

4 MIESZANINY GAZÓW

4.1. PODSTAWY TEORETYCZNE

Skład mieszaniny gazów określają udziały masowe lub objętościowe składników. Udział masowy równy jest stosunkowi masy składnika mieszaniny do całkowitej masy mieszaniny:

$$\xi_1 = \frac{m'_S}{m_S}; \quad \xi_2 = \frac{m''_S}{m_S}; \quad \xi_3 = \frac{m'''_S}{m_S} \quad \dots, \quad (4.1)$$

gdzie: m'_S, m''_S, m'''_S - masy składników mieszaniny,
 m_S - masa mieszaniny.

Oczywiste jest, że

$$\xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_n = 1.$$

Udział objętościowy równy jest stosunkowi objętości składnika mieszaniny do objętości mieszaniny przy założeniu, że składnik ma temperaturę i ciśnienie równe temperaturze i ciśnieniu mieszaniny:

$$u_1 = \frac{V'_S}{V_S}; \quad u_2 = \frac{V''_S}{V_S}; \quad u_3 = \frac{V'''_S}{V_S} \quad \dots, \quad (4.2)$$

gdzie: V'_S, V''_S, V'''_S - objętości składników mieszaniny,
 V_S - objętość mieszaniny.

Podobnie jak poprzednio

$$u_1 + u_2 + \dots + u_n = 1.$$

Opierając się na podanych zależnościach, prawie Awogadra oraz równaniu stanu gazu można wyprowadzić następujące zależności:

- pozorna względna masa cząsteczkowa mieszaniny gazowej

$$\mu_m = \sum_{i=1}^n u_i \mu_i, \quad (4.3)$$

przy czym: μ_i - względna masa cząsteczkowa składnika mieszaniny,

u_i - udział objętościowy składnika mieszaniny,

lub

$$\mu_m = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}}; \quad (4.3a)$$

- udział objętościowy

$$u_i = \frac{\frac{g_i}{\mu_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}} \quad (4.4)$$

lub

$$u_i = \frac{g_i \mu_m}{\mu_i}, \quad (4.4a)$$

gdzie: g_i - udział masowy składnika mieszaniny;

- udział masowy

$$g_i = \frac{u_i \mu_i}{\sum_{i=1}^n u_i \mu_i} \quad (4.5)$$

oraz

$$g_i = \frac{u_i \mu_i}{\mu_m} \quad (4.5a)$$

- gęstość mieszaniny

$$\rho_m = \sum_{i=1}^n u_i \rho_i \quad (4.6)$$

bądź

$$\varrho_m = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\varrho_i}{\varrho_i}}, \quad (4.6a)$$

gdzie: ϱ_i - gęstość składnika mieszaniny.

Z prawa Daltona wynika, że suma ciśnień cząstkowych składników mieszaniny gazowej równa jest ciśnieniu mieszaniny:

$$p_m = p_1 + p_2 + p_3 + \dots p_n. \quad (4.7)$$

Korzystając z zależności (4.7) i równań stanu gazu poszczególnych składników mieszaniny można dowieść, że zastępcza stała gazowa mieszaniny R_m wynosi:

$$R_m = \sum_{i=1}^n \varrho_i R_i \quad (4.8a)$$

lub

$$R_m = \frac{B}{M_{Bm}} = \frac{8314,7}{M_{Bm}} \approx \frac{8315}{M_{Bm}} \text{ J/(kg} \cdot \text{°K)} \quad (4.8b)$$

liczbowo $\mu_m = M_{Bm}$.

W wielu obliczeniach przeliczając udziały objętościowe na masowe lub odwrotnie wygodnie korzystać jest ze wzorów wynikających z prawa Daltona i równania stanu gazu:

$$u_i = \frac{p_i}{p_m}, \quad (4.9a)$$

ponieważ

$$R_i = \frac{8315}{M_{Bi}} \quad \text{a} \quad R_m = \frac{8315}{M_{Bm}},$$

zatem

$$u_i = \varrho_i \frac{M_{Bm}}{M_{Bi}} = \varrho_i \frac{R_i}{R_m}, \quad (4.9b)$$

gdzie:

$$M_{Bm} = \mu_m \quad \text{oraz} \quad M_{Bi} = \mu_i.$$

Z równań (4.9a) i (4.9b) otrzymano odwrotnie

$$\xi_i = u_i \frac{M_{Bi}}{M_{Bm}} = u_i \frac{R_m}{R_i} . \quad (4.10)$$

Ciepło właściwe mieszaniny (c_{pm} ; c_{vm}), jeżeli znane są wartości c_{pi} i c_{vi} , oblicza się ze wzorów:

$$c_{pm} = \sum_{i=1}^n \xi_i c_{pi} , \quad (4.11a)$$

$$c_{vm} = \sum_{i=1}^n \xi_i c_{vi} . \quad (4.11b)$$

W odniesieniu do 1 kmola

$$M_{Bm} c_{pm} = \sum_{i=1}^n u_i M_{Bi} c_{pi} , \quad (4.12a)$$

$$M_{Bm} c_{vm} = \sum_{i=1}^n u_i M_{Bi} c_{vi} . \quad (4.12b)$$

Entalpię mieszaniny wyznacza się z zależności:

$$i_m = \sum_{i=1}^n \xi_i i_i . \quad (4.13)$$

4.2. ZADANIA

X 4.2.1. 1 kg suchego powietrza składa się z $m_s^{O_2} = 0,232$ kg tlenu (O_2) i $m_s^{N_2} = 0,768$ kg azotu (N_2). Obliczyć:

- udział masowy i objętościowy tlenu i azotu,
- zastępczą gazową powietrza,
- pozorną masę cząsteczkową powietrza,
- ciśnienie cząstkowe tlenu i azotu, jeżeli ciśnienie barometryczne $b = 0,975 \cdot 10^5$ N/m².

Rozwiązanie

Zgodnie z zależnością (4.1) udziały masowe wynoszą:

$$g_{O_2} = \frac{m_s}{m_m} = \frac{0,232}{1} = 0,232; \quad g_{N_2} = \frac{m_s}{m_m} = \frac{0,768}{1} = 0,768.$$

Udziały objętościowe obliczono korzystając z wzoru (4.4),
względne masy cząsteczkowe O_2 i N_2 odczytano z tabl.3

$$v_{O_2} = \frac{\frac{g_{O_2}}{\mu_{O_2}}}{\frac{g_{O_2}}{\mu_{O_2}} + \frac{g_{N_2}}{\mu_{N_2}}} = \frac{\frac{0,232}{32}}{\frac{0,232}{32} + \frac{0,768}{28}} = 0,21,$$

$$v_{N_2} = \frac{\frac{g_{N_2}}{\mu_{N_2}}}{\frac{g_{O_2}}{\mu_{O_2}} + \frac{g_{N_2}}{\mu_{N_2}}} = \frac{\frac{0,768}{28}}{\frac{0,232}{32} + \frac{0,768}{28}} = 0,79.$$

Sprawdzenie

$$v_{O_2} + v_{N_2} = 0,21 + 0,79 = 1.$$

Zastępczą stałą gazową powietrza wyznaczono z wzoru (4.8a):

$$R_m = \sum_{i=1}^n g_i R_i = g_{O_2} R_{O_2} + g_{N_2} R_{N_2} = g_{O_2} \frac{8315}{M_{B_{O_2}}} + g_{N_2} \frac{8315}{M_{B_{N_2}}},$$

$$R_m = 0,232 \cdot \frac{8315}{32} + 0,768 \cdot \frac{8315}{28} = 287 \text{ J/(kg} \cdot \text{°K)}$$

a pozorną masę cząsteczkową mieszaniny wg równania (4.3):

$$\mu_m = \sum_{i=1}^n v_i \mu_i = v_{O_2} \mu_{O_2} + v_{N_2} \mu_{N_2} = 0,21 \cdot 32 + 0,79 \cdot 28 = 28,9$$

lub z zależności (4.8b)

$$\mu_m = M_{Bm} = \frac{8315}{R_m} = \frac{8315}{287} = 28,9.$$

Ciśnienie cząstkowe p_{O_2} , p_{N_2} obliczyć można pamiętając o zależności (4.9a)

$$u_i = \frac{p_i}{p_m},$$

skąd

$$p_{O_2} = u_{O_2} p_m = 0,21 \cdot 0,975 \cdot 10^5 = 0,205 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2,$$

$$p_{N_2} = u_{N_2} p_m = 0,79 \cdot 0,975 \cdot 10^5 = 0,770 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2,$$

ponieważ $p_m = b$.

4.2.2. Dane są udziały masowe mieszaniny gazowej:

$g_{CO_2} = 0,3$, $g_{O_2} = 0,5$, $g_{N_2} = 0,2$. Obliczyć jaką objętość zajmuje mieszanina przy ciśnieniu $p_1 = 0,6 \text{ MN/m}^2$ i temperaturze $T_1 = 320^\circ\text{K}$ (47°C), jeżeli jej masa $m = 20 \text{ kg}$. Ponadto obliczyć rzeczywiste ciepło właściwe przy stałej objętości (w $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{deg})$) i temperaturze $T_2 = 473^\circ\text{K}$ (100°C).

Rozwiązanie

Z zależności (4.8) wynika

$$R_m = \sum_{i=1}^n g_i R_i = g_{CO_2} \frac{8315}{M_{B_{CO_2}}} + g_{O_2} \frac{8315}{M_{B_{O_2}}} + g_{N_2} \frac{8315}{M_{B_{N_2}}}.$$

Z tablicy 3 odczytano $\mu_i = M_{Bi}$

$$M_{B_{CO_2}} = 44, \quad M_{B_{O_2}} = 32, \quad M_{B_{N_2}} = 28,$$

zatem

$$R_m = 8315 \left(\frac{0,3}{44} + \frac{0,5}{32} + \frac{0,2}{28} \right) = 246 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}).$$

Z równania stanu gazu objętości mieszaniny

$$V_m = \frac{m R_m T_1}{p_1} = \frac{20 \cdot 246 \cdot 320}{6 \cdot 10^5} = 2,625 \text{ m}^3.$$

Z tabl. 7 dla temperatury $T_2 = 473^\circ\text{K}$ (100°C) odczytano rzeczywiste molowe ciepło właściwe składników mieszaniny

$$M_{B^c p CO_2} = 43,689 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{deg}), \quad M_{B^c p O_2} = 30,815 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{deg}),$$

$$M_{B^c p N_2} = 29,471 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{deg}).$$

Pozorną masę cząsteczkową mieszaniny wygodnie jest w tym przypadku obliczyć z zależności (4.8b):

$$M_{B_m} = \frac{8315}{R_m} = \frac{8315}{246} = 33,8 \text{ kg/kmol},$$

udziały objętościowe natomiast ze wzoru (4.9b):

$$u_{CO_2} = \varepsilon_{CO_2} \frac{M_{B_m}}{M_{B_{CO_2}}} = 0,3 \cdot \frac{33,8}{44} = 0,231,$$

$$u_{O_2} = \varepsilon_{O_2} \frac{M_{B_m}}{M_{B_{O_2}}} = 0,5 \cdot \frac{33,8}{32} = 0,528,$$

$$u_{N_2} = \varepsilon_{N_2} \frac{M_{B_m}}{M_{B_{N_2}}} = 0,2 \cdot \frac{33,8}{28} = 0,241.$$

Sprawdzenie $0,231 + 0,528 + 0,241 = 1$.

Molowe ciepło właściwe mieszaniny wyznacza się ze wzoru (4.12a)

$$M_{B_m} c_{p n} = \sum_{i=1}^n u_i M_{B^c p i} \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{deg}).$$

Wstawiając wyznaczone wartości otrzymano:

$$M_{B_m} c_{p m} = u_{CO_2} M_{B^c p O_2} + u_{O_2} M_{B^c p O_2} + u_{N_2} M_{B^c p N_2},$$

$$M_{B_m} c_{p m} = 0,231 \cdot 43,689 + 0,528 \cdot 30,815 + 0,241 \cdot 29,471 = 33,45 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{deg}).$$

Posługując się równaniem Mayera (3.8c) można napisać:

$$M_{B_m} c_{v m} = M_{B_m} c_{p m} - B,$$

$$B = 8,315 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot ^\circ\text{K}),$$

zatem

$$M_{Bm} c_{vm} = 33,45 - 8,315 = 25,135 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{deg})$$

ostatecznie

$$c_{vm} = \frac{M_{Bm} c_{vm}}{M_{Bm}} = \frac{25,135}{33,8} = 0,744 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{deg}) .$$

X 4.2.3. Zamieszano 5 kg dwutlenku węgla i 3 kg tlenu. Obliczyć:

- udziały objętościowe składników,
- pozorną masę cząsteczkową mieszaniny,
- stałą gazową mieszaniny.

Odp. $u_{CO_2} = 0,548$, $u_{O_2} = 0,452$, $\mu_m = 38,8$, $R_m = 214 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{K})$.

X 4.2.4. Wyniki przeprowadzonej analizy spalin są następujące $u_{CO_2} = 0,123$, $u_{O_2} = 0,072$, $u_{N_2} = 0,805$. Obliczyć pozorną masę cząsteczkową oraz objętość właściwą spalin. Temperatura spalin wynosiła $T_{sp} = 1073^\circ\text{K}$ (800°C), a ciśnienie panujące w kanale spalinowym $p = 0,1 \text{ MN}/\text{m}^2$.

Odp. $\mu_{sp} = 30,3$, $v_{sp} = 2,94 \text{ m}^3/\text{kg}$.

X 4.2.5. W zbiorniku o pojemności $V = 125 \text{ m}^3$ znajduje się gaz świetlny pod ciśnieniem $p = 4,05 \cdot 10^5 \text{ N}/\text{m}^2$ i o temperaturze $T = 291^\circ\text{K}$ (18°C). Udziały objętościowe składników gazu są równe: $u_{H_2} = 0,46$, $u_{CH_4} = 0,32$, $u_{CO} = 0,15$, $u_{N_2} = 0,07$. Odbiorcy pobrali pewną ilość gazu tak, że ciśnienie w zbiorniku spadło do $p = 3,14 \cdot 10^5 \text{ N}/\text{m}^2$, a temperatura do $T_2 = 285^\circ\text{K}$ (12°C). Obliczyć ilość odprowadzonego gazu.

Odp. $m = 53,2 \text{ kg}$.

X 4.2.6. Do jakiego ciśnienia należy sprężyć mieszaninę gazów o składzie masowym $m_{CO_2} = 0,18$, $m_{O_2} = 0,12$ i $m_{N_2} = 0,70$, aby $m = 8 \text{ kg}$ gazu przy temperaturze $T = 453^\circ\text{K}$ (180°C) zajmowało objętość równą $V = 4 \text{ m}^3$.

Odp. $p = 2,63 \cdot 10^5 \text{ N}/\text{m}^2$.

X 4.2.7. Pusty zbiornik napełniany jest kolejno tlenem, azotem i wodorem w ten sposób, aby otrzymana mieszanina miała następujące udziały masowe: $\xi_{O_2} = 0,400$, $\xi_{N_2} = 0,400$, $\xi_{H_2} = 0,2$ przy nadciśnieniu $p_n = 1,5 \text{ MN/m}^2$.

Obliczyć ciśnienie jakie powinien wskazywać manometr podłączony do napełnianego zbiornika po wprowadzeniu każdego kolejnego składnika, jeżeli temperatura w trakcie ładowania nie uległa zmianie i równa jest temperaturze zewnętrznej. Ciśnienie zewnętrzne wynosi $p_b = 1 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$.

$$\text{Odp. } p_{n_1} = 0,574 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2, \quad p_{n_2} = 2,378 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2.$$

$$p_{n_3} = 15 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2.$$

X 4.2.8. W zbiorniku o pojemności $V = 10 \text{ m}^3$ znajduje się mieszanina gazów o następujących udziałach masowych: $\xi_{N_2} = 0,6$, $\xi_{O_2} = 0,2$, $\xi_{H_2O} = 0,2$ i parametrach początkowych - ciśnieniu $p_1 = 8 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ i $T_1 = 450^\circ\text{K}$ (177°C). Obliczyć ciśnienie cząstkowe składników po oziębieniu mieszaniny do $T_2 = 293^\circ\text{K}$ (20°C) zakładając, że cała para wodna uległa skropleniu.

Rozwiązanie

$$P_2 \cdot V - V_{H_2O} = m' R' T_2,)$$

skąd

$$P_2 = \frac{m' R' T_2}{V - V_{H_2O}},$$

przy czym masę mieszaniny po wykropleniu się pary wodnej wyznacza się z zależności:

$$m' = m - m_{H_2O} = m \left(1 - G_{H_2O} \right)$$

korzystając z wzoru 4.8a można napisać:

$$R = 8315 \left(\frac{G_{N_2}}{M_{BN_2}} + \frac{G_{O_2}}{M_{BO_2}} + \frac{G_{H_2O}}{M_{BH_2O}} \right) =$$
$$= 8315 \left(\frac{0,6}{28} + \frac{0,2}{32} + \frac{0,2}{18} \right) = 322 \frac{J}{kg \cdot ^\circ K},$$

więc

$$m = \frac{P_1 V}{RT} = \frac{8 \cdot 10^5}{322 \cdot 450} = 55,2 \text{ kg}$$

$$m' = 55,2 (1 - 0,2) = 44,2 \text{ kg}.$$

Nowe udziały masowe dwuskładnikowej mieszaniny

$$G'_{N_2} = \frac{G_{N_2}}{G_{N_2} + G_{O_2}} = \frac{0,6}{0,6 + 0,2} = 0,75$$

$$G'_{O_2} = \frac{G_{O_2}}{G_{N_2} + G_{O_2}} = \frac{0,2}{0,6 + 0,2} = 0,25$$

oraz nowa stała gazowa

$$R' = 8315 \left(\frac{G_{N_2}}{M_{BN_2}} + \frac{G'_{O_2}}{M_{BO_2}} \right) = 8315 \left(\frac{0,75}{28} + \frac{0,25}{32} \right) =$$
$$= 288 \frac{J}{kg \cdot ^\circ K}$$

Przyjmując że objętość 1 kg wody wynosi $v = 0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$ otrzymano

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = v_{\text{H}_2\text{O}} \cdot m = 0,001 \cdot 0,255,2 = 0,011 \text{ m}^3.$$

Wstawiając obliczone wielkości do wzoru na P_2 można napisać

$$P_2 = \frac{44,2 \cdot 288 \cdot 293}{10,0 - 0,011} = 3,72 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2.$$

Nowe udziały objętościowe wynoszą

$$u'_{\text{N}_2} = G'_{\text{N}_2} \frac{R_{\text{N}_2}}{R} = 0,75 \frac{8315}{28 \cdot 288} = 0,774$$

$$u'_{\text{O}_2} = G'_{\text{O}_2} \frac{R_{\text{O}_2}}{R} = 0,25 \frac{8315}{32 \cdot 288} = 0,226.$$

Ostateczne ciśnienia cząstkowe

$$P_{\text{N}_2} = u'_{\text{N}_2} P_2 = 0,774 \cdot 3,72 \cdot 10^5 = 2,88 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$P_{\text{O}_2} = u'_{\text{O}_2} P_2 = 0,226 \cdot 3,72 \cdot 10^5 = 0,84 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2.$$

4.2.9. Mieszanie gazów o następujących udziałach objętościowych $u_{\text{CO}} = 0,15$, $u_{\text{O}_2} = 0,7$, $u_{\text{N}_2} = 0,15$, w celu usu-

nięcia CO przepuszczono przez amoniakalny roztwór chlorku miedziowego. Odczynnik ten związał całą ilość tlenu węgla. Pozbawioną CO mieszaninę zmagazynowano w zbiorniku pod ciśnieniem $p = 6 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$. Obliczyć udziały masowe oraz ciśnienia cząstkowe mieszaniny znajdującej się w zbiorniku.

$$\text{Odp. } \varepsilon_{\text{O}_2} = 0,843, \quad \varepsilon_{\text{N}_2} = 0,157, \quad p_{\text{O}_2} = 4,95 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2, \\ p_{\text{N}_2} = 1,05 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2.$$

4.2.10. W zbiorniku o pojemności $V = 4 \text{ m}^3$ znajduje się mieszanina gazów określona udziałami objętościowymi: $u_{\text{O}_2} = 0,6$, $u_{\text{N}_2} = 0,2$, $u_{\text{CO}_2} = 0,2$, o ciśnieniu $p_1 = 0,6 \text{ MN/m}^2$ i temperaturze $T_1 = 278^\circ\text{K}$ (5°C). Do zbiornika doprowadzono $m = 3,2 \text{ kg}$ wodnego roztworu wodorotlenku potasu (KOH), który zaabsorbował całą ilość CO_2 . Objętość właściwa KOH wynosi $v = 0,76 \text{ dm}^3/\text{kg}$. Obliczyć ciśnienia cząstkowe składników mieszaniny po pochłonięciu CO_2 . Temperatura gazu w trakcie procesu absorpcji wzrosła do $T_2 = 305^\circ\text{K}$ (32°C).

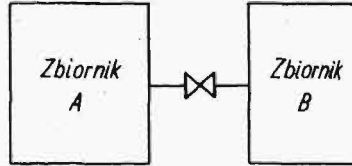
$$\text{Odp. } p_{\text{O}_2} = 4,94 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2, \quad p_{\text{N}_2} = 1,65 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2.$$

4.2.11. Obliczyć rzeczywiste ciepło właściwe (przy stałym ciśnieniu i objętości) mieszaniny gazowej określonej udziałami masowymi: $\varepsilon_{\text{O}_2} = 0,4$, $\varepsilon_{\text{N}_2} = 0,3$, $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0,3$. Temperatura mieszaniny wynosi $T = 373^\circ\text{K}$ (100°C). Rachunek przeprowadzić traktując składniki mieszaniny jak: a) gazy doskonałe, b) półdoskonałe. Ponadto obliczyć błąd względny popełniony w pierwszym przypadku.

$$\text{Odp. a) } c_p = 1,307 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{deg)}, \quad c_v = 0,975 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{deg)}; \\ \text{b) } c_p = 1,252 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{deg)}, \quad c_v = 0,920 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{deg)}; \\ \delta_{c_p} = 4,40\%, \quad \delta_{c_v} = 5,98\%.$$

4.2.12. Dwa zbiorniki A i B (rys.4.1) połączone są przewodem, na którym umieszczono zawór odcinający. W zbiorniku A o pojemności $V_A = 20 \text{ m}^3$ znajduje się mieszanina tlenu i azotu o udziałach masowych $\varepsilon_{\text{O}_2} = 0,3$, $\varepsilon_{\text{N}_2} = 0,7$;

ciśnieniu $p_A = 0,6 \text{ MN/m}^2$ i temperaturze $T_A = 573^\circ\text{K} (300^\circ\text{C})$. Drugi zbiornik B wypełniony jest dwutlenkiem węgla o masie $m_B = 52 \text{ kg}$, ciśnieniu $p_B = 0,3 \text{ MN/m}^2$ i temperaturze $T_B = 373^\circ\text{K} (100^\circ\text{C})$. Obliczyć jakie ciśnienie i temperatura ustali się w zbiornikach po otworzeniu zaworu odcinającego.



Rys.4.1

Obliczenia przeprowadzić przy założeniu, że gazy nie wymieniają ciepła z otoczenia i mają stałe ciepło właściwe (gazy doskonałe).

Rozwiązanie

Równanie bilansu cieplnego układu ma postać:

$$m_A c_{vA} T_A + m_B c_{vB} T_B = (m_A + m_B) c_{vAB} T_{AB},$$

skąd

$$T_{AB} = \frac{m_A c_{vA} T_A + m_B c_{vB} T_B}{(m_A + m_B) c_{vAB}}, \quad (1)$$

gdzie:

- c_{vA} - ciepło właściwe mieszaniny gazów w zbiorniku A w stanie początkowym,
- c_{vB} - ciepło właściwe gazu (CO_2) w zbiorniku B w stanie początkowym,
- c_{vAB} - ciepło właściwe otrzymanej mieszaniny po otwarciu zaworu odcinającego.

Masę mieszaniny w zbiorniku A obliczono z równania stanu gazu

$$m_A = \frac{p_A V_A}{R_A T_A},$$

gdzie zgodnie ze wzorem (4.8a)

$$R_A = 8315 \left(\frac{\xi_{\text{O}_2}}{M_{\text{B}_{\text{O}_2}}} + \frac{\xi_{\text{N}_2}}{M_{\text{B}_{\text{N}_2}}} \right) = 8315 \left(\frac{0,3}{32} + \frac{0,7}{28} \right) = 285,6 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{K)},$$

$$R_A = 285,6 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{K)},$$

więc

$$m_A = \frac{6 \cdot 10^5 \cdot 20}{285,6 \cdot 573} = 73,4 \text{ kg}.$$

Masy składników mieszaniny w zbiorniku A wynoszą:

$$m_s^{O_2} = m_A \varepsilon_{O_2} = 73,4 \cdot 0,3 = 22,02 \text{ kg},$$

$$m_s^{N_2} = m_A \varepsilon_{N_2} = 73,4 \cdot 0,7 = 51,38 \text{ kg}.$$

Molowe ciepło właściwe O_2 i N_2 odczytano z tabl. 7 (gazy dwuatomowe):

$$M_B c_v = 20,93 \text{ kJ/(kmol} \cdot \text{deg)},$$

$$c_{vO_2} = \frac{20,93}{M_{B_{O_2}}} = \frac{20,93}{32} = 0,654 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{deg)},$$

$$c_{vN_2} = \frac{20,93}{M_{B_{N_2}}} = \frac{20,93}{28} = 0,748 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{deg)}.$$

Zgodnie ze wzorem (4.11b) otrzymano:

$$\begin{aligned} c_{vA} &= \varepsilon_{O_2} c_{vO_2} + \varepsilon_{N_2} c_{vN_2} = 0,3 \cdot 0,654 + 0,7 \cdot 0,748 = \\ &= 0,720 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{deg)}. \end{aligned}$$

Molowe ciepło właściwe CO_2 odczytano z tabl. 7 (gaz trój-atomowy)

$$M_B c_{vCO_2} = 29,31 \text{ kJ/(kmol} \cdot \text{deg)},$$

$$c_{vCO_2} = c_{vB} = \frac{29,31}{44} = 0,677 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{deg)}.$$

Po połączeniu obu zbiorników i wymieszaniu się gazów nowe udziały masowe wynoszą:

$$\varepsilon'_{CO_2} = \frac{m_B}{m_B + m_A} = \frac{52}{73,4 + 52} = 0,415,$$

$$\varepsilon'_{O_2} = \frac{m_s^{O_2}}{m_B + m_A} = \frac{22,02}{73,4 + 52} = 0,176,$$

$$\varepsilon'_{N_2} = \frac{m_s^{N_2}}{m_B + m_A} = \frac{51,38}{73,4 + 52} = 0,409.$$

Ciepło właściwe mieszaniny

$$c_{vAB} = \xi'_{CO_2} c_{vCO_2} + \xi'_{O_2} c_{vO_2} + \xi'_{N_2} c_{vN_2},$$

$$c_{vAB} = 0,415 \cdot 0,677 + 0,176 \cdot 0,654 + 0,409 \cdot 0,748 = \\ = 0,702 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{deg)}.$$

Wstawiając wyznaczone wartości do wzoru (1) otrzymano poszukiwaną temperaturę mieszaniny:

$$T_{AB} = \frac{73,4 \cdot 0,720 \cdot 573 + 52 \cdot 0,677 \cdot 373}{(73,4 + 52) \cdot 0,702} = 494^\circ \text{K}.$$

Objętość zbiornika B wyznaczyć można z równania stanu gazu

$$V_B = \frac{m_B R_B T_B}{p_B} = \frac{52 \cdot 189 \cdot 373}{3 \cdot 10^5} = 12,23 \text{ m}^3,$$

ponieważ

$$R_B = \frac{8315}{44} = 189 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{°K)}.$$

Całkowita objętość zajmowana przez gaz

$$V_{AB} = V_A + V_B = 20 + 12,23 = 32,23 \text{ m}^3.$$

Cisnienie panujące w zbiornikach po otwarciu zaworu

$$p_{AB} = \frac{(m_A + m_B) R_{AB} T_{AB}}{V_{AB}},$$

gdzie:

$$R_{AB} = \xi'_{CO_2} R_B + \xi'_{O_2} R_{O_2} + \xi'_{N_2} R_{N_2},$$

$$R_{AB} = 0,415 \cdot 189 + 0,176 \cdot \frac{8315}{32} + 0,409 \cdot \frac{8315}{28} = 245,6 \text{ J/(kg} \cdot \text{°K)}.$$

Po wstawieniu wyznaczonych wartości:

$$p_{AB} = \frac{(73,4 + 52) 245,6 \cdot 494}{32,23} = 4,72 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2,$$

$$p_{AB} = 0,472 \text{ MN/m}^2.$$

Udziały objętościowe otrzymanej mieszaniny, zgodnie z zależnością (4.9b), wynoszą:

$$u'_{\text{CO}_2} = \varepsilon'_{\text{CO}_2} \frac{R_{\text{CO}_2}}{R_{\text{AB}}} = 0,415 \cdot \frac{8315}{245,6 \cdot 44} = 0,319,$$

$$u'_{\text{O}_2} = \varepsilon'_{\text{O}_2} \frac{R_{\text{O}_2}}{R_{\text{AB}}} = 0,176 \cdot \frac{8315}{245,6 \cdot 32} = 0,186,$$

$$u'_{\text{N}_2} = \varepsilon'_{\text{N}_2} \frac{R_{\text{N}_2}}{R_{\text{AB}}} = 0,409 \cdot \frac{8315}{245,6 \cdot 28} = 0,495.$$

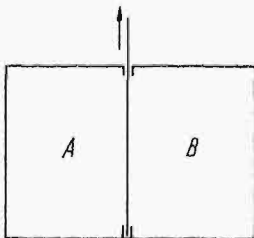
Ciśnienia cząstkowe mieszaniny obliczono wg wzoru (4.9a):

$$p'_{\text{CO}_2} = u'_{\text{CO}_2} p_{\text{AB}} = 0,319 \cdot 4,72 \cdot 10^5 = 1,506 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2,$$

$$p'_{\text{O}_2} = u'_{\text{O}_2} p_{\text{AB}} = 0,186 \cdot 4,72 \cdot 10^5 = 0,878 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2,$$

$$p'_{\text{N}_2} = u'_{\text{N}_2} p_{\text{AB}} = 0,495 \cdot 4,72 \cdot 10^5 = 2,336 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2.$$

4.2.13. Zbiornik przedzielony jest szczelną zasuwą (rys.4.2). W części A o pojemności $V_A = 2 \text{ m}^3$ znajduje się dwutlenek węgla przy ciśnieniu bezwzględnym $p_A = 3 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ i temperaturze $T_A = 473^\circ\text{K}$ (200°C). Część B wypełnia tlen w ilości $m_B = 8 \text{ kg}$ o ciśnieniu $p_B = 1,0 \text{ MN/m}^2$ i $T_B = 353^\circ\text{K}$ (80°C). Po otwarciu zasuw nastąpiło zmieszanie gazów. Obliczyć ciśnienie i temperaturę otrzymanej mieszaniny. Obliczenia przeprowadzić traktując gazy jako doskonałe. Przyjąć, że nie istnieje wymiana ciepła z otoczeniem. Objętość zasuw pominąć.



Rys.4.2

Odp. $p_{\text{AB}} = 6,10 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$, $T_{\text{AB}} = 412^\circ\text{K}$ (139°C).

4.2.14. Gaz generatorowy podgrzewany jest przy stałym ciśnieniu w przeponowym wymienniku ciepła od temperatury

$T_1 = 873^{\circ}\text{K}$ (600°C) do $T_2 = 1273^{\circ}\text{K}$ (1000°C). Skład objętościowy gazu: $u_{\text{CO}_2} = 0,05$, $u_{\text{CO}} = 0,26$, $u_{\text{H}_2} = 0,13$, $u_{\text{N}_2} = 0,56$. Natężenie przepływu gazu przez wymiennik $\dot{m} = 8,96 \text{ kg/s}$. Traktując składniki mieszaniny jako gazy doskonałe obliczyć moc cieplną wymiennika.

Odp. $Q = 4,18 \text{ MW}$.

- 4.2.15. Mieszaninę gazów o masie $m_m = 5 \text{ kg}$ i udziałach masowych: $\xi_{\text{CO}_2} = 0,2$, $\xi_{\text{N}_2} = 0,5$, $\xi_{\text{H}_2\text{O}} = 0,3$ przy stałym ciśnieniu podgrzano od temperatury $T_1 = 573^{\circ}\text{K}$ (300°C) do $T_2 = 873^{\circ}\text{K}$ (600°C). Traktując składniki mieszaniny jako gazy półdoskonałe obliczyć ilość doprowadzonego ciepła.

Rozwiązanie

Ilość doprowadzonego ciepła wynosi:

$$Q = m_m c_{pm} \left|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) \text{ kJ}.$$

Ze wzoru (4.11a) wynika:

$$c_{pm} \left|_{t_1}^{t_2} = \xi_{\text{CO}_2} \cdot c_{p\text{CO}_2} \left|_{t_1}^{t_2} + \xi_{\text{N}_2} c_{p\text{N}_2} \left|_{t_1}^{t_2} + \xi_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{p\text{H}_2\text{O}} \left|_{t_1}^{t_2}.$$

Z tabl.7 odczytano średnie molowe ciepła właściwe składników mieszaniny dla $t_1 = 300^{\circ}\text{C}$ i $t_2 = 600^{\circ}\text{C}$:

$$M_B c_{p\text{CO}_2} \left|_0^{600} = 45,753 \text{ kJ/(kmol}\cdot\text{deg)},$$

$$M_B c_{p\text{N}_2} \left|_0^{600} = 30,149 \text{ kJ/(kmol}\cdot\text{deg)},$$

$$M_B c_{p\text{CO}_2} \left|_0^{300} = 41,755 \text{ kJ/(kmol}\cdot\text{deg)},$$

$$M_B c_{p\text{N}_2} \left|_0^{300} = 29,383 \text{ kJ/(kmol}\cdot\text{deg)},$$

$$M_B c_{p\text{H}_2\text{O}} \left|_0^{600} = 36,195 \text{ kJ/(kmol}\cdot\text{deg)},$$

$$M_B c_{p\text{H}_2\text{O}} \left|_0^{300} = 34,575 \text{ kJ/(kmol}\cdot\text{deg)}.$$

Odnosząc odczytane wartości do masy 1 kg gazu:

$$c_{pCO_2} \Big|_0^{600} = \frac{44,753}{44} = 1,040 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{deg)},$$

$$c_{pN_2} \Big|_0^{600} = \frac{30,149}{44} = 1,077 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{deg)},$$

$$c_{pCO_2} \Big|_0^{300} = \frac{41,255}{44} = 0,948 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{deg)},$$

$$c_{pN_2} \Big|_0^{300} = \frac{29,383}{44} = 1,048 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{deg)},$$

$$c_{pH_2O} \Big|_0^{600} = \frac{36,195}{18} = 2,011 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{deg)},$$

$$c_{pH_2O} \Big|_0^{300} = \frac{34,575}{18} = 1,918 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{deg)}.$$

Średnie ciepła właściwe składników mieszaniny w zakresie temperatur od t_1 do t_2 zgodnie ze wzorem (3.9) wynoszą:

$$c_{pCO_2} \Big|_{300}^{600} = \frac{1,040 \cdot 600 - 0,948 \cdot 300}{600 - 300} = 1,132 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{deg)},$$

$$c_{pN_2} \Big|_{300}^{600} = \frac{1,077 \cdot 600 - 1,048 \cdot 300}{600 - 300} = 1,112 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{deg)},$$

$$c_{pH_2O} \Big|_{300}^{600} = \frac{2,011 \cdot 600 - 1,918 \cdot 300}{600 - 300} = 2,100 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{deg)},$$

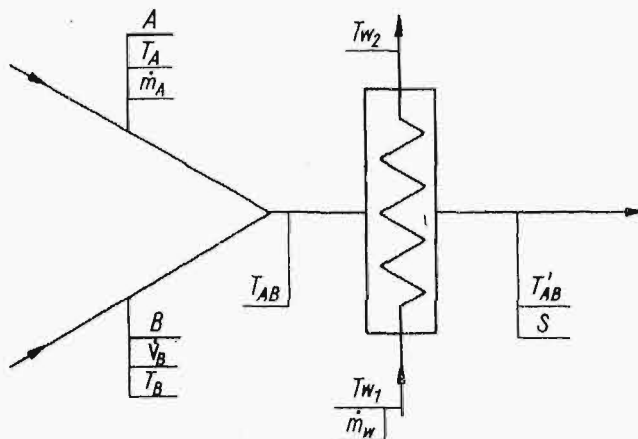
Podstawiając wyznaczone wartości do wzoru (4.11a) otrzymamy:

$$\begin{aligned} c_{pm} \Big|_{300}^{600} &= 0,2 \cdot 1,132 + 0,5 \cdot 1,112 + 0,3 \cdot 2,100 = \\ &= 1,4124 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{deg)}. \end{aligned}$$

Ostatecznie

$$\begin{aligned} Q &= m_m c_{pm} \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = 5 \cdot 1,4124 (600 - 300) = 2120 \text{ kJ}, \\ Q &= 2,12 \text{ MJ}. \end{aligned}$$

4.2.16. Dwa strumienie gazów (rys.4.3) zostają zmieszane w kanale zbiorczym i ochłodzone do temperatury $T'_{AB} = 473^{\circ}\text{K}$



Rys.4.3

(200°C). Kanałem A płynie $\dot{m}_A = 4,17 \text{ kg/s}$ powietrza o temperaturze $T_A = 873^{\circ}\text{K}$ (600°C). W kanale B płynie dwutlenek węgla w ilości $\dot{V}_B = 5,56 \text{ m}^3/\text{s}$ o temperaturze $T_B = 1273^{\circ}\text{K}$ (1000°C).

Obliczyć ilość wody przepływającą przez chłodnicę, jeżeli jej temperatura wzrosła od $T_{w1} = 288^{\circ}\text{K}$ (15°C) do $T_{w2} = 338^{\circ}\text{K}$ (65°C). Ponadto obliczyć prędkość gazu w kanale za chłodnicą, jeżeli pole przekroju poprzecznego kanału wynosi $s = 1,2 \text{ m}^2$. Ciśnienie w kanałach przyjąć stałe i równe $p = 2 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$. Założyć, że straty ciepła na rzecz otoczenia są tak znikome, że można je w obliczeniach pominąć. Uwzględnić zmienność ciepła właściwego.

Rozwiązanie

Masowe natężenie przepływu w kanale B (CO_2) wyznaczono z równania stanu gazu

$$\dot{m}_B = \frac{p \dot{V}_B}{R_B T_B} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 44 \cdot 5,56}{8315 \cdot 1273} = 4,62 \text{ kg/s}.$$

Równania bilansu cieplnego i masowego mieszających się strumieni gazu mają postać:

$$\dot{m}_A \cdot c_{pA} \Big|_0^{t_A} \cdot t_A + \dot{m}_B \cdot c_{pB} \Big|_0^{t_B} \cdot t_B = \dot{m}_{AB} \cdot c_{pAB} \Big|_0^{t_{AB}} \cdot t_{AB}$$

$$\dot{m}_{AB} = \dot{m}_A + \dot{m}_B,$$

skąd

$$t_{AB} \cdot c_{pAB} \Big|_0^{t_{AB}} = \frac{\dot{m}_A \cdot c_{pA} \Big|_0^{t_A} \cdot t_A + \dot{m}_B \cdot c_{pB} \Big|_0^{t_B} \cdot t_B}{\dot{m}_A + \dot{m}_B}.$$

Z tekstu zadania wynika $t_A = 600^\circ\text{C}$, $t_B = 1000^\circ\text{C}$.

Z tabl.3 odczytano pozorną masę cząsteczkową powietrza $\mu \approx 28,97$, a z tablicy 8:

$$M_B c_{pA} \Big|_0^{600} = 30,405 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{deg}) \quad (\text{powietrze}),$$

$$M_B c_{pB} \Big|_0^{1000} = 49,392 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{deg}) \quad (\text{CO}_2),$$

zatem

$$c_{pA} \Big|_0^{600} = \frac{30,405}{28,97} = 1,052 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{deg}),$$

$$c_{pB} \Big|_0^{1000} = \frac{49,392}{44} = 1,122 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{deg}).$$

Po wstawieniu wyznaczonych wartości otrzymuje się:

$$t_{AB} \cdot c_{pAB} \Big|_0^{t_{AB}} = \frac{4,17 \cdot 1,052 \cdot 600 + 4,62 \cdot 1,122 \cdot 1000}{4,17 + 4,62} = 889.$$

Można napisać:

$$f(t_{AB}) = t_{AB} \cdot c_{pAB} \Big|_0^{t_{AB}} - 889.$$

Udziały masowe mieszaniny:

$$g_{\text{pow}} = \frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_A + \dot{m}_B} = \frac{4,17}{4,17 + 4,62} = 0,474,$$

$$g_{\text{CO}_2} = \frac{\dot{m}_B}{\dot{m}_A + \dot{m}_B} = \frac{4,62}{4,17 + 4,62} = 0,526.$$

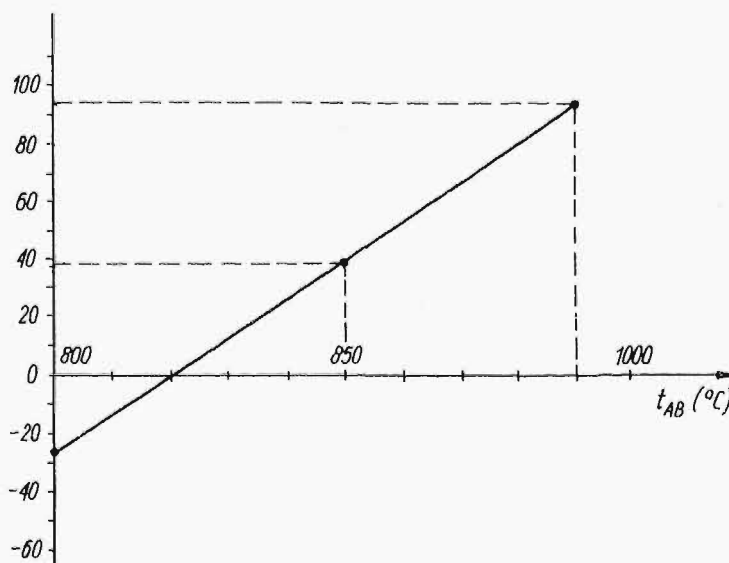
Temperaturę t_{AB} znaleziono metodą wykreślną. Dla trzech założonych temperatur t_{AB} odczytano z tabl.7 wartości molowego ciepła właściwego oraz wyznaczono średnie ciepło właściwe mieszaniny wg zależności (4.11a):

$$c_{pAB} \Big|_0^{t_{AB}} = \varepsilon_{\text{pow}} \cdot c_{pA} \Big|_0^{t_{AB}} + \varepsilon_{\text{CO}_2} \cdot c_{pB} \Big|_0^{t_{AB}}.$$

Wyniki obliczeń zestawiono w tabelce:

t_{AB}	$M_B c_{pA} \Big _0^{t_{AB}}$	$M_B c_{pB} \Big _0^{t_{AB}}$	$c_{pA} \Big _0^{t_{AB}}$	$c_{pB} \Big _0^{t_{AB}}$	$c_{pAB} \Big _0^{t_{AB}}$	$f(t_{AB})$
$^{\circ}\text{C}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kmol} \cdot \text{deg}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kmol} \cdot \text{deg}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{deg}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{deg}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{deg}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
800	31,028	47,763	1,073	1,086	1,080	-25
850	31,174	48,190	1,078	1,095	1,088	37
900	31,321	48,617	1,084	1,105	1,095	97

Nanosząc otrzymane wartości na wykres (rys.4.4) odczytano temperaturę $t_{AB} = 820^{\circ}\text{C}$, przy której $f(t_{AB}) = 0$.



Rys.4.4

Równanie bilansu cieplnego chłodnicy wodnej ma postać:

$$(\dot{m}_A + \dot{m}_B) c_{pAB} \left| \frac{t_{AB}}{t'_{AB}} \right| \cdot (t_{AB} - t'_{AB}) = \dot{m}_w c_w (t_{w2} - t_{w1}),$$

skąd natężenie przepływu wody chłodzącej

$$\dot{m}_w = \frac{(\dot{m}_A + \dot{m}_B) c_{pAB} \left| \frac{t_{AB}}{t'_{AB}} \right| \cdot (t_{AB} - t'_{AB})}{c_w (t_{w2} - t_{w1})} \text{ kg/s},$$

gdzie: $c_w = 4,187 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{deg})$ ciepło właściwe wody,
 $t_{w2} = 65^\circ\text{C}$, $t_{w1} = 15^\circ\text{C}$ - temperatury wody chłodzącej.

Średnie ciepła właściwe mieszaniny w zakresie temperatur od t'_{AB} do t_{AB} obliczono korzystając z zależności (4.11a) i (3.9):

$$c_{pAB} \left| \frac{820}{0} \right| = g_{\text{pow}} c_{pA} \left| \frac{820}{0} \right| + g_{\text{CO}_2} c_{pB} \left| \frac{820}{0} \right| = 0,474 \frac{31,085}{28,9} + 0,526 \frac{47,934}{44} =$$

$$= 1,083 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{deg}),$$

$$c_{pAB} \left| \frac{200}{0} \right| = g_{\text{pow}} c_{pA} \left| \frac{200}{0} \right| + g_{\text{CO}_2} c_{pB} \left| \frac{200}{0} \right| = 0,474 \frac{29,299}{28,9} + 0,526 \frac{40,059}{44} =$$

$$= 0,959 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{deg}),$$

$$c_{pAB} \left| \frac{820}{200} \right| = \frac{c_{pAB} \left| \frac{820}{0} \right| \cdot t_{AB} - c_{pAB} \left| \frac{200}{0} \right| \cdot t'_{AB}}{t_{AB} - t'_{AB}} = \frac{1,083 \cdot 820 - 0,959 \cdot 200}{820 - 200} =$$

$$= 1,123 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{deg}).$$

Wstawiając wyznaczone wartości otrzymano:

$$\dot{m}_w = \frac{(4,17 + 4,62) \cdot 1,123 (820 - 200)}{4,187 \cdot (65 - 15)} = 29,2 \text{ kg/s}.$$

Obliczenie prędkości gazu w kanale za chłodnicą.

Objętościowe natężenie przepływu gazu

$$\dot{V}_{AB} = \frac{(\dot{m}_A + \dot{m}_B) R_{AB} T'_{AB}}{p} \text{ m}^3/\text{s},$$

$$R_{AB} = 8315 \left(\frac{g_{\text{pow}}}{28,9} + \frac{g_{\text{CO}_2}}{44} \right) = 8315 \left(\frac{0,474}{28,9} + \frac{0,526}{44} \right) =$$

$$= 236 \text{ J/(kg}\cdot\text{deg)},$$

więc

$$\dot{V} = \frac{(4,17 + 4,62) 236 \cdot 473}{2 \cdot 10^5} = 4,9 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Ostatecznie prędkość w kanale

$$w = \frac{\dot{V}}{S} = \frac{4,9}{1,2} = 4,08 \text{ m/s},$$

$$w = 4,08 \text{ m/s}.$$

4.2.17. Dokonano pomiaru temperatury i składu spalin wypływających z kotła do czopucha. Uzyskano następujące wyniki: $T_{\text{sp}} = 573^\circ\text{K}$ (300°C), $u_{\text{CO}_2} = 0,10$, $u_{\text{O}_2} = 0,08$, $u_{\text{H}_2\text{O}} = 0,05$, $u_{\text{N}_2} = 0,77$. Ponieważ obmurze czopucha jest nieszczelne, więc przy panującym w nim podciśnieniu pewna ilość suchego powietrza zostaje zassana. Zassane powietrze mieszając się ze spalinami obniża ich temperaturę. Pojedynczy pomiar na końcu czopucha wykazał, że udział objętościowy CO_2 zmalał do $u'_{\text{CO}_2} = 0,08$. Temperatura podsysanego powietrza $T_p = 273^\circ\text{K}$ (0°C).

Pomijając niewielkie straty ciepła na rzecz otoczenia oraz traktując gazy jako półdoskonałe obliczyć temperaturę i objętościowy skład spalin na końcu czopucha.

Wskazówka: Ilość zassanego powietrza n_o w kmol oblicza się z masowego bilansu CO_2 ;

$$n_1 u_{\text{CO}_2} = (n_1 + n_o) u'_{\text{CO}_2},$$

skąd

$$\frac{n_o}{n_1} = \frac{u_{\text{CO}_2} - u'_{\text{CO}_2}}{u'_{\text{CO}_2}},$$

gdzie: n_o - ilość zassanego powietrza, kmol,

n_1 - ilość spalin. na początku czopucha, kmol.

Odp. $u'_{CO_2} = 0,08$, $u'_{H_2O} = 0,04$, $u'_{O_2} = 0,106$, $u'_{N_2} = 0,774$,

$T'_{sp} = 516^\circ K$ ($243^\circ C$).

4.2.18. Silnik spalinowy o mocy $N = 1,36$ kW spala w ciągu godziny $m_p = 0,18$ kg ciekłego paliwa. Analiza spalin opuszczających cylinder silnika pozwoliła określić ich skład masowy: $m_{CO_2} = 0,14$, $m_{O_2} = 0,04$, $m_{H_2O} = 0,08$, $m_{N_2} = 0,74$. Ponadto wiadomo, że z 1 kg spalonego paliwa powstaje $m_g = 20$ kg gazów spalinowych.

Obliczyć ile ciepła odniesionego do 1 kW·h zostaje uniesione ze spalinami, jeżeli ich temperatura równa jest $T_{sp} = 773^\circ K$ ($500^\circ C$), a temperatura powietrza zewnętrznego $T_o = 283^\circ K$ ($10^\circ C$). Spaliny traktować jako gazy półdoskonałe.

Odp. $Q = 1992$ kJ/kW·h.

4.2.19. Na wysokości $H = 2000$ m nad poziomem morza unosi się balon wypełniony mieszaniną wodoru i powietrzem. Skład masowy mieszaniny $m_{H_2} = 0,95$, $m_{pow} = 0,05$. Objętość balonu wynosi $V = 12 \cdot 10^4$ m³. Obliczyć siłę nośną balonu, jeżeli ciśnienie barometryczne na tej wysokości $b = 68,6$ kN/m², a temperatura $T = 273^\circ K$ ($0^\circ C$). O ile zwiększyłaby się siła nośna balonu, jeżeli wypełniony byłby czystym wodorem.

Odp. $G = 955$ kN, $\Delta G = 3,53$ kN.

4.2.20. Gaz świetlny o składzie objętościowym: $u_{H_2} = 0,48$, $u_{CH_4} = 0,35$, $u_{CO} = 0,12$, $u_{N_2} = 0,05$ wypełnia zbiornik o pojemności $V = 100$ m³. Początkowe parametry gazu w zbiorniku; ciśnienie $p_1 = 2,94 \cdot 10^5$ N/m², $T = 293^\circ K$ ($20^\circ C$). Na skutek wypuszczenia części gazu ciśnienie spadło do $p_2 = 2,25$ bar, a temperatura do $t_2 = 12^\circ C$.

Zakładając, że zbiornik jest doskonale izolowany, obliczyć masę upuszczonego gazu.

Odp. $\Delta M = 190$ kg.