

## Termodynamika I - zadania

1. W zbiorniku o objętości  $V = 45 \text{ m}^3$  znajduje się dwutlenek węgla  $\text{CO}_2$  o gęstości  $\rho_n = 1,2 \text{ kmol/m}^3$ . Obliczyć, w kg, kmol oraz  $\text{um}^3$ , ilość substancji  $\text{CO}_2$  znajdującej się w zbiorniku. Odp.: 2376 kg, 54 kmol, 1226  $\text{um}^3$ .
2. Bijak młota mechanicznego o masie  $m_1 = 185 \text{ kg}$  spada swobodnie z wysokości  $h = 2 \text{ m}$  na matrycę stalową o masie  $m_2 = 60 \text{ kg}$ . Częstość uderzeń  $n = 120 \text{ 1/min}$ . Temperatura początkowa matrycy  $t_1 = 45^\circ\text{C}$ . Ciepło właściwe stali  $c = 0,452 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ . Obliczyć czas  $\tau$  [min] po jakim temperatura matrycy podniesie się do  $t_2 = 520^\circ\text{C}$ , przy założeniu, że 65% ciepła wydzielonego przy uderzeniach podgrzewa matrycę, reszta zaś ciepła rozprasza się do otoczenia. Odp.:  $\tau = 45,5 \text{ min}$ .
3. W czajniku elektrycznym z grzałką o mocy  $P = 1500 \text{ W}$  zagotowano 1,5 l wody o temperaturze początkowej  $t_1 = 19^\circ\text{C}$ . Temperatura wrzenia wody przy danym ciśnieniu wynosi  $t_2 = 99^\circ\text{C}$ . Ile czasu  $\tau$  [min] zajęło gotowanie wody i ile zużyto energii elektrycznej  $E$  [kWh], jeżeli strata ciepła na rzecz otoczenia wynosiła 25,5% mocy grzałki? Ciepło właściwe wody przyjmując równe  $c_w = 4,1868 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ , a jej gęstość  $\rho = 1 \text{ kg/dm}^3$ . Odp.:  $\tau = 7,49 \text{ min}$ ,  $E = 0,187 \text{ kWh}$ .
4. Do zbiornika zawierającego wodę zimną o temperaturze  $t_1 = 24^\circ\text{C}$  dolano pewną ilość wody gorącej o temperaturze  $t_d = 90^\circ\text{C}$  uzyskując  $V_2 = 210 \text{ l}$  wody cieplej o temperaturze  $t_2 = 42^\circ\text{C}$ . Ile litrów wody początkowo zawierał zbiornik? Odp.:  $V_1 = 152,7 \text{ l}$ .
5. Zetknięto ze sobą 2,6 kg stali o temperaturze  $75^\circ\text{C}$  z 4,2 kg miedzi o temperaturze  $20^\circ\text{C}$ , aż do wyrównania się temperatur. Obliczyć temperaturę końcową metali, jeżeli podczas wyrównywania się temperatur 15 kJ ciepła przepłynęło do otoczenia. Ciepło właściwe stali wynosi  $0,45 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ , ciepło właściwe miedzi jest równe  $0,385 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ . Odp.:  $37,7^\circ\text{C}$ .
6. Jaką masę, w kg, miał kawałek metalu o cieple właściwym  $393 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$  i temperaturze  $350 \text{ K}$ , jeżeli po wrzuceniu go do 1 kg cieczy o cieple właściwym  $3,86 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$  i temperaturze  $12^\circ\text{C}$  ustaliła się wyrównana temperatura  $17^\circ\text{C}$ . Podczas wyrównywania się temperatur do otoczenia przepłynęły 4 kJ ciepła. Napisać co przyjęto za układ podczas obliczeń oraz określić  $E_d$ ,  $E_w$  oraz  $\Delta E_u$  dla przyjętego układu. Ponadto obliczyć ile ciepła oddał metal. Odp.: 0,988 kg,  $-23,3 \text{ kJ}$ .
7. Moc silnika  $N = 300 \text{ kW}$ . W silniku tym 30% ciepła wydzielającego się wskutek spalania zamieniana jest w pracę, 25% zaś przechodzi do wody chłodzącej. Obliczyć strumień  $m_w$  [kg/s] wody chłodzącej silnik, jeżeli jej temperatura na dopływie  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ , na wypływie  $t_2 = 50^\circ\text{C}$ . Ciepło właściwe wody przyjmując  $c = 4187 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ . Odp.:  $m_w = 1,99 \text{ kg/s}$ .
8. Do wymiennika ciepła dopływa 1,5 kg/s wody o temperaturze  $23^\circ\text{C}$ . Woda ta ochładza 2,3 kg/s oleju od temperatury  $75^\circ\text{C}$  do temperatury  $65^\circ\text{C}$ . Jaka jest temperatura wody na wylocie z wymiennika? Ciepło właściwe wody  $4,19 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ , ciepło właściwe oleju  $1,95 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ . Zadanie rozwiązać wychodząc z pierwszej zasady termodynamiki. Za układ przyjmując cały wymiennik. Odp.:  $30,1^\circ\text{C}$ .
9. Jaką moc cieplną ma elektryczna nagrzewnica wody, jeżeli podgrzewa ona 35 l/min wody od temperatury  $12^\circ\text{C}$  do temperatury  $55^\circ\text{C}$  przy stratach ciepła na rzecz otocze-

nia równych 3% mocy nagrzewnicy. Ciepło właściwe wody przyjąć równe 4,19 kJ/(kg·K), a jej gęstość 1 kg/l. Zadanie rozwiązać wychodząc z pierwszej zasady termodynamiki. Napisać co przyjęto za układ termodynamiczny. Odp.: 108,4 kW.

10. Ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu pewnej substancji zmienia się z temperaturą liniowo:  $c_p(t) = a + bt$ . W celu określenia współczynników  $a$ ,  $b$  do substancji o temperaturze  $t_1$  doprowadzono dwukrotnie po 2 kJ/kg ciepła uzyskując kolejno przyrosty temperatury 3,15 K oraz 2,78 K. Obliczyć wartość współczynników  $a$ ,  $b$ . Odp.:  $a = 0,019646$ ,  $b = 0,028517$ .
11. W zbiorniku stalowym znajduje się  $V_u = 4,97 \text{ um}^3$  tlenu o ciśnieniu  $p = 150 \text{ bar}$  i temperaturze  $t = 16^\circ\text{C}$ . Długość zbiornika  $L = 1340 \text{ mm}$ . Obliczyć średnicę zbiornika, jeżeli ma on kształt walca. Odp.: 0,183 m.
12. Ze zbiornika o objętości  $4500 \text{ m}^3$  zawierającego metan  $\text{CH}_4$  (16) o ciśnieniu 2,1 MPa i temperaturze  $23^\circ\text{C}$  ulatnia się gaz. Obliczyć ile  $\text{um}^3$  gazu opuściło zbiornik oraz średni strumień gazu w kg/min, jeżeli ciśnienie w zbiorniku po 10 godz. zmalało o 0,2 MPa. Założyć niezmiennosć temperatury gazu podczas procesu. Odp.:  $8305 \text{ um}^3$ , 9,75 kg/min.
13. Zbiornik **A** zawiera 7 kg azotu  $\text{N}_2$  (28) o ciśnieniu 2 bar i temperaturze  $40^\circ\text{C}$ . Zbiornik **B** o objętości  $0,8 \text{ m}^3$  zawiera też azot  $\text{N}_2$  o ciśnieniu 3 bar i temperaturze  $30^\circ\text{C}$ . Zbiorniki połączono, gaz się wymieszał i osiągnął temperaturę  $34^\circ\text{C}$ . Obliczyć: (1) objętość zbiornika **A**, (2) ilość kilomoli azotu w zbiorniku **B**, (3) wyrównane ciśnienie w połączonych zbiornikach. (MR) =  $8314 \text{ J}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$ . Odp.: (1)  $3,253 \text{ m}^3$ , (2) 0,0953 kmol, (3) 2,174 bar.
14. Azot  $\text{N}_2$  (28) zawarty w zbiorniku o objętości  $2,9 \text{ m}^3$  ma ciśnienie 4,4 bar i temperaturę  $38^\circ\text{C}$ . Do zbiornika doprowadzono dodatkowo 2,2 kmol azotu. Termometr umieszczony na zbiorniku wskazał temperaturę  $45^\circ\text{C}$ . Obliczyć: (a) początkową ilość kg azotu w zbiorniku, (b) ciśnienie końcowe azotu, (c) jaką objętość miałby azot, po dopełnieniu zbiornika, gdyby jego parametry wynosiły: 1 bar,  $0^\circ\text{C}$ . Uniwersalna stała gazowa jest równa  $8314 \text{ J}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$ . Odp.: (a) 13,9 kg, (b) 4,52 bar, (c)  $11,26 \text{ m}^3$ .
15. Bezpośrednio po napełnieniu przez sprężarkę, parametry powietrza w zbiorniku o objętości  $V = 45 \text{ m}^3$  wynosiły  $p_1 = 30 \text{ bar}$  i  $t_1 = 65^\circ\text{C}$ . Jaką wartość będzie miało ciśnienie w zbiorniku po ochłodzeniu się gazu do temperatury otoczenia  $t_0 = 22^\circ\text{C}$ ? Ile ciepła przepłynie do otoczenia? O ile zmniejszy się energia wewnętrzna gazu? Odp.:  $p_2 = 26,2 \text{ bar}$ ,  $Q_{1-2} = \Delta U_{1-2} = -42,94 \text{ MJ}$ .
16. Energia wewnętrzna  $25 \text{ um}^3$  dwutlenku węgla  $\text{CO}_2$  (44) o ciśnieniu 1,9 bar jest równa 8,45 MJ. Obliczyć temperaturę i objętość  $\text{CO}_2$ . Odp.: 307,8 K,  $14,82 \text{ m}^3$ .
17. Stan początkowy  $m = 2 \text{ kg}$  wodoru  $\text{H}_2$  określony jest przez temperaturę  $t_1 = 28^\circ\text{C}$  i objętość  $V_1 = 1,8 \text{ m}^3$ . Od tego stanu gaz ekspandował *izotermicznie* do ciśnienia  $p_2 = 1,2 \text{ bar}$ . Obliczyć pracę bezwzględną ekspansji w kJ. Odp.: 6131 kJ.
18. Pewna ilość jednoatomowego gazu doskonałego ekspandowała izobarycznie przekazując do otoczenia 100 kJ pracy. Ile ciepła wymienił gaz z otoczeniem. Podać, czy gaz pochłonął, czy oddał ciepło? Odp.: gaz pochłonął 250 kJ ciepła.
19. Strumień powietrza  $m = 15 \text{ kg}/\text{min}$  o ciśnieniu  $p_1 = 2 \text{ MPa}$  i temperaturze  $t_1 = 300^\circ\text{C}$  ekspanduje izentropowo w idealnej maszynie przepływowej do ciśnienia  $p_2 = 0,2 \text{ MPa}$ . Obliczyć moc techniczną maszyny w kW. Odp.: 69,3 kW.

20. Roztwór helu He (4) i tlenu O<sub>2</sub> (32) przy ciśnieniu 1,25 bar i temperaturze 310 K ma gęstość 0,55 kg/m<sup>3</sup>. Wyznaczyć skład molowy roztworu. Odp.:  $z_{\text{He}} = 0,738$ ,  $z_{\text{O}_2} = 0,262$ .
21. Obliczyć ciepło właściwe przy stałej objętości  $c_v$  w kJ/(kg·K) roztworu gazów doskonałych składającego się z 2 kmoli tlenu O<sub>2</sub> (32) i 3 kmoli azotu N<sub>2</sub> (28). Odp.:  $c_v = 0,7022$  kJ/(kg·K).
22. W zbiorniku o objętości 0,65 m<sup>3</sup> znajduje się 5 kg tlenu O<sub>2</sub> ( $M_{\text{O}_2}=32$  kg/kmol) oraz 3 kg argonu Ar ( $M_{\text{Ar}}=40$  kg/kmol). Temperatura roztworu jest równa 320 K. Jakie ciśnienie ma roztwór? Obliczyć ilość ciepła, jaką należy doprowadzić izochorycznie do roztworu, aby jego temperatura wzrosła do 350 K. Odp.: 9,465 bar, 125,49 kJ.
23. W zamkniętym układzie termodynamicznym znajduje się roztwór 3,1 kg dwutlenku węgla CO<sub>2</sub> ( $M_{\text{CO}_2} = 44$  kg/kmol) oraz 4,8 kg Helu He ( $M_{\text{He}} = 4$  kg/kmol) o parametrach  $p_1 = 2,4$  bar i  $T_1 = 300$  K. Do roztworu doprowadzono *izobarycznie* 450 kJ ciepła. Obliczyć temperaturę i objętość roztworu na końcu przemiany. Ile wynosiła praca bezwzględna przemiany. Przemianę przedstawić na wykresach p-V oraz T-S. Odp.: 316,5 K, 13,93 m<sup>3</sup>, 174,2 kJ.
24. W adiatermicznym zbiorniku znajduje się 5 kg helu He ( $M = 4$  kg/kmol) o ciśnieniu 2 bar i temperaturze 45°C. Do zbiornika doprowadzono rurociągiem 0,5 kmol metanu CH<sub>4</sub> ( $M = 16$  kg/kmol) o temperaturze 20°C. Obliczyć temperaturę i ciśnienie roztworu w zbiorniku po doprowadzeniu metanu. Jaką objętość ma zbiornik? Wskazówka: w celu rozwiązania zadania niezbędne jest wykonanie bilansu energii. Odp.: 350,3 K, 3,084 bar, 16,52 m<sup>3</sup>.
25. Roztwór 45 um<sup>3</sup> helu He (4) i 0,6 kmol azotu N<sub>2</sub> (28) o ciśnieniu 7,6 bar i temperaturze 65°C ochłodzono izochorycznie do temperatury 25°C. Obliczyć ciśnienie końcowe roztworu oraz pracę bezwzględną i ciepło przemiany. Przemianę narysować na wykresach p-V oraz T-S zaznaczając pola pracy bezwzględnej i ciepła. Odp.: 6,701 bar, 0, -1487 kJ.
26. Do 2 kg wody o temperaturze 20°C doprowadzono 50 kJ ciepła. O ile wzrosła entropia wody? Ciepło właściwe wody przyjąć równe 4190 J/(kg·K). Odp.: 168,9 J/K.
27. Obieg cieplny silnika składa się kolejno z izobary kompresji 1-2, izentropii i izotermy. Stosunek objętości  $V_1/V_2 = 2,5$ , a parametry końca izentropowej kompresji są równe 18 bar i 1400 K. Obliczyć pracę i sprawność termiczną obiegu, jeżeli czynnikiem roboczym jest 0,01 kg helu He (4). Obieg przedstawić na wykresach o współrzędnych p-V i T-s. Odp.: 22,81 kJ, 0,3432.
28. Obieg cieplny silnika składa się kolejno z izentropii ekspansji 1-2, izotermy i izochory. Maksymalne i minimalne ciśnienie w obiegu to odpowiednio 9 bar i 1,8 bar. Maksymalna temperatura w obiegu jest równa 850 K. Czynnikiem roboczym jest 0,3 kg azotu N<sub>2</sub> ( $M = 28$  kg/kmol). Obliczyć pracę i sprawność termiczną obiegu. Obieg przedstawić na wykresach p-V oraz T-S. Odp.: 14,82 kJ, 0,2124.
29. Obieg cieplny silnika składa się kolejno z izotermy ekspansji 1-2, izobary i izentropii. Maksymalna i minimalna temperatura obiegu to odpowiednio 950 K i 320 K. Maksymalne ciśnienie w obiegu wynosi 10 bar. Czynnikiem roboczym jest 0,15 kg dwutlenku węgla CO<sub>2</sub> (44). Obliczyć: maksymalną objętość gazu w obiegu, ciepło wyprowadzone z obiegu, pracę obiegu i jego sprawność termiczną. Obieg przedstawić na wykresach p-V oraz T-S. Odp.:  $V_{\text{max}} = V_2 = 2,162$  m<sup>3</sup>,  $Q_w = Q_{2-3} = -71,42$  kJ,  $L_{\text{ob}} = 46,66$  kJ,  $\eta_t = 0,395$ .

30. Obieg cieplny silnika składa się kolejno z izentropy ekspansji 1-2, izobary i izochory. Parametry punktu 1 są następujące: 14 bar, 1150 K. Ciśnienie w punkcie 2 jest równe 3,5 bara. Obliczyć pracę obiegu i jego sprawność termiczną. Czynnikiem roboczym jest 0,3 kg azotu  $N_2(28)$ . Obieg przedstawić na wykresach  $p$ - $V$  oraz  $T$ - $S$ . Odp.:  $L_{ob} = 40,43$  kJ,  $\eta_t = 0,2105$ .
31. W kotle parowym wytwarzane jest izobarycznie 3,5 t/h pary wodnej przegrzanej o parametrach 8 bar, 310°C. Jaki strumień ciepła powinien wywiązywać się w palenisku kotła, jeżeli woda zasilająca kocioł ma temperaturę 28°C? Odp.: 2878 kW.
32. Podczas ekspansji izotermicznej  $m = 4$  kg pary wodnej o parametrach  $p_1 = 10$  bar,  $t_1 = 350^\circ\text{C}$  objętość pary wzrosła dwukrotnie. Obliczyć ciepło pochłonięte przez parę oraz pracę bezwzględną przemiany. Parę wodną potraktować jako gaz rzeczywisty. Zadanie rozwiązać z wykorzystaniem wykresu  $i$ - $s$  dla pary wodnej. Odp.:  $Q_{1-2} = 814,9$  kJ,  $L_{1-2} = 782,9$  kJ.
33. 2 kg pary wodnej o ciśnieniu 5 bar i temperaturze 320°C rozprężyło się *izotermicznie* do ciśnienia 1,3 bar. Wykorzystując wykres  $i$ - $s$  wyznaczyć: energię wewnętrzną (w kJ) pary na początku przemiany, objętość (w  $\text{m}^3$ ) pary na końcu przemiany oraz pracę bezwzględną przemiany. Na szkicu wykresu  $i$ - $s$  przedstawić sposób odczytu parametrów wykorzystanych w rozwiązaniu. Odp.:  $U_1 = 5670$  kJ,  $V_2 = 4,2$   $\text{m}^3$ ,  $L_{1-2} = 737,7$  kJ.
34. Ile ciepła należy doprowadzić *izobarycznie* do 6 kg pary wodnej mokrej o ciśnieniu 4,5 bar i stopniu suchości 0,85, aby zmienić ją w parę nasyconą suchą? Jaką pracę bezwzględną wykona para? Przemianę oraz sposób odczytu wykorzystanych podczas rozwiązywania zadania parametrów przedstawić na wykresie  $i$ - $s$ . Odp.:  $Q_{1-2} = 1908$  kJ,  $L_{1-2} = 167,4$  kJ.
35. 2,7 kg pary wodnej o ciśnieniu 40 bar i temperaturze 420°C ekspandowało *izentropowo* do ciśnienia 1,6 bara. Jaką pracę bezwzględną wykonała para? Ile razy wzrosła objętość pary? Odp.: 1523 kJ, 13,5 raza.