

## SOLUZIONI CAPITOLO 4

### 4.1

La pressione sul fondo del recipiente profondo 5 cm è la pressione di saturazione corrispondente alla temperatura di ebollizione di 98 °C:

$$p = p_{\text{sat a } 98 \text{ °C}} = 94.63 \text{ kPa}$$

La differenza di pressione tra i fondi dei due recipienti è

$$\Delta p = \rho g h = (1000 \text{ kg / m}^3)(9.8 \text{ m / s}^2)(0.35 \text{ m}) \left( \frac{1 \text{ kPa}}{1000 \text{ kg / m} \cdot \text{s}^2} \right) = 3.43 \text{ kPa}$$

Quindi la pressione sul fondo del recipiente profondo 40 cm è

$$p = 94.63 + 3.43 = 98.06 \text{ kPa}$$

Perciò la temperatura di ebollizione diventa

$$T_{\text{eb}} = T_{\text{sat a } 98.06 \text{ °C}} = 99.0 \text{ °C}$$

### 4.2

Si tratta di una trasformazione a volume costante ( $v = V/m = \text{cost}$ ) e il volume specifico (volume massico) è dato da

$$v = \frac{V}{m} = \frac{2.5 \text{ m}^3}{5 \text{ kg}} = 0.5 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Quando il liquido è completamente vaporizzato, il recipiente conterrà soltanto vapore saturo. Perciò,

$$v_2 = v_v = 0.5 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

La temperatura in questo punto è la temperatura che corrisponde a questo valore di  $v_v$ ,

$$T = T_{\text{sat a } v_g = 0.5 \text{ m}^3 / \text{kg}} = 140.7 \text{ °C}$$

### 4.3

Il cilindro contiene inizialmente liquido compresso (poiché  $p > p_{\text{atm a } 25 \text{ °C}}$ ) che può essere approssimato come un liquido saturo alla temperatura specificata

$$v_1 \cong v_{1 \text{ a } 25^\circ\text{C}} = 0.001003 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$h_1 \cong h_{1 \text{ a } 25^\circ\text{C}} = 104.89 \text{ kJ} / \text{kg}$$

(a) La massa è data da

$$m = \frac{V_1}{v_1} = \frac{0.050 \text{ m}^3}{0.001003 \text{ m}^3 / \text{kg}} = 49.85 \text{ kg}$$

(b) Nello stato finale il cilindro contiene vapore saturo e quindi la temperatura finale deve essere la temperatura di saturazione alla pressione finale,

$$T = T_{\text{sat a } 300 \text{ kPa}} = 133.55^\circ\text{C}$$

(c) L'entalpia finale è  $h_2 = h_{v \text{ a } 300 \text{ kPa}} = 2725,3 \text{ kJ/kg}$ . Perciò,

$$\Delta H = m(h_2 - h_1) = (49.85 \text{ kg})(2725.3 - 104.89) \text{ kJ} / \text{kg} = 130,627 \text{ kJ}$$

#### 4.4

La pressione assoluta iniziale e la pressione assoluta finale dello pneumatico sono

$$P_1 = P_{v1} + P_{\text{atm}} = 150 + 98 = 248 \text{ kPa}$$

$$P_2 = P_{v2} + P_{\text{atm}} = 200 + 98 = 298 \text{ kPa}$$

Se si assimila l'aria a un gas perfetto, la massa iniziale dello pneumatico è

$$m_1 = \frac{P_1 V}{RT_1} = \frac{(248 \text{ kPa})(0.015 \text{ m}^3)}{[0.287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{K})](303 \text{ K})} = 0.0428 \text{ kg}$$

Dato che la temperatura e il volume dello pneumatico rimangono costanti, la massa finale dello pneumatico diventa

$$m_2 = \frac{P_2 V}{RT_2} = \frac{(298 \text{ kPa})(0.015 \text{ m}^3)}{[0.287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{K})](303 \text{ K})} = 0.0514 \text{ kg}$$

Perciò, la quantità di aria che deve essere immessa nello pneumatico è

$$\Delta m = m_2 - m_1 = 0.0514 - 0.0428 = 0.0086 \text{ kg}$$

#### 4.5

La pressione assoluta di O<sub>2</sub> è

$$p = p_m + p_{\text{atm}} = 500 + 97 = 597 \text{ kPa}$$

Assimilando O<sub>2</sub> a un gas perfetto, la massa di O<sub>2</sub> nel recipiente è data da

$$m = \frac{pV}{RT} = \frac{(597 \text{ kPa})(1.2 \text{ m}^3)}{[0.2598 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})](297 \text{ K})} = 9.28 \text{ kg}$$

#### 4.6

Assimilando l'aria a un gas perfetto, la pressione assoluta nel recipiente è data da

$$p_2 = \frac{mRT}{V} = \frac{(10 \text{ kg})[0.287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})](308 \text{ K})}{0.8 \text{ m}^3} = 1069.1 \text{ kPa}$$

Perciò la pressione al manometro (pressione relativa) è

$$p_m = p - p_{\text{atm}} = 1069.1 - 97 = 972.1 \text{ kPa}$$

#### 4.7

La costante del gas, la pressione critica e la temperatura critica dell'acqua sono (vedi Tabella A.1)

$$R = 0.4615 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K}), \quad T_{\text{cr}} = 647.3 \text{ K}, \quad p_{\text{cr}} = 22.09 \text{ MPa}$$

(a) In base all'equazione di stato dei gas perfetti

$$v = \frac{RT}{p} = \frac{[0.4615 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})](673 \text{ K})}{(10,000 \text{ kPa})} = 0.03106 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (\text{errore } 17.6\%)$$

(b) In base al diagramma di compressibilità (Figura A.13),

$$\left. \begin{aligned} p_r &= \frac{p}{p_{\text{cr}}} = \frac{10 \text{ MPa}}{22.09 \text{ MPa}} = 0.453 \\ T_r &= \frac{T}{T_{\text{cr}}} = \frac{673 \text{ K}}{647.3 \text{ K}} = 1.04 \end{aligned} \right\} Z = 0.84$$

Perciò,

$$v = (Z)(v_{\text{perfetto}}) = (0.84)(0.03106 \text{ m}^3/\text{kg}) = 0.02609 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (\text{errore } 1.2\%)$$

#### 4.8

La costante del gas, la pressione critica e la temperatura critica del refrigerante R-134a sono (vedi Tabella A.1),

$$R = 0.08149 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{K}) \quad T_{\text{cr}} = 374.25 \text{ K}, \quad p_{\text{cr}} = 4.067 \text{ MPa}$$

(a) In base all'equazione di stato dei gas perfetti,

$$v = \frac{RT}{p} = \frac{[0.08149 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{K})] (413 \text{ K})}{1,400 \text{ kPa}} = 0.02404 \text{ m}^3 / \text{kg} \quad (\text{errore } 9.8\%)$$

(b) In base al diagramma di compressibilità (Figura A.13),

$$\left. \begin{aligned} P_r &= \frac{p}{p_{\text{cr}}} = \frac{1.4 \text{ MPa}}{4.067 \text{ MPa}} = 0.344 \\ T_r &= \frac{T}{T_{\text{cr}}} = \frac{413 \text{ K}}{374.25 \text{ K}} = 1.104 \end{aligned} \right\} Z = 0.89$$

Perciò,

$$v = (Z)(v_{\text{perfetto}}) = (0.89)(0.02404 \text{ m}^3 / \text{kg}) = 0.02140 \text{ m}^3 / \text{kg} \quad (\text{errore } 2.2\%)$$

#### 4.9

La costante del gas, la pressione critica e la temperatura critica del refrigerante R-134a sono (vedi Tabella A.1),

$$R = 0.08149 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{K}) \quad T_{\text{cr}} = 374.25 \text{ K}, \quad p_{\text{cr}} = 4.067 \text{ MPa}$$

Il volume specifico del refrigerante è

$$v = \frac{V}{m} = \frac{0.01677 \text{ m}^3}{1 \text{ kg}} = 0.01677 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

(a) In base all'equazione di stato dei gas perfetti,

$$p = \frac{RT}{v} = \frac{[0.08149 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{K})] (383 \text{ K})}{0.01677 \text{ m}^3 / \text{kg}} = 1861 \text{ kPa}$$

(b) In base al diagramma di compressibilità (Figura A.13),

$$\left. \begin{aligned} T_r &= \frac{T}{T_{cr}} = \frac{383 \text{ K}}{374.25 \text{ K}} = 1.023 \\ v_r &= \frac{v_{\text{effettivo}}}{RT_{cr}/p_{cr}} = \frac{(0.01677 \text{ m}^3/\text{kg})(4067 \text{ kPa})}{[0.08149 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})](374.25 \text{ K})} = 2.24 \end{aligned} \right\} P_r = 0.39$$

Perciò,

$$p = p_c P_{cr} = 0.39 \times 4067 = 1586 \text{ kPa}$$

#### 4.10

La pressione critica e la temperatura critica dell'ossigeno sono (vedi Tabella A.1)

$$T_{cr} = 154.8 \text{ K} \quad \text{e} \quad p_{cr} = 5.08 \text{ MPa}$$

In base al diagramma di compressibilità (Figura A.13),

$$\left. \begin{aligned} P_r &= \frac{p}{p_{cr}} = \frac{3 \text{ MPa}}{5.08 \text{ MPa}} = 0.591 \\ T_r &= \frac{T}{T_{cr}} = \frac{160 \text{ K}}{154.8 \text{ K}} = 1.034 \end{aligned} \right\} Z = 0.79$$

Quindi l'errore che si commette è dato da

$$\text{errore} = \frac{v - v_{\text{perfetto}}}{v} = 1 - \frac{1}{Z} = 1 - \frac{1}{0.79} = -26.6\%$$

Perciò l'affermazione è **falsa**.

#### 4.11

Il volume specifico dell'azoto è

$$v = \frac{v}{m} = \frac{3.27 \text{ m}^3}{100 \text{ kg}} = 0.327 \text{ m}^3/\text{kg}$$

(a) In base all'equazione di stato dei gas perfetti,

$$p = \frac{RT}{v} = \frac{[0.2968 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})](225 \text{ K})}{0.0327 \text{ m}^3/\text{kg}} = \mathbf{2042 \text{ kPa}} \quad (\text{errore } 2.15\%)$$

(b) Le costanti di van der Waals per l'azoto sono date da

$$a = \frac{27R^2T_{cr}^2}{64p_{cr}} = \frac{(27)[0.2968 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})]^2(126.2 \text{ K})^2}{(64)(3390 \text{ kPa})} = 0.175 \text{ m}^6 \cdot \text{kPa} / \text{kg}^2$$

$$b = \frac{RT_{cr}}{8p_{cr}} = \frac{[0.2968 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})](126.2 \text{ K})}{8 \times 3390 \text{ kPa}} = 0.00138 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Quindi

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2} = \frac{0.2968 \times 225}{0.0327 - 0.00138} - \frac{0.175}{(0.0327)^2} = \mathbf{1969 \text{ kPa}} \quad (\text{errore } 1.6\%)$$

(c) Le costanti nell'equazione di stato di Beattie-Bridgeman, in base alla Tabella A.29a, sono

$$A = A_o \left( 1 - \frac{a}{\bar{v}} \right) = 136.2315 \left( 1 - \frac{0.02617}{0.9160} \right) = 132.339$$

$$B = B_o \left( 1 - \frac{b}{\bar{v}} \right) = 0.05046 \left( 1 - \frac{-0.00691}{0.9160} \right) = 0.05084$$

$$c = 4.2 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{K}^3 / \text{kmol}$$

poiché  $\bar{v} = Mv = (28013 \text{ kg/kmol})(0,0327 \text{ m}^3/\text{kg}) = 0,9160 \text{ m}^3/\text{kmol}$

Sostituendo, otteniamo

$$p = \frac{R_u T}{\bar{v}^2} \left( 1 - \frac{c}{\bar{v} T^3} \right) (\bar{v} + B) - \frac{A}{\bar{v}^2}$$

$$= \frac{8.314 \times 225}{(0.9160)^2} \left( 1 - \frac{4.2 \times 10^4}{0.9160 \times 225^3} \right) (0.9160 + 0.05084) - \frac{132.339}{(0.9160)^2} = \mathbf{1989 \text{ kPa}} \quad (\text{errore } 0.6\%)$$

#### 4.12

Il volume specifico del vapore è

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1 \text{ m}^3}{2.841 \text{ kg}} = 0.3520 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

(a) In base all'equazione di stato dei gas perfetti,

$$T = \frac{pv}{R} = \frac{(600 \text{ kPa})(0.352 \text{ m}^3 / \text{kg})}{0.4615 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / \text{kg} \cdot \text{K}} = 457.6 \text{ K}$$

b) Le costanti di van der Waals per il vapore sono date da

$$a = \frac{27R^2T_{cr}^2}{64p_{cr}} = \frac{(27)[0.2968 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})]^2(126.2 \text{ K})^2}{(64)(3390 \text{ kPa})} = 0.175 \text{ m}^6 \cdot \text{kPa} / \text{kg}^2$$
$$b = \frac{RT_{cr}}{8p_{cr}} = \frac{[0.2968 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})](126.2 \text{ K})}{8 \times 3390 \text{ kPa}} = 0.00138 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Quindi,

$$T = \frac{1}{R} \left( P + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = \frac{1}{0.4615} \left( 600 + \frac{1.704}{(0.3520)^2} \right) (0.352 - 0.00169) = 465.9 \text{ K}$$

#### 4.13

(a) In base all'equazione di stato dei gas perfetti.

$$T = \frac{pv}{R} = \frac{(700 \text{ kPa})(0.03324 \text{ m}^3 / \text{kg})}{0.08149 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})} = 285.5 \text{ K}$$

(b) Le costanti di van der Waals per il refrigerante sono date da

$$a = \frac{27R^2T_{cr}^2}{64p_{cr}} = \frac{(27)[0.08149 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})]^2(374.25 \text{ K})^2}{(64)(4067 \text{ kPa})} = 0.0965 \text{ m}^6 \cdot \text{kPa} / \text{kg}^2$$
$$b = \frac{RT_{cr}}{8p_{cr}} = \frac{[0.08149 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})](374.25 \text{ K})}{8 \times 4067 \text{ kPa}} = 0.000937 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Quindi,

$$T = \frac{1}{R} \left( P + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = \frac{1}{0.08149} \left( 700 + \frac{0.0965}{(0.03324)^2} \right) (0.03324 - 0.000937) = 312.1 \text{ K}$$

#### 4.14

(a) In base all'equazione di stato dei gas perfetti,

$$p = \frac{RT}{v} = \frac{[0.2968 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})](150 \text{ K})}{0.041884 \text{ m}^3 / \text{kg}} = 1063 \text{ kPa} \quad (\text{errore } 6.3\%)$$

(b) Le costanti nell'equazione di stato di Beattie-Bridgeman, determinate in base alla Tabella A.29a, sono

$$A = A_o \left( 1 - \frac{a}{\bar{v}} \right) = 136.2315 \left( 1 - \frac{0.02617}{1.1733} \right) = 133.193$$

$$B = B_o \left( 1 - \frac{b}{\bar{v}} \right) = 0.05046 \left( 1 - \frac{-0.00691}{1.1733} \right) = 0.05076$$

$$c = 4.2 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{K}^3 / \text{kmol}$$

poiché

$$\bar{v} = Mv = (280,13 \text{ kg/kmol})(0,041884 \text{ m}^3/\text{kg}) = 1,1733 \text{ m}^3/\text{kmol}$$

Sostituendo, otteniamo

$$\begin{aligned} p &= \frac{R_u T}{\bar{v}^2} \left( 1 - \frac{c}{\bar{v} T^3} \right) (\bar{v} + B) - \frac{A}{\bar{v}^2} \\ &= \frac{8.314 \times 150}{(1.1733)^2} \left( 1 - \frac{4.2 \times 10^4}{1.1733 \times 150^3} \right) (1.1733 + 0.05076) - \frac{133.193}{(1.1733)^2} \\ &= 1000.4 \text{ kPa} \quad (\text{errore trascurabile}) \end{aligned}$$

#### 4.15

La pressione assoluta nella pentola a pressione è la pressione di saturazione che corrisponde alla temperatura di ebollizione

$$p = p_{\text{sat a } 120 \text{ °C}} = 198.5 \text{ kPa}$$

sat chiocciola → sat a



#### 4.16

Assimilando l'azoto a un gas perfetto, la massa iniziale e la massa finale del recipiente sono date da

$$m_1 = \frac{p_1 V}{RT_1} = \frac{(800 \text{ kPa})(20 \text{ m}^3)}{[0.2968 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})](298 \text{ K})} = 180.9 \text{ kg}$$
$$m_2 = \frac{p_2 V}{RT_2} = \frac{(600 \text{ kPa})(20 \text{ m}^3)}{0.2968 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})(293 \text{ K})} = 138.0 \text{ kg}$$

Perciò, la quantità totale di azoto che è uscita dal recipiente è

$$\Delta m = m_1 - m_2 = 180.9 - 138.0 = 42.9 \text{ kg}$$

#### 4.17

Il volume interno del recipiente sferico di azoto è

$$V = \frac{1}{6} \pi D^3 = \frac{1}{6} \pi (3 \text{ m})^3 = 14.14 \text{ m}^3$$

Notando che il recipiente è inizialmente pieno di azoto liquido la cui densità è  $810 \text{ kg/m}^3$ , si ottiene che la massa di azoto è

$$m = \rho V = (810 \text{ kg/m}^3)(14.14 \text{ m}^3) = 11,450 \text{ kg}$$

La quantità di calore assorbito è semplicemente il calore totale di vaporizzazione.

$$Q_{\text{ass}} = m h_{\text{lv}} = (11,450 \text{ kg})(198 \text{ kJ/kg}) = 2.267 \times 10^6 \text{ kJ}$$

#### 4.18

(a) Il volume del locale riservato ai fumatori è

$$V = (\text{lunghezza})(\text{larghezza})(\text{altezza}) = (10 \text{ m})(15 \text{ m})(2.4 \text{ m}) = 360 \text{ m}^3$$

Dato che nel locale sono presenti 25 fumatori, la portata volumetrica dell'aria fresca richiesta dal locale è

$$\dot{V}_{\text{aria fresca}} = [30 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{fumatore})](25 \text{ fumatori}) = 750 \text{ L/s} = 0.750 \text{ m}^3/\text{s}$$

Perciò, la portata volumetrica del ventilatore da installare deve essere di almeno  $750 \text{ L/s}$ .

(b) Il numero di ricambi d'aria all'ora (ACH, air changes per hour) è dato da

$$\text{ACH} = \frac{\text{portata volumetrica oraria dell'aria}}{\text{volume del locale}} = \frac{(0.750 \text{ m}^3 / \text{s}) \left( \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \right)}{360 \text{ m}^3} = 7.5 \text{ h}^{-1}$$

#### 4.19

Il volume della stanza da bagno è

$$V = (\text{lunghezza})(\text{larghezza})(\text{altezza}) = (2 \text{ m})(2.5 \text{ m})(3 \text{ m}) = 15 \text{ m}^3$$

Il ventilatore estrae l'aria dalla stanza a una portata di 25 L/s. La quantità d'aria che può essere estratta in 15 min è

$$V = \dot{V} \Delta t = (25 \text{ L} / \text{s})(15 \times 60 \text{ s}) = 22,500 \text{ L} = 22.5 \text{ m}^3$$

che è maggiore del volume della stanza. Perciò, il ventilatore è **abbastanza grande**.

La densità dell'aria in condizioni atmosferiche normali di 1 atm e 25 °C è (in base alla Tabella A.19 o all'equazione di stato dei gas perfetti) 1,186 kg/m<sup>3</sup>. Quindi la portata massica dell'aria diventa

$$\dot{m}_{\text{aria}} = \rho \dot{V}_{\text{aria}} = (1.186 \text{ kg} / \text{m}^3)(0.025 \text{ m}^3 / \text{s}) = 0.0297 \text{ kg} / \text{s}$$