

# Esercitazione di Meccanica dei fluidi con Fondamenti di Ingegneria Chimica

Esercitazione 3 (FIC) – 17 Dicembre 2015

## Convezione naturale e forzata (II)

### Esercizio 1 – Convezione naturale su una sfera di acciaio

Si consideri una sferetta di acciaio ( $\rho=7000 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_p=550 \text{ J/kg/K}$ ) avente diametro pari a  $D=(10+0.5 \cdot X) \text{ mm}$  sospesa in aria in quiete alla pressione atmosferica e alla temperatura di  $25^\circ\text{C}$ . La sferetta si trova inizialmente ad una temperatura di  $T_0=(100-X)^\circ\text{C}$  ed riceve un apporto termico (ad esempio per radiazione solare) uniformemente distribuito su tutta la superficie e pari a  $q=200 \text{ W/m}^2$ .

- Si determini la temperatura di regime a cui si porta la sferetta.
- Si determini il tempo necessario perché la temperatura della sferetta si abbassi di  $20^\circ\text{C}$  rispetto alla temperatura iniziale.

Per la stima del numero di Nusselt si utilizzi la correlazione (semplificata)  $Nu_D = 0.6Gr_D^{1/4} Pr^{1/4}$ . Si ritenga la sfera a temperatura uniforme durante tutto il processo di raffreddamento.

**Nota.** Ove utile, si tenga conto della seguente soluzione (approssimata) per l'integrale sotto riportato:

$$\int_{x_0}^{x_f} \frac{dx}{x^{5/4} - \gamma} \approx \frac{\left[ \ln \left( x - \frac{\gamma}{\bar{x}^{1/4}} \right) \right]_{x_0}^{x_f}}{\bar{x}^{1/4}}, \quad \text{dove } \bar{x} = \frac{x_0 + x_f}{2}$$

### Esercizio 2 - Convezione naturale e forzata intorno ad una sfera

Una sfera di acciaio di diametro pari a  $(3+0.1x) \text{ cm}$  si trova immersa in aria in quiete. Una resistenza elettrica interna fa sì che la sua temperatura (che può essere considerata uniforme) sia costante e pari a  $100^\circ\text{C}$ . L'aria circostante si trova invece a una temperatura pari a  $25^\circ\text{C}$  e alla pressione atmosferica.

- Si determini la potenza che la resistenza elettrica deve fornire alla sfera affinché la sua temperatura possa mantenersi costante nel tempo.
- Si determini la temperatura a cui si porta la sfera dopo  $5 \text{ minuti}$ , qualora l'aria intorno alla sfera non sia più in quiete, ma abbia una velocità di  $(13-0.1x) \text{ m/s}$ , immaginando che la resistenza elettrica continui comunque a fornire una potenza pari a quella calcolata al punto A. Si determini inoltre la temperatura di regime a cui tende a portarsi la sfera.

Si consideri costante nel tempo il coefficiente di scambio termico.

<b>Proprieta' dell'acciaio</b>		
Densita'	7.87	$\text{g/cm}^3$
Calore specifico	0.5	$\text{kJ/kg/K}$

<b>Numero di Nusselt (convezione naturale)</b>
$Nu_D = 2 + 0.6Gr_D^{1/4} Pr^{1/4}$

<b>Numero di Nusselt (convezione forzata)</b>
$Nu_D = 2 + \left( 1.6Re_D^{1/3} + 0.6Re_D^{1/2} + 0.005Re_D^{0.8} \right) \cdot Pr^{1/3}$

### Esercizio 3 – Raffreddamento di una corrente di olio

Una corrente di olio percorre una lunga tubazione liscia in acciaio (conducibilità termica pari a  $60 \text{ W/m/K}$ ), avente diametro interno pari a  $D=(25+0.1x) \text{ cm}$  e spessore di  $5 \text{ mm}$  alla velocità di  $(10-0.1x) \text{ m/s}$ . Una parte del tubo, lunga  $(1200-20x) \text{ m}$ , passa attraverso l'acqua di un lago alla temperatura di  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Il coefficiente di scambio termico in corrispondenza del lato esterno (tubo/lago) è stato stimato pari a circa  $30 \text{ W/m}^2/\text{K}$ . Sapendo che in corrispondenza della sezione di ingresso nel lago la temperatura dell'olio è pari a  $60^\circ\text{C}$ , si determini:

- la temperatura dell'olio in corrispondenza della sezione di uscita dal lago;
- la potenza termica scambiata dall'olio nel tratto di tubazione sommersa;
- la potenza di pompaggio necessaria per vincere le perdite di pressione e assicurare il flusso dell'olio nel tubo, limitatamente al solo tratto preso in considerazione.

Per semplicità si assumano costanti le proprietà fisiche dell'olio. Inoltre si consideri il flusso dell'olio termicamente e idraulicamente sviluppato in corrispondenza della sezione di ingresso nel lago.

<b>Scambio termico lato interno della tubazione</b>		
$Nu_D = 3.66$	$Re_D \leq 2300$	moto laminare
$Nu_D = 0.023 \cdot Re_D^{0.80} Pr^{1/3}$	$Re_D > 10000$	moto turbolento

<b>Proprietà dell'olio</b>		
Densità	0.900	$\text{g/cm}^3$
Conducibilità termica	0.145	$\text{W/m/K}$
Viscosità dinamica	0.170	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
Calore specifico	450	$\text{cal/kg/K}$

### Esercizio 4 – Riscaldamento di una sferetta metallica

Una sferetta metallica di diametro pari a  $D=(2+0.1\cdot x) \text{ cm}$  è esposta alla radiazione solare per un flusso medio di calore pari a  $(550+5\cdot x) \text{ W/m}^2$ . L'oggetto è sospeso in ambiente ventilato d'aria alla temperatura di  $25^\circ\text{C}$ , e il coefficiente di scambio termico intorno ad esso può essere stimato pari a circa  $0.015 \text{ kcal/m}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$ .

- Si determini la temperatura di regime che la sfera raggiungerebbe in corrispondenza di un tempo infinitamente lungo.
- Immaginando che la sferetta si trovi inizialmente alla stessa temperatura dell'aria ( $25^\circ\text{C}$ ), e che al tempo  $t=0$  venga improvvisamente esposta alla radiazione solare, si stimi il tempo necessario perché essa possa raggiungere una temperatura di  $30^\circ\text{C}$ . Si ipotizzi per semplicità che la sferetta sia a temperatura uniforme.

Si assuma che la sferetta abbia una densità pari a  $7.80 \text{ g/cm}^3$  e un calore specifico di  $450 \text{ J/kg/K}$ .

### Esercizio 5 - Riscaldamento di un cilindro metallico

Un cilindro di acciaio, di lunghezza  $20 \text{ cm}$  e diametro  $2 \text{ cm}$ , inizialmente alla temperatura di  $5^\circ\text{C}$ , viene posto in una corrente d'aria avente velocità pari a  $5 \text{ m/s}$  e temperatura di  $25^\circ\text{C}$ . Contemporaneamente sulla superficie del cilindro incide la radiazione solare, stimabile pari a  $650 \text{ W/m}^2$ . Si chiede di determinare il tempo necessario perché il cilindro si porti alla temperatura di  $22^\circ\text{C}$ , trascurando i fenomeni di convezione naturale e assumendo che la sua temperatura sia uniforme. Per semplicità si trascurino le due superfici di base del cilindro.

	<b>Correlazione</b>	<b>Dcaratteristica</b>
<b>Convezione forzata intorno ad un cilindro orizzontale</b>	$\overline{Nu}_D = 0.30 + \frac{0.62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.40}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5}$	Diametro del cilindro

### Esercizio 6 - Dissipazioni termiche su un serbatoio cilindrico

Un serbatoio cilindrico, di lunghezza esterna 1 m e diametro esterno 0.30 m, è riempito con un olio avente temperatura di 60°C. L'aria che circonda il serbatoio è in quiete ed ha una temperatura di 20°C e lo spessore delle pareti in acciaio del serbatoio pari a 5 mm. Trascurando i fenomeni di convezione naturale all'interno del serbatoio e assumendo che la temperatura del fluido al suo interno sia uniforme, si calcolino le dissipazioni termiche (corrispondenti alla situazione descritta) attraverso la superficie laterale del serbatoio.

Di quanto si abbassano le dissipazioni se la superficie esterna del cilindro viene rivestita con un sottile strato di 5.0 mm di isolante?

	<b>Correlazione</b>	<b>Dcaratteristica</b>
<b>Convezione naturale intorno ad un cilindro orizzontale</b>	$\overline{Nu}_D = \left\{ 0.60 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0.559}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2$	Diametro del cilindro

### Esercizio 7 - Condensazione di una corrente di vapore

Due porte di olio utilizzato in una produzione industriale di portata pari a 2 kg/s e 1 kg/s e temperatura 95°C e 80°C vengono miscelate prima di entrare in uno scambiatore.

**A.** Si determini la temperatura della corrente di olio in seguito al miscelamento.

**B.** Tale corrente deve essere portata alla temperatura di 50°C e per realizzare questa operazione si ricorre all'uso di uno scambiatore di calore a tubi concentrici in cui viene fatta passare dell'acqua di raffreddamento. Il tubo più piccolo, in cui viene fatto passare l'olio, ha un diametro interno di 50 mm e uno spessore di 1.50 mm; la tubazione più grande ha invece un diametro interno di 100 mm. L'acqua viene fatta circolare in controcorrente ed entra alla temperatura di 15°C. Trascurando le dissipazioni termiche verso l'esterno, si determini la minima portata di acqua che deve essere impiegata, sapendo che la sua temperatura di uscita, a causa dei limiti di legge, non può essere superiore a 40°C.

**C.** Si stimi il coefficiente di scambio termico globale riferito all'area laterale esterna del tubo più piccolo.

**D.** Si determini la superficie minima necessaria, e quindi la lunghezza dei tubi, in grado di assicurare il raffreddamento richiesto.

	<b>Correlazione</b>	<b>Dimensione caratteristica</b>
<b>Convezione forzata in una tubazione</b>	$\overline{Nu}_D = 0.023 Re_D^{0.80} Pr^{1/3}$	Diametro idraulico della tubazione

**Tensione di vapore dell'acqua**

$$\ln(P_{ev}) = A - \frac{B}{T + C}$$

$$A = 18.3036$$

$$B = 3816.44$$

$$C = -46.13$$

(temperatura in K e tensione di vapore in mmHg)

**Proprietà dell'aria**

<i>T(K)</i>	<i>Calore specifico (kJ/kg/K)</i>	<i>Viscosità dinamica (Pa·s) ·10<sup>7</sup></i>	<i>Viscosità cinematica (m<sup>2</sup>/s) ·10<sup>6</sup></i>	<i>Conducibilità termica (W/m/K) ·10<sup>3</sup></i>	<i>Diffusività termica (m<sup>2</sup>/s)</i>	<i>Numero di Prandtl</i>
250	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690

**Proprietà fisiche: acqua, olio, acciaio e isolante**

	<i>Cp (J/kgK)</i>	<i>ρ (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>k (W/mK)</i>
<b>Acqua</b>	4186	1000	0.20
<b>Olio</b>	1800	880	0.14
<b>Acciaio</b>	447	7870	80.2
<b>Isolante termico</b>	1500	350	0.02