

## ZADANIA Z PODSTAW TERMODYNAMIKI

### LISTA NR 2

#### PODSTAWOWE PRAWA I WZORY

- 1) Bilans energii (dla układu zamkniętego)

$$E_d - E_w = \Delta E_{uk} \quad (1)$$

gdzie

$E_d$  energia doprowadzona do układu, J

$E_w$  energia wyprowadzona z układu, J

$\Delta E_{uk}$  zmiana energii układu, J

W stanie ustalonym  $\Delta E_{uk} = 0 \Rightarrow E_d = E_w$ .

- 2) Bilans strumieni energii (dla układu otwartego)

$$\dot{E}_d d\tau - \dot{E}_w d\tau = \Delta E_{uk} \quad (2)$$

gdzie

$\dot{E}_d$  strumień energii doprowadzonej do układu, W

$\dot{E}_w$  strumień energii wyprowadzonej z układu, W

$d\tau$  elementarny czas trwania procesu, s

W stanie ustalonym  $\Delta E_{uk} = 0 \Rightarrow \dot{E}_d = \dot{E}_w$ .

- 3) Zależność pomiędzy  $c_p$ ,  $c_v$  i  $R$

$$c_p - c_v = R \quad (3)$$

$$Mc_p - Mc_v = (MR) \quad (4)$$

- 4) Wykładnik adiabaty  $\kappa$

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{Mc_p}{Mc_v} \quad (5)$$

- 5) Przydatne wzory na  $c_p$  i  $c_v$

$$c_p = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R, \quad Mc_p = \frac{\kappa}{\kappa - 1} (MR) \quad (6)$$

$$c_v = \frac{1}{\kappa - 1} R, \quad Mc_v = \frac{1}{\kappa - 1} (MR) \quad (7)$$

- 6) Średnie ciepło właściwe  $c \Big|_{T_1}^{T_2}$  dla przedziału temperatur  $T_1 \div T_2$

$$c \Big|_{T_1}^{T_2} = \frac{c \Big|_{T_0}^{T_2} (T_2 - T_0) - c \Big|_{T_0}^{T_1} (T_1 - T_0)}{T_2 - T_1} \quad (8)$$

gdzie

$T_0$  temperatura graniczna, K (zwykle  $T_0 = 0$  K). Dla gazu doskonałego jest  $c \Big|_{T_1}^{T_2} = c = const$

- 7) Energia wewnętrzna właściwa  $u$  gazu doskonałego lub półdoskonałego

$$u = c_v \Big|_0^T T + u_0 \quad (9)$$

gdzie

$u_0$  energia wewnętrzna odniesienia, J/kg. Zwykle dla  $T_0 = 0 \text{ K}$ ,  $u_0 = 0 \text{ J/kg}$ .

8) Energia wewnętrzna właściwa  $u$  mieszaniny

$$u = \sum_i g_i u_i = T \left( g_1 c_{v1} \Big|_0^T + g_2 c_{v2} \Big|_0^T + \dots \right) \quad (10)$$

9) Pojemność cieplna  $c_v$  mieszaniny

$$c_v = g_1 c_{v1} \Big|_0^T + g_2 c_{v2} \Big|_0^T + \dots = \sum_i g_i c_{vi} \Big|_0^T \quad (11)$$

10) Pojemność cieplna  $c_p$  mieszaniny

$$c_p = g_1 c_{p1} \Big|_0^T + g_2 c_{p2} \Big|_0^T + \dots = \sum_i g_i c_{pi} \Big|_0^T \quad (12)$$

11) Entalpia właściwa  $i$  gazu doskonałego lub półdoskonałego

$$i = c_p \Big|_0^T T + i_0 \quad (13)$$

gdzie

$i_0$  entalpia odniesienia, J/kg. Zwykle dla  $T_0 = 0 \text{ K}$  lub  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ,  $i_0 = 0 \text{ J/kg}$ .

12) Entalpia właściwa  $i$  mieszaniny

$$i = \sum_i g_i i_i = T \left( g_1 c_{p1} \Big|_0^T + g_2 c_{p2} \Big|_0^T + \dots \right) \quad (14)$$

13) Molowa pojemność cieplna mieszaniny  $Mc_i$

$$(Mc_i) \Big|_0^T = z_1 (Mc)_1 \Big|_0^T + z_2 (Mc)_2 \Big|_0^T + \dots = \sum_i z_i (Mc)_i \Big|_0^T \quad (15)$$

gdzie za  $i$  wstawiamy „p” lub „v”.

14) Wykładnik adiabaty mieszaniny

$$\frac{1}{\kappa - 1} = \sum_i \frac{z_i}{\kappa_i - 1} \quad (16)$$

## ZADANIA

**1.** Mieszanina helu, azotu i metanu ma następujący skład:  $g_{\text{He}} = 0,06$ ,  $g_{\text{N}_2} = 0,46$ ,  $g_{\text{CH}_4} = 0,48$ . Określić entalpię właściwą i energię wewnętrzną właściwą mieszaniny dla  $T = 800 \text{ K}$ . Przyjąć, że dla  $T = 273,15 \text{ K}$   $u = 0$ . Gazy traktować jak doskonałe. **Odp:  $u_m = 672,37 \text{ kJ/kg}$ ,  $i_m = 1081,1 \text{ kJ/kg}$ .**

**2.** Do zaizolowanego grzejnika elektrycznego o mocy  $N = 10 \text{ kW}$  dopływa  $\dot{n} = 10 \text{ kmol/h}$  roztworu gazowego zawierającego tlenek węgla CO oraz hel He (gazy doskonałe). W grzejniku temperatura gazu wzrasta izobarycznie od  $T_1 = 300 \text{ K}$  do  $T_2 = 450 \text{ K}$ . Obliczyć dla rozpatrywanego roztworu stosunek ciepła właściwego  $\kappa = c_p/c_v$ . **Odp:  $\kappa = 1,53$ .**

**3.** W komorze o objętości  $V = 25 \text{ m}^3$  znajduje się trójatomowy gaz doskonały, którego ciśnienie wynosi  $p = 0,21 \text{ MPa}$ . Na ścianach komory umieszczono 4 grzałki o mocy  $1200 \text{ W}$  każda. Po jakim czasie od chwili włączenia grzałek temperatura gazu wzrośnie trzykrotnie? Straty ciepła do otoczenia wynoszą 10% ciepła dostarczonego przez grzałki. **Odp:  $\tau = 7299 \text{ s}$ .**

**4.** W zbiorniku o stałej objętości znajduje się  $n = 10 \text{ kmol}$  roztworu zawierającego metan  $\text{CH}_4$  oraz hel He (gazy doskonałe). Parametry początkowe roztworu wynoszą  $p_1 = 0,1 \text{ MPa}$ ,  $T_1 = 300 \text{ K}$ . Wskutek pochłonięcia ciepła  $Q_{c1-2} = 60 \text{ MJ}$  ciśnienie roztworu wzrosło do  $p_2 = 0,2 \text{ MPa}$ . Obliczyć udziały molowe składników roztworu gazowego. **Odp:  $z_{\text{CH}_4} = 0,604$ ,  $z_{\text{He}} = 0,396$ .**

5. W zbiorniku o objętości  $V = 10 \text{ m}^3$  znajduje się azot o parametrach  $p_1 = 0,1 \text{ MPa}$ ,  $T_1 = 300 \text{ K}$ . Grzejnik elektryczny o mocy  $N_{el} = 8 \text{ kW}$  zainstalowany wewnątrz zbiornika powoduje ogrzanie gazu do temperatury  $T_2 = 800 \text{ K}$ . Do ścian zbiornika wnika 15% ciepła dostarczonego przez grzejnik. Akumulację energii w grzejniku można pominąć. Obliczyć ilość ciepła pobranego przez azot oraz czas jego ogrzewania traktując azot jak: a) gaz doskonały, b) gaz półdoskonały. **Odp: a)  $Q_{1-2} = 4,16 \text{ MJ}$ ,  $\tau = 613 \text{ s}$ . b)  $Q'_{1-2} = 4,35 \text{ MJ}$ ,  $\tau' = 639 \text{ s}$ .**

6. Roztwór gazów doskonałych o stosunku ciepła właściwego  $\kappa = 1,5$  podlega w układzie zamkniętym przemianie bez tarcia opisanej prostoliniową zależnością  $p(V)$ . Parametry gazu wynoszą:  $p_1 = 0,5 \text{ MPa}$ ,  $V_1 = 0,1 \text{ m}^3$ ,  $p_2 = 0,2 \text{ MPa}$ ,  $V_2 = 0,5 \text{ m}^3$ . Obliczyć ilość ciepła doprowadzonego do gazu oraz pracę bezwzględną wykonaną przez gaz. **Odp:  $Q_{1-2} = 240 \text{ kJ}$ ,  $L_{1-2} = 140 \text{ kJ}$ .**

7. W cylindrze o średnicy  $D = 250 \text{ mm}$  znajduje się jednoatomowy gaz doskonały. Cylinder zamknięto ruchomym tłokiem, który łącznie z umieszczonym na nim ciężarem ma masę  $m = 145 \text{ kg}$ . Na początku tłok znajduje się na wysokości  $H_1 = 0,3 \text{ m}$ . Jak długo należy podgrzewać gaz grzałką elektryczną o mocy  $N = 100 \text{ W}$ , by temperatura gazu wzrosła czterokrotnie? Ciśnienie otoczenia  $p_{ot} = 0,101 \text{ MPa}$ . Przyjmując, że ciepło dostarczone przez grzałkę w całości zostanie zużyte na wykonanie pracy i zmianę energii wewnętrznej gazu. **Odp:  $\tau = 143 \text{ s}$ .**

8. W doskonale zaizolowanym zbiorniku o objętości  $V$  znajduje się gaz doskonały, którego ciepło właściwe wynosi  $c_p = 1000 \text{ J/kg K}$ , zaś indywidualna stała gazowa ma wartość  $R = 260 \text{ J/kg K}$ . Parametry początkowe gazu w zbiorniku wynoszą  $p_1 = 0,3 \text{ MPa}$ ,  $T_1 = 323 \text{ K}$ . Do zbiornika doprowadzono taki sam gaz zwiększając jego ilość dwukrotnie. Gaz ładowany do zbiornika miał temperaturę  $T_d = 373 \text{ K}$ . Obliczyć ciśnienie końcowe gazu w zbiorniku  $p_2$ . **Odp:  $p_2 = 0,768 \text{ MPa}$ .**

9. W zbiorniku znajduje się tlen o temperaturze  $T_1 = 298 \text{ K}$  przy nadciśnieniu  $p_n = 250 \text{ kPa}$ . Do zbiornika doprowadzono dodatkowo  $m_d = 15 \text{ kg}$  helu  $\text{He}$  o temperaturze  $T_d = 291 \text{ K}$ , w wyniku czego parametry gazu w zbiorniku zmieniły się na  $p_2 = 1,8 \text{ MPa}$ ,  $T_2 = 305 \text{ K}$ . Ciśnienie otoczenia wynosi  $p_{ot} = 106 \text{ kPa}$ . Traktując gazy jak doskonałe obliczyć: a) objętość zbiornika  $V$ , b) masę tlenu  $m_1$  w zbiorniku w stanie początkowym, c) ciepło  $Q_w$  wyprowadzone do otoczenia podczas ładowania zbiornika. **Odp: a)  $V = 6,63 \text{ m}^3$ , b)  $m_1 = 30,5 \text{ kg}$ , c)  $Q_w = 8,27 \text{ MJ}$ .**

10. Do izobarycznego mieszalnika dopływają rurociągami dwa gazy. Pierwszym rurociągiem płynie  $m_1 = 150 \text{ kg/min}$  azotu  $\text{N}_2$  o temperaturze  $T_1 = 293 \text{ K}$ , drugim płynie tlen o parametrach  $p_2 = 0,5 \text{ MPa}$ ,  $T_2 = 473 \text{ K}$  ze średnią prędkością  $w_2 = 20 \text{ m/s}$ . Drugi rurociąg ma średnicę  $d_2 = 0,2 \text{ m}$ . Przyjmując, że gazy można traktować jak doskonałe, obliczyć temperaturę roztworu gazów  $T_w$  na wylocie z mieszalnika oraz jego objętość  $\dot{V}$  w tym miejscu. Straty ciepła z mieszalnika do otoczenia wynoszą  $Q_{ot} = 15 \text{ kW}$ . **Odp:  $T_w = 375 \text{ K}$ ,  $\dot{V} = 1,05 \text{ m}^3/\text{s}$ .**