

.....
NOME e COGNOME

.....
CORSO di LAUREA

.....
Voto

Esercizio 1

Il condensatore di un impianto frigorifero a compressione di vapore scambia calore per convezione con una portata d'aria \dot{m}_a entrante alla temperatura $t_{ae} = 20^\circ\text{C}$ ed uscente alla temperatura $t_{au} = 30^\circ\text{C}$.

In esso circola una portata $\dot{m}_f = 0.04 \text{ kg/s}$ di R-134a, entrante nello stato di vapore surriscaldato alla temperatura $t_{fe} = 60^\circ\text{C}$ ed uscente alla stessa pressione nello stato di liquido saturo alla temperatura $t_{fu} = 40^\circ\text{C}$.

Con l'ausilio del diagramma (p, h) allegato, e nell'ipotesi che la trasformazione subita dall'aria di raffreddamento avvenga a pressione costante, calcolare:

1. Il flusso termico scambiato q in [kW];
2. La portata d'aria \dot{m}_a in [kg/s], schematizzando l'aria come un gas ideale con calore specifico a pressione costante $c_{pa} = 1.03 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$;
3. La generazione complessiva di entropia per unità di tempo \dot{S}_{irr} , in [kW/K], al condensatore.

Esercizio 2

Un riscaldatore elettrico ad immersione, schematizzabile come un cilindro di diametro $D = 10 \text{ mm}$ e lunghezza $L = 200 \text{ mm}$, ha una potenza nominale $q = 350 \text{ W}$.

Trascurando il contributo dello scambio termico per irraggiamento, calcolare:

1. La temperatura superficiale T_s raggiunta dal riscaldatore se questo, disposto orizzontalmente, viene inserito in un serbatoio d'acqua di rilevanti dimensioni nel quale l'acqua ha una temperatura $T_\infty = 20^\circ\text{C}$;
2. La temperatura superficiale T_s raggiunta dal riscaldatore se questo, sempre disposto orizzontalmente, viene accidentalmente fatto funzionare in aria, con la temperatura di quest'ultima pari anch'essa a $T_\infty = 20^\circ\text{C}$.

Note:

- Per valutare il coefficiente di scambio termico convettivo si utilizzi la seguente correlazione (Churchill & Chu, 1975), specifica per convezione naturale da cilindri orizzontali:

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h} D}{k} = \left\{ 0.60 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{\left[1 + (0.559 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad \text{valida per} \quad 10^{-5} < Ra_D < 10^{12}$$

- Si assumano - ad un'opportuna temperatura - le seguenti proprietà termofisiche:

$$\begin{array}{llll} \text{Acqua:} & k = 0.634 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}; & \nu = 0.625 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}; & \alpha = 1.531 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}; & Pr = \nu / \alpha = 4.08; & \beta = 400.4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \\ \text{Aria:} & k = 0.100 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}; & \nu = 2.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}; & \alpha = 3.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}; & Pr = \nu / \alpha = 0.686; & \beta = 666.7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \end{array}$$

Suggerimento:

Utilizzare una procedura iterativa per tenere conto della dipendenza del coefficiente \bar{h} dalla temperatura T_s .

Soluzioni

Esercizio 1

1. Dal diagramma (p,h):

$$\begin{aligned} h_{fe} &= 440 \text{ kJ/kg} & h_{fu} &= 256 \text{ kJ/kg} \\ s_{fe} &= 1.77 \text{ kJ/(kg K)} & s_{fu} &= 1.18 \text{ kJ/(kg K)} \end{aligned}$$

$$q = \dot{m}_f (h_{fe} - h_{fu}) = 0.04 \cdot (440 - 256) = 7.36 \text{ kW}$$

2. $q = \dot{m}_f (h_{fe} - h_{fu}) \equiv \dot{m}_a (h_{au} - h_{ae})$ da cui:

$$\dot{m}_a = \frac{q}{h_{au} - h_{ae}} = \frac{q}{c_p (t_{au} - t_{ae})} = \frac{7.36}{1.03 (30 - 20)} = 0.715 \text{ kg/s}$$

3. Dal bilancio di entropia per sistemi aperti in regime stazionario:

$$\dot{S}_{irr} = \dot{m}_a (s_{au} - s_{ae}) + \dot{m}_f (s_{fu} - s_{fe})$$

e per $p = \text{cost}$:

$$s_{au} - s_{ae} = c_{pa} \ln \frac{T_{au}}{T_{ae}} \quad \text{da cui:}$$

$$\dot{S}_{irr} = \dot{m}_a c_{pa} \ln \frac{T_{au}}{T_{ae}} + \dot{m}_f (s_{fu} - s_{fe}) = 1.103 \times 10^{-3} \text{ kW/K}$$

Esercizio 2

1. $q = A \bar{h} (T_s - T_\infty) = \pi D L \bar{h} (T_s - T_\infty)$ da cui:

$$T_s = T_\infty + \frac{q}{\pi D L \bar{h}} \quad \text{con:}$$

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_D k}{D} \quad \text{ed il numero di Nusselt è dato dalla:}$$

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h} D}{k} = \left\{ 0.60 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{\left[1 + (0.559 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad \text{dove:}$$

$$Ra_D = \frac{g \beta \Delta T D^3}{\nu \alpha} \quad \text{e sostituendo i valori numerici:}$$

$$Ra_D|_{acqua} = 41050 (T_s - 20)$$

Si può pertanto procedere per via iterativa, assegnando un primo valore di tentativo a T_s , che chiamiamo T_s^* , calcolando quindi nell'ordine Ra_D , \overline{Nu}_D , \bar{h} ed infine T_s . Si corregge quindi il valore di T_s^* sino a quando la differenza fra i due valori, $(T_s - T_s^*)$, è minore di una tolleranza scelta (ad esempio 1 °C). Partendo ad esempio da $T_s^* = 100$ °C:

$T_s^* \text{ [°C]}$	Ra_D	\overline{Nu}_D	$\bar{h} \text{ [W/(m}^2 \text{ K)]}$	$T_s \text{ [°C]}$	Correzione [°C]
100	3.284×10^6	24.4	1546	56	-10
90	2.874×10^6	23.5	1487	57.4	-20
70	2.053×10^6	21.27	1349	61.3	-5
65	1.847×10^6	20.63	1308	62.6	-2
63	1.765×10^6	20.36	1291	63.15	OK

Risulta perciò, con buona approssimazione, che $T_s = 63$ °C.

2. Nel caso di aria si può procedere in modo analogo, ottenendo tuttavia, per Ra_D , la relazione:

$$Ra_D|_{aria} = 0.0779(T_s - 20)$$

Ovviamente in aria il coefficiente convettivo è molto minore, almeno di un ordine di grandezza.

Assumendo, ad esempio, $\bar{h}_{aria} = \bar{h}_{acqua} / 10$, si avrebbe $T_s = 450$ °C. Si può quindi assegnare un valore di primo tentativo $T_s^* = 450$ °C:

T_s^* [°C]	Ra_D	\overline{Nu}_D	\bar{h} [W/(m ² K)]	T_s [°C]	Correzione [°C]
500	37.4	1.41	14.06	3981	+500
1000	76.3	1.59	15.88	3529	+500
1500	115.3	1.71	17.08	3282	+500
2000	154.24	1.80	18.01	3113	+500
2500	193.19	1.88	18.78	2986	+250
2750	212.67	1.91	19.12	2933	+150
2900	224.35	1.93	19.32	2904	OK

Perciò in aria si otterrebbe $T_s = 2900$ °C !

Tale temperatura non è ovviamente sostenibile, e quindi vi sarebbe la bruciatura del riscaldatore. Tuttavia in questo caso andrebbe considerato, viste le elevate temperature in gioco, il contributo dell'irraggiamento.

In ogni caso tali riscaldatori non possono sostenere temperature maggiori di 800-1000 °C, e quindi non possono essere utilizzati in aria.