisici dell'acqua siano costanti e pari ai loro valori a T_H^{IN};
3. Le temperature dei fluidi all'uscita dallo scambiatore, T_H^{OUT} e T_C^{OUT}.

Dati. $D_1 = 5$ cm, $D_2 = 7$ cm, $L = 1$ m, $\dot{m}_H = 1$ kg/s, $T_H^{IN} = 80$°C, $T_C^{IN} = 10$°C, $P_1 = 2$ bar, $P_2 = 1.98$ bar.

Problema 2. Un piccolo meteorite metallico, di forma praticamente sferica, di diametro D, densità ρ_m e calore specifico C_{Pm}, entra nell'atmosfera terrestre avendo una temperatura iniziale T_0. L'attrazione terrestre ne provoca la caduta verso la superficie terrestre, con una velocità che assume rapidamente il suo valore terminale, v_∞. Per effetto dell'attrito, sulla superficie del meteorite si produce calore, secondo un termine di generazione superficiale pari a $\tau_a v_\infty$, con $\tau_a =$ sforzo dovuto all'attrito. Il materiale che costituisce il meteorite ha una temperatura di ignizione pari a T_i.

Ipotizzando che: a) La densità e la temperatura dell'aria nella zona di interesse siano costanti e pari ai valori ρ_a, μ_a e T_a; b) per il meteorite sia consentita una analisi a parametri concentrati; c) i coefficienti di trasporto siano indipendenti dalla temperatura e pari ai valori iniziali; calcolare:

1. La velocità di caduta del meteorite, v_∞;
2. La portata di calore prodotta per attrito sulla superficie del meteorite, Q_a, e il valore iniziale della portata di calore scambiata dal meteorite per convezione con l'atmosfera circostante, Q_c, chiarendone il verso;
3. Dopo quanto tempo il meteorite si accende (cioè dopo quanto tempo la temperatura del meteorite raggiunge la temperatura di ignizione).

Dati. $D = 2$ m, $\rho_m = 5000$ kg/m³, $C_{Pm} = 2$ kJ/kg·K, $T_0 = 50$ K, $T_i = 1000$ K, $\rho_a = 0.3$ kg/m³, $\mu_a = 1.3\cdot10^{-5}$ Pa·s, $T_a = 200$ K.

Istruzioni: compilare innanzitutto con i propri dati la parte alta di questo foglio; per le risposte utilizzare solo questo foglio.

Problema 1. Uno scambiatore di calore è costituito da due tubi coassiali di diametri D_1 e D_2, con pareti di spessore trascurabile e lunghezza utile per lo scambio L. Nel tubo interno entra acqua calda, con portata $\dot{m}_H$ e temperatura T_H^{IN}. Nella sezione anulare entra, in controcorrente col fluido caldo, acqua fredda a temperatura T_C^{IN}. Due manometri, disposti alle sezioni di ingresso e di uscita della sezione anulare, registrano le pressioni P_1 e P_2. Calcolare:

1. La portata di acqua fredda che circola nella sezione anulare, $\dot{m}_C$, ipotizzando che i parametri fisici dell'acqua fredda siano costanti e pari ai loro valori a T_C^{IN};
2. Il coefficiente globale di scambio tra il fluido caldo e il fluido freddo, U, ipotizzando che i parametri fisici dell'acqua siano costanti e pari ai loro valori a T_H^{IN};
3. Le temperature dei fluidi all'uscita dallo scambiatore, T_H^{OUT} e T_C^{OUT}.

Dati. $D_1 = 5$ cm, $D_2 = 7$ cm, $L = 1$ m, $\dot{m}_H = 1$ kg/s, $T_H^{IN} = 80$°C, $T_C^{IN} = 10$°C, $P_1 = 2$ bar, $P_2 = 1.98$ bar.

$D_1 := 5\cdot cm \quad D_2 := 7\cdot cm \quad L := 1\cdot m \quad m_{pH} := 1\cdot\frac{kg}{s} \quad T_{IN.H} := 80\,°C \quad T_{IN.C} := 10\,°C$

$P_1 := 2\cdot bar \quad P_2 := 1.98\cdot bar$

$$R_h := \frac{\left(D_2^{\,2} - D_1^{\,2}\right)\cdot\pi}{4}\cdot\frac{1}{\pi\cdot\left(D_1 + D_2\right)} = 0.5\cdot cm$$

$v := 1\cdot\frac{m}{s}$ Given

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho_w\left(T_{IN.C}\right)} = \frac{v^2}{2}\cdot\left(f\left(\frac{v\cdot 4\cdot R_h\cdot\rho_w\left(T_{IN.C}\right)}{\mu_w\left(T_{IN.C}\right)}, 0\right)\cdot\frac{L}{R_h}\right) \qquad v_E := \mathrm{Minerr}(v) = 1.831\,\frac{m}{s}$$

$$m_{pC} := \frac{\pi\cdot\left(D_2^{\,2} - D_1^{\,2}\right)}{4}\cdot\rho_w\left(T_{IN.C}\right)\cdot v_E \qquad m_{pC} = 3.449\,\frac{kg}{s}$$

tubo interno

$$v_I := \frac{4\cdot m_{pH}}{\rho_w\left(T_{IN.H}\right)\cdot\pi\cdot D_1^{\,2}} = 0.524\,\frac{m}{s} \qquad N_{Re.I} := \frac{v_I\cdot D_1}{\nu_w\left(T_{IN.H}\right)} = 7.174\times 10^4$$

$$N_{Nu.I} := 0.026\cdot N_{Re.I}^{\,0.8}\cdot N_{Pr.w}\left(T_{IN.H}\right)^{0.33} = 259.826 \qquad h_I := \frac{N_{Nu.I}\cdot k_w\left(T_{IN.H}\right)}{D_1} = 3.476\times 10^3\cdot\frac{W}{m^2\cdot K}$$

shell esterno

$$v_E = 1.831\,\frac{m}{s} \qquad N_{Re.E} := \frac{v_E\cdot 4R_h}{\nu_w\left(T_{IN.C}\right)} = 2.715\times 10^4$$

$$N_{Nu.E} := 0.026\cdot N_{Re.E}^{\,0.8}\cdot N_{Pr.w}\left(T_{IN.C}\right)^{0.33} = 193.756 \qquad h_E := \frac{N_{Nu.E}\cdot k_w\left(T_{IN.C}\right)}{4\cdot R_h} = 5.678\times 10^3\cdot\frac{W}{m^2\cdot}$$

$$U := \left(\frac{1}{h_I} + \frac{1}{h_E}\right)^{-1} = 2.156\times 10^3\cdot\frac{W}{m^2\cdot K}$$

$T_{OUT.C} := 15\,°C \qquad T_{OUT.H} := 65\,°C \qquad \Delta T_{ml} := 40\,°C$ valori di primo tentativo

risolvere simultaneamente (per tentativi) le equazioni di bilancio e l'equazione di trasporto

Given

$$m_{pC} \cdot C_{P.w}(T_{IN.C}) \cdot (T_{OUT.C} - T_{IN.C}) = m_{pH} \cdot C_{P.w}(T_{IN.H}) \cdot (T_{IN.H} - T_{OUT.H}) = \pi \cdot D_1 \cdot L \cdot U \cdot \Delta T_{ml}$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{IN.H} - T_{OUT.C}) - (T_{OUT.H} - T_{IN.C})}{\ln\left[\frac{(T_{IN.H} - T_{OUT.C})}{(T_{OUT.H} - T_{IN.C})}\right]} \qquad \begin{pmatrix} T_{OUT.C} \\ T_{OUT.H} \\ \Delta T_{ml} \end{pmatrix} := \mathrm{Minerr}(T_{OUT.C}, T_{OUT.H}, \Delta T_{ml})$$

$T_{OUT.C} = 11.557 \cdot °C \qquad T_{OUT.H} = 74.634 \cdot °C \qquad \Delta T_{ml} = 66.52\ K$

oppure dal bilancio ricavo T.OUT.C e dall'equazione di trasporto (per tentativi) T.OUT.H:

$$m_{pC} \cdot C_{P.w}(T_{a.C}) \cdot (T_{OUT.C} - T_{IN.C}) = m_{pH} \cdot C_{P.w}(T_{IN.H}) \cdot (T_{IN.H} - T_{OUT.H})$$

$T_{OUT.C} := 15\,°C \qquad T_{OUT.H} := 65\,°C$ valori di primo tentativo

Given

$$T_{OUT.C} = \frac{T_{IN.C} \cdot m_{pC} \cdot C_{P.w}(T_{IN.C}) + m_{pH} \cdot C_{P.w}(T_{IN.H}) \cdot (T_{IN.H} - T_{OUT.H})}{m_{pC} \cdot C_{P.w}(T_{IN.C})}$$

$$m_{pH} \cdot C_{P.w}(T_{IN.H}) \cdot (T_{IN.H} - T_{OUT.H}) = \pi \cdot D_1 \cdot L \cdot U \cdot \frac{(T_{IN.H} - T_{OUT.C}) - (T_{OUT.H} - T_{IN.C})}{\ln\left[\frac{(T_{IN.H} - T_{OUT.C})}{(T_{OUT.H} - T_{IN.C})}\right]}$$

$$\begin{pmatrix} T_{OUT.H} \\ T_{OUT.C} \end{pmatrix} := \mathrm{Minerr}(T_{OUT.H}, T_{OUT.C}) = \begin{pmatrix} 74.634 \\ 11.557 \end{pmatrix} \cdot °C$$

Problema 2. Un piccolo meteorite metallico, di forma praticamente sferica, di diametro D, densità ρ_m e calore specifico C_{Pm}, entra nell'atmosfera terrestre avendo una temperatura iniziale T_0. L'attrazione terrestre ne provoca la caduta verso la superficie terrestre, con una velocità che assume rapidamente il suo valore terminale, v_∞. Per effetto dell'attrito, sulla superficie del meteorite si produce calore, secondo un termine di generazione superficiale pari a $\tau_a v_\infty$, con τ_a = sforzo dovuto all'attrito. Il materiale che costituisce il meteorite ha una temperatura di ignizione pari a T_i.

Ipotizzando che: a) La densità e la temperatura dell'aria nella zona di interesse siano costanti e pari ai valori ρ_a, μ_a e T_a; b) per il meteorite sia consentita una analisi a parametri concentrati; c) i coefficienti di trasporto siano indipendenti dalla temperatura e pari ai valori iniziali; calcolare:

1. La velocità di caduta del meteorite, v_∞;
2. La portata di calore prodotta per attrito sulla superficie del meteorite, Q_a, e il valore iniziale della portata di calore scambiata dal meteorite per convezione con l'atmosfera circostante, Q_c, chiarendone il verso;
3. Dopo quanto tempo il meteorite si accende (cioè dopo quanto tempo la temperatura del meteorite raggiunge la temperatura di ignizione).

Dati. D = 2 m, ρ_m = 5000 kg/m³, C_{Pm} = 2 kJ/kg·K, T_0 = 50 K, T_i = 1000 K, ρ_a = 0.3 kg/m³, μ_a = 1.3·10⁻⁵ Pa·s, T_a = 200 K.

$D := 2 \cdot m \quad \rho_m := 5000 \cdot \frac{kg}{m^3} \quad T_0 := 50 \cdot K \quad T_i := 1000 \cdot K \quad \rho_a := 0.3 \cdot \frac{kg}{m^3} \quad T_a := 200 \cdot K \quad \mu_a := 1.3 \cdot 10^{-5} \cdot Pa \cdot s$

$C_{P.m} := 2 \cdot \frac{kJ}{kg \cdot K}$

$$f(N_{Re}) := \text{if}\left[N_{Re} < 0.1, \frac{24}{N_{Re}}, \text{if}\left[N_{Re} < 6000, \left(\sqrt{\frac{24}{N_{Re}}} + 0.5407\right)^2, \text{if}\left(N_{Re} < 10^5, 0.44, 0.2\right)\right]\right]$$

$$C := \frac{D \cdot \rho_a}{\mu_a} \cdot \sqrt{\frac{4}{3} \cdot D \cdot g \cdot \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_a}} = 3.047 \times 10^7 \qquad f_1(N_{Re}) := C^2 \cdot N_{Re}^{-2}$$

$x := -2, -1.99 .. 10$

$N_{Re} := 10^6$

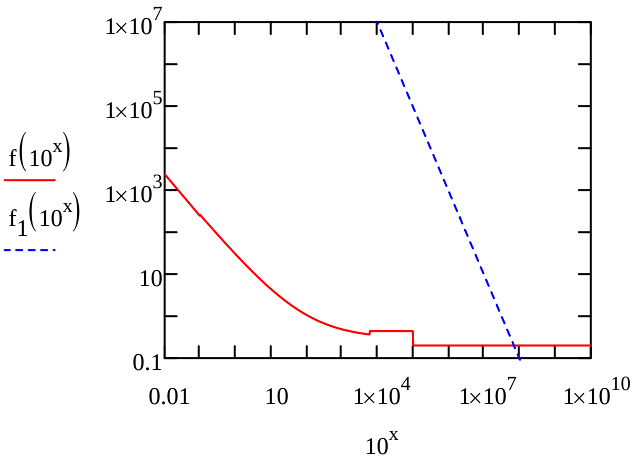
Given

$f_1(N_{Re}) = f(N_{Re})$

$N_{Re} := \text{Minerr}(N_{Re}) = 6.828 \times 10^7$

$f(N_{Re}) = 0.2$

$$v_{inf} := \frac{N_{Re} \cdot \mu_a}{D \cdot \rho_a} = 1.479 \times 10^3 \frac{m}{s}$$



$$F_a := f(N_{Re})\cdot\left(\frac{\pi\cdot D^2}{4}\right)\cdot\frac{\rho_a\cdot v_{inf}^2}{2} = 2.063\times10^5\,\mathrm{N} \qquad \tau_a := \frac{F_a}{\left(\pi\cdot D^2\right)} = 1.642\times10^4\,\mathrm{Pa} \qquad \tau_a\cdot v_{inf} = 2.428\times10^7\cdot\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$$

$$Q_a := \tau_a\cdot v_{inf}\cdot\pi\cdot D^2 = 3.052\times10^8\,\mathrm{W}$$

$$N_{Nu} := 2 + 0.60\cdot N_{Re}^{0.5}\cdot N_{Pr.A}(T_a)^{0.33} = 4.496\times10^3 \qquad h := \frac{N_{Nu}\cdot k_A(T_a)}{D} = 40.69\cdot\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2\cdot\mathrm{K}}$$

$$Q_c := h\cdot\frac{\pi\cdot D^2}{4}\cdot(T_0 - T_a) = -1.917\times10^4\,\mathrm{W}$$

Bilancio di energia in transitorio sul meteorite

$$\rho_m\cdot C_{P.m}\cdot\frac{\pi\cdot D^3}{6}\cdot\left(\frac{d}{dt}T(t)\right) = Q_a - h\cdot\frac{\pi\cdot D^2}{4}\cdot\left(T(t) - T_a\right) \qquad T(0) = T_0$$

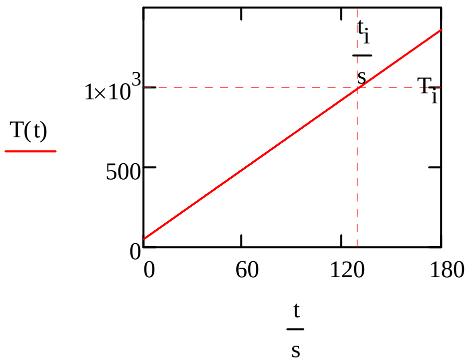
$$\left(\frac{4}{h\cdot\pi\cdot D^2}\cdot\rho_m\cdot C_{P.m}\cdot\frac{\pi\cdot D^3}{6}\right)\cdot\left(\frac{d}{dt}T(t)\right) = \left(\frac{4}{h\cdot\pi\cdot D^2}\cdot Q_a + T_a\right) - T(t)$$

$$\tau := \frac{4}{h\cdot\pi\cdot D^2}\cdot\rho_m\cdot C_{P.m}\cdot\frac{\pi\cdot D^3}{6} = 3.277\times10^5\,\mathrm{s} \qquad T_{ss} := \frac{4}{h\cdot\pi\cdot D^2}\cdot Q_a = 2.387\times10^6\,\mathrm{K}$$

$$\tau\cdot\left(\frac{d}{dt}T(t)\right) = T_{ss} - T(t)$$

$$\ln\left(\frac{T_{ss} - T(t)}{T_{ss} - T_0}\right) = -\frac{t}{\tau} \qquad T(t) := (T_0 - T_{ss})\cdot\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + T_{ss} \qquad t_i := -\tau\cdot\ln\left(\frac{T_{ss} - T_i}{T_{ss} - T_0}\right) = 130.426\,\mathrm{s}$$

$$t := 0\cdot s, 1\cdot s\,..\,180\cdot s$$



$$t := 0\cdot s, 3600\cdot s\,..\,3600\cdot 500\cdot s$$