

## Zadania z termodynamiki cz. 2

[1] Obliczyć moc wymaganą dla samochodu o masie 2000 kg, aby przejechał 100. metrowy odcinek drogi nachylonej do poziomu pod kątem  $30^\circ$  w czasie 10 sek. Rozważyć 3 przypadki:

a) samochód porusza się ze stałą prędkością, b) początkowa prędkość samochodu jest równa zeru, a końcowa 30 m/s, c) początkowa prędkość samochodu jest równa 35 m/s, a końcowa 5 m/s.

W obliczeniach pominąć tarcie i opór powietrza.

[2] Kulka stalowa o temperaturze  $15^\circ\text{C}$  i średnicy 1 cm spadła z wysokości 30 m na twarde podłoże. Jaka temperaturę maksymalną, w  $^\circ\text{C}$ , mogła osiągnąć kulka bezpośrednio po upadku. Wykonać przeliczenie jednostek. Niezbędne brakujące dane zaczerpnąć z tablic lub założyć.

[3] Kulka stalowa spadła swobodnie z wysokości 20 m na warstwę styropianu i zatrzymała się. O ile kelwinów wzrosła temperatura kulki, jeżeli 10% ciepła wydzielonego podczas zderzenia pochłonął styropian. Ciepło właściwe kulki wynosi  $0,444 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ . Zadanie rozwiązać wychodząc z równania pierwszej zasady termodynamiki. Napisać co przyjęto za układ termodynamiczny. Przypisać odpowiednie wyrażenia wszystkim składnikom równania bilansu.

[4] Metalowa kulka poruszająca się poziomo z prędkością  $w_1=250 \text{ m/s}$  przebija deskę i leci dalej z prędkością  $w_2=100 \text{ m/s}$ . O ile przyrosła temperatura kulki, jeżeli 10% jej energii kinetycznej pochłonęła deska. Ciepło właściwe metalu wynosi  $c=380 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ . Zadanie rozwiązać wychodząc z równania pierwszej zasady termodynamiki. Napisać co przyjęto za układ termodynamiczny. Przypisać odpowiednie wyrażenia wszystkim składnikom równania bilansu.

[5] W aluminiowym rondlu o masie 500 g znajduje się woda o masie 1,5 kg. Temperatura rondla i wody wynosi  $18^\circ\text{C}$ . Ile litrów wrzątku o temperaturze  $100^\circ\text{C}$  należy dolać, aby temperatura wody (i rondla) wzrosła do  $40^\circ\text{C}$ ?

[6] Temperatura parzenia herbaty wynosi  $95^\circ\text{C}$ . Czy po zalaniu wrzątkiem listków herbaty wsypanych do porcelanowego kubka o pojemności 0,25 litra i wadze 1,2 N temperatura parzenia będzie odpowiednia? Brakujące niezbędne dane określić na podstawie tablic fizycznych lub założyć.

### **WSKAZÓWKI**

W celu rozwiązania zadania należy założyć temperaturę początkową kubka i z tablic fizycznych odczytać ciepło właściwe porcelany.

Za układ termodynamiczny przyjąć kubek.

Z równania bilansu energii obliczyć wyrównaną temperaturę kubka i wody.

[7] Sześciian wykonany z cyny ma krawędź równą 15 cm. Ile ciepła w kJ należy doprowadzić do sześcianu o temperaturze 299 K, aby rozpoczęło się jego topnienie? Jaka temperatura w  $^\circ\text{C}$  będzie miał sześciian bezpośrednio po stopieniu? Brakujące niezbędne dane określić na podstawie tablic fizycznych lub założyć.

[8] Obliczyć ile kosztuje przygotowanie 1 litra wody w czajniku elektrycznym. Przyjąć, że 1 kWh energii elektrycznej kosztuje 55 gr, a sprawność grzania  $Q/E_{\text{el}} = 0,98$ , gdzie Q jest ilością ciepła pochłoniętego przez wodę,  $E_{\text{el}}$  jest zużyciem energii elektrycznej. Brakujące niezbędne dane zaczerpnąć z odpowiednich tablic lub założyć.

### **WSKAZÓWKI**

Aby rozwiązać zadanie należy założyć temperaturę początkową wody,  $t_p$ , i ciśnienie atmosferyczne,  $p_{ot}$ , (może to być tzw. normalne ciśnienie atmosferyczne równe **101325 Pa**).

Z tablic należy odczytać:

- temperaturę wrzenia wody,  $t_s$ , dla założonego  $p_{ot}$ ,
- gęstość wody,  $\rho_w$ , dla założonych  $t_p$  i  $p_{ot}$  (gęstość cieczy praktycznie nie zależy od jej ciśnienia),
- ciepło właściwe wody przy stałym ciśnieniu,  $c_{pw}$ , dla średniej temperatury wody  $(t_p + t_s)/2$

Moc grzałki nie jest potrzebna do rozwiązania zadania.

### ROZWIĄZANIE

Ilość substancji wody

$$m = \rho_w V$$

Ciepło pochłonięte przez wodę

$$Q = mc_p(t_s - t_p)$$

Zużycie energii elektrycznej

$$E_{el} = \frac{Q}{Q / E_{el}}$$

Przeliczenie  $J$  na  $kWh$  (z tablic)

$$1J \cong 0,2778 \cdot 10^{-6} kWh$$

[9] Zetknięto ze sobą na 4 minuty 3 sześciany o boku 10 cm wykonane z miedzi, aluminium i ołowiu. Początkowe temperatury sześcianów wynosiły odpowiednio 10°C, 25°C oraz 80°C. Po rozłączeniu sześcianów stwierdzono, że sześcian miedziany miał temperaturę 18°C a sześcian ołowiany 63°C. Jaka temperaturę miał trzeci sześcian, jeżeli średni strumień ciepła tracony na rzecz otoczenia wynosił 40 W?

Narysować szkic układu z zaznaczoną osłoną bilansową oraz napisać co przyjęto za układ. Przypisać odpowiednie wyrażenia składnikom ogólnego równania bilansu oraz dokonać sprawdzenia jednostek.

[10] Zetknięto ze sobą 2,4 kg stali o temperaturze 78°C z 3,8 kg miedzi o temperaturze 27°C. Po 6 minutach temperatura stali zmalała do 60°C. O ile kelwinów wzrosła w tym czasie temperatura miedzi, jeżeli podczas wymiany ciepła strumień 9 W ciepła przepływał do otoczenia. Ciepło właściwe stali wynosi 0,45 kJ/(kg·K), ciepło właściwe miedzi jest równe 0,385 kJ/(kg·K). Zadanie rozwiązać wychodząc z pierwszej zasady termodynamiki. Napisać co przyjęto za układ termodynamiczny. Wykonać szkic układu. Napisać jak są obliczane poszczególne składniki równania bilansu energii. Wykonać przeliczenie jednostek.

[11] Do 2 kg wody o temperaturze 20°C wrzucono kolejno kawałek srebra i kawałek niklu mających temperaturę 40°C. Po wrzuceniu srebra temperatura wody wzrosła o 2 K, po wrzuceniu niklu temperatura wody wzrosła o kolejne 2 K. Wyznaczyć ilości substancji metali w kg. Zadanie rozwiązać wychodząc z równania pierwszej zasady termodynamiki. Napisać co przyjęto za układ termodynamiczny. Przypisać odpowiednie wyrażenia wszystkim składnikom równania bilansu.

[12] Oblicz minimalną liczbę kulek ołowianych o średnicy 15 mm i temperaturze 85°C, które po wrzuceniu do 1 litra wody o temperaturze 20°C spowodują wzrost temperatury wody do 40°C. Zadanie rozwiąż wychodząc z równania pierwszej zasady termodynamiki. Niezbędne dodatkowe dane odczytaj z odpowiednich tablic.

### ROZWIĄZANIE

Można przyjąć, że układem termodynamicznym jest woda. Stąd

$$E_d = U_o = m_o c_o t_o$$

$$E_{up} = U_{wp} = m_w c_w t_w$$

$$E_{uk} = U_{wk} + U_{ok} = m_w c_w t_k + m_o c_o t_k$$

$$E_w = 0$$

Indeks  $o$  dotyczy kulek ołowianych, indeks  $w$  wody, indeks  $p$  stanu początkowego układu, indeks  $k$  stanu końcowego układu. Ilość substancji zawartej we wszystkich kulkach,  $m_o$ , można było obliczyć z równania bilansu energii

$$m_o c_o t_o = m_w c_w t_k + m_o c_o t_k - m_w c_w t_w + 0$$

Liczba kulek

$$n = \frac{m_o}{m_{o1}}$$

gdzie  $m_{o1}$  jest ilością substancji w jednej kulce.

**[13]** Ile kg cieczy o ciepłe właściwym  $3,86 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  i temperaturze  $2^\circ\text{C}$  zawierało naczynie, jeżeli po wrzuceniu do tej cieczy  $0,8 \text{ kg}$  metalu o ciepłe właściwym  $423 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  i temperaturze  $300 \text{ K}$  ustaliła się wyrównana temperatura  $5^\circ\text{C}$ . Podczas wyrównywania się temperatur, z otoczenia do cieczy przepłynęły  $4 \text{ kJ}$  ciepła. Napisać co przyjęto za układ podczas obliczeń oraz określić energie układu: doprowadzoną, wyprowadzoną, początkową i końcową. Ponadto obliczyć ile ciepła pochłonęła ciecz oraz wykonać przeliczenie jednostek.

**[14]** Ile kg helu He (4) dostarczono rurociągiem do zbiornika o objętości  $2 \text{ m}^3$ , jeżeli przed napełnieniem parametry w zbiorniku były równe  $5 \text{ bar}$ ,  $30^\circ\text{C}$ , a po napełnieniu  $6 \text{ bar}$ ,  $50^\circ\text{C}$ . Jaką temperaturę miał dostarczony hel?

#### **WSKAZÓWKA**

Energia czynnika dostarczanego do układu rurociągiem jest równa jego entalpii. W przypadku gazu doskonałego

$$I_r = m_r \cdot c_p \cdot T_r$$

gdzie  $c_p$  jest ciepłem właściwym gazu przy stałym ciśnieniu.

$$c_p = c_v + R$$

**[15]** Do zbiornika o objętości  $3,2 \text{ m}^3$  zawierającego metan  $\text{CH}_4$  (16) o ciśnieniu  $0,2 \text{ MPa}$  i temperaturze  $25^\circ\text{C}$  w czasie  $42 \text{ sekund}$  włączono  $5 \text{ um}^3$  azotu o temperaturze  $41^\circ\text{C}$ . Podczas włączania gaz w zbiorniku był podgrzewany grzałką o mocy  $0,8 \text{ kW}$ , a strumień strat ciepła do otoczenia był równy  $14 \text{ W}$ . Obliczyć dla stanu po doprowadzeniu azotu: (a) zastępczą masę molową roztworu; (b) ciśnienie roztworu w zbiorniku; (c) ciśnienie składnikowe azotu; (d) przyrost energii wewnętrznej metanu.

**[16]** Ile ciepła należy odprowadzić ze zbiornika o pojemności  $1,5 \text{ m}^3$  zawierającego  $20 \text{ kg}$  metanu  $\text{CH}_4$  o ciśnieniu  $2 \text{ MPa}$ , aby po doprowadzeniu do niego  $10 \text{ kg}$  metanu o temperaturze  $300 \text{ K}$  temperatura w zbiorniku nie zmieniła się. Podczas rozwiązywania zadania wykorzystać równanie pierwszej zasady termodynamiki.

**[17]** W zbiorniku znajduje się  $120 \text{ um}^3$  tlenu  $\text{O}_2$  o temperaturze  $45^\circ\text{C}$  pod ciśnieniem  $10 \text{ bar}$ . Ze zbiornika wydostają się średnio  $3 \text{ kg}/\text{min}$  tlenu o średniej temperaturze  $37^\circ\text{C}$ . Średni strumień strat ciepła na rzecz otoczenia jest równy  $720 \text{ W}$ . Obliczyć ciśnienie tlenu po  $6 \text{ min}$ .

#### **WSKAZÓWKA**

W rozważanym przypadku energia układu jest równa energii wewnętrznej gazu. Natomiast energia gazu wpływającego ze zbiornika jest równa jego entalpii.

[18] W zbiorniku o pojemności  $15,3 \text{ m}^3$  znajduje się hel He (4) o ciśnieniu  $300 \text{ kPa}$  i temperaturze  $20^\circ\text{C}$ . Na ile minut powinna być włączona grzałka o mocy  $2 \text{ kW}$  umieszczona w zbiorniku, aby ciśnienie w zbiorniku wzrosło o  $1,5 \text{ bar}$ ? Ciepło właściwe helu dla tego przypadku ogrzewania wynosi  $3,118 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ .

[19] Podczas przemiany  $1,7 \text{ kg}$  azotu  $\text{N}_2$  jego temperatura zmieniała się zgodnie z równaniem

$$T[\text{K}] = 300\text{K} + 0,2 \frac{\text{K}}{\text{m}^3} V[\text{m}^3]$$

Jaką pracę bezwzględną wykonał gaz, jeżeli jego objętość wzrosła od  $0,1 \text{ m}^3$  do  $0,6 \text{ m}^3$ ?

### ROZWIĄZANIE

Rozważana przemiana nie była izobarą. Z termicznego równania stanu jest

$$p(V) = \frac{mRT}{V} \quad (19.1)$$

Za  $T$  podstawiamy do równania (19.1)  $300 + 0,2V$  i otrzymaną funkcję całkujemy

$$L_{1-2} = mR \int_{V_1}^{V_2} \left( \frac{300}{V} + 0,2 \right) dV$$

[20] W układzie zamkniętym znajduje się  $0,7 \text{ kg}$  metanu  $\text{CH}_4$  (16) o objętości  $0,15 \text{ m}^3$ . Po ekspansji gazu temperatura w układzie była równa  $343,65 \text{ K}$ . Obliczyć pracę bezwzględną przemiany, jeżeli ciśnienie w układzie zmieniało się zgodnie z równaniem

$$p(V) = (0,9 - 1,3 \cdot V[\text{m}^3]) \cdot 10^6 \quad [\text{Pa}]$$

### ROZWIĄZANIE

Przemiana gazu nie jest przemianą politropową, a więc nie jest ona także przemianą izentropową. Równanie danej przemiany ma postać

$$p = a + b \cdot V$$

Natomiast równanie przemiany politropowej można przedstawić w formie

$$p = \frac{d}{V^z}$$

gdzie  $a$ ,  $b$  oraz  $d$  są stałymi. Pracę bezwzględną przemiany można wyznaczyć z ogólnej zależności

$$L_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} p(V) dV$$

Objętość  $V_2$  można obliczyć z termicznego równania stanu

$$p(V_2) \cdot V_2 = m \cdot R \cdot T_2$$

[21] Zrealizowano przemianę gazu, podczas której wyrażenie  $p \cdot V^K$  nie zmieniało się, gdzie  $K$  było stałą.

Stan początkowy i końcowy gazu wynosiły odpowiednio  $V_1 = 0,2 \text{ m}^3$ ,  $p_1 = 330 \text{ kPa}$  oraz

$V_2 = 0,5 \text{ m}^3$ ,  $p_2 = 109,9 \text{ kPa}$ . Obliczyć pracę bezwzględną przemiany. Praca była doprowadzona do gazu, czy z niego wyprowadzona?

## ROZWIĄZANIE

Z równania  $p_1V_1^K = p_2V_2^K$  obliczyć  $K$ .

Wyznaczyć funkcję  $p(V) = \frac{p_1V_1^K}{V^K}$ .

Obliczyć pracę  $L_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} p(V)dV$ .

[22] 0,15 kmol dwuatomowego gazu doskonałego o ciśnieniu 8 bar i objętości 0,5 m<sup>3</sup> zrealizowało przemianę termodynamiczną, podczas której energia wewnętrzna gazu wzrosła o 250 kJ. Ile była równa praca bezwzględna przemiany, jeżeli ciepło właściwe przemiany było stałe i wyniosło 26,19 kJ/(kmol·K)?

## ROZWIĄZANIE

Z termicznego równania stanu

$$T_1 = \frac{p_1 \cdot V_1}{n \cdot (MR)} = \frac{8 \cdot 10^5 \cdot 0,5}{0,15 \cdot 8314} = 320,7 \text{ [K]}$$

Z prawa ekwipartycji energii

$$(Mc_v) = \frac{5}{2} \cdot (MR) = 2,5 \cdot 8314 = 20785 \left[ \frac{\text{J}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \right]$$

Z wyrażenia na przyrost energii wewnętrznej gazu doskonałego

$$T_2 = T_1 + \frac{\Delta U_{1-2}}{n \cdot (Mc_v)} = 320,7 + \frac{250 \cdot 10^3}{0,15 \cdot 20785} = 400,9 \text{ [K]}$$

Ze wzoru na ilość ciepła pochłoniętego

$$Q_{1-2} = n \cdot (Mc) \cdot (T_2 - T_1) = 0,15 \cdot 26,19 \cdot (400,9 - 320,7) = 315,0 \cdot 10^3 \text{ [J]}$$

Z pierwszej zasady termodynamiki

$$L_{1-2} = Q_{1-2} - \Delta U_{1-2} = 315,0 - 250 = 65,0 \text{ [kJ]}$$

[23] Podczas ekspansji 2 kg helu He (4) stosunek ciśnienia gazu do jego objętości nie zmieniał się. Na końcu przemiany temperatura gazu była wyższa o 10 K niż na początku. (1) Jaka pracę bezwzględną wykonał gaz? (2) Ile ciepła pochłoniął gaz?

## ROZWIĄZANIE

Z treści zadania wynika, że

$$p = a \cdot V \quad (23.1)$$

gdzie  $a$  jest stałą. Stąd praca bezwzględna

$$L_{1-2} = \frac{a}{2} (V_2^2 - V_1^2) \quad (23.2)$$

Z termicznego równania stanu

$$mR(T_2 - T_1) = p_2V_2 - p_1V_1 \quad (23.3)$$

Po uwzględnieniu (23.1) jest

$$mR(T_2 - T_1) = a(V_2^2 - V_1^2) \quad (23.4)$$

Podstawiamy (23.4) do (23.2)

$$L_{1-2} = \frac{1}{2} mR(T_2 - T_1) \quad (23.5)$$

$$\Delta U_{1-2} = mc_v(T_2 - T_1) \quad (23.6)$$

$$Q_{1-2} = \Delta U_{1-2} + L_{1-2} \quad (23.7)$$

[24] Na wykresie o współrzędnych  $p$ - $V$  przemiana termodynamiczna 0,2 kg metanu  $\text{CH}_4$  jest odcinkiem prostej o początku (0,1 m<sup>3</sup>, 6 bar) i końcu (0,35 m<sup>3</sup>, 1,1 bar). Oblicz ciepło wymienione z otoczeniem podczas tej przemiany. Ciepło to doprowadzono do gazu, czy wyprowadzono z gazu?

[25] Hel He (4) przechowywany w zbiorniku o pojemności 25 m<sup>3</sup> ogrzewany jest grzejnikiem o mocy 5 kW. Przed włączeniem grzejnika ciśnienie gazu wynosiło 5 bar, a jego temperatura była równa temperaturze otoczenia  $t_{ot} = 20$  st. C. Podczas ogrzewania straty ciepła helu na rzecz otoczenia wzrastały wraz ze wzrostem jego temperatury zgodnie z równaniem  $Q_{ot} [\text{W}] = 220 \cdot (t - t_{ot})$ . Po pewnym czasie temperatura ogrzewanego helu przestała się zmieniać. Wykorzystując równanie pierwszej zasady termodynamiki obliczyć najwyższą (końcową) temperaturę helu. Ile ciepła pochłonął hel? Jakie było jego ciśnienie po podgrzaniu? Ciepło właściwe helu dla tego przypadku ogrzewania przyjąć równe 3118 J/(kg·K).

### ROZWIĄZANIE

Temperatura helu przestała się zmieniać, gdy układ osiągnął stan ustalony. Wówczas

$$\dot{E}_d = \dot{E}_w \quad \text{czyli} \quad \dot{Q}_g = \dot{Q}_{ot} \quad \text{i po podstawieniu wartości} \quad 5000 = 220 \cdot (t_k - 20).$$

Ciepło pochłonięte przez hel  $Q_{He} = m \cdot c_v \cdot (t_k - t_{ot})$ .

[26] Trójatomowy gaz doskonały o parametrach 5 bar, 500 K, 0,2 m<sup>3</sup> podległ przemianie o równaniu  $p \cdot V^{1,5} = \text{idem}$

ekspandując do objętości 0,3125 m<sup>3</sup>. Molowe ciepło właściwe przemiany było równe 8314 J/(kmol·K). Obliczyć ciepło i pracę bezwzględna przemiany oraz przyrost energii wewnętrznej gazu podczas przemiany.

$$Q_{1-2} = n(Mc)(T_2 - T_1), \quad \text{gdzie} \quad (Mc) = 8314 \text{ J/(kmol} \cdot \text{K)}$$

Praca przemiany

$$L_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} p(V) dV, \quad \text{gdzie} \quad p(V) = \frac{p_1 V_1^{1,5}}{V^{1,5}}$$

Przyrost energii wewnętrznej można obliczyć z równania I zasady termodynamiki

$$\Delta U_{1-2} = Q_{1-2} - L_{1-2}$$

[27] Ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu gazu zależy liniowo od temperatury. Ile ciepła należy dostarczyć do 1 kg gazu, aby go podgrzać od 10°C do 40°C, jeżeli na podgrzanie o pierwsze 10 K zużyto 9158 J ciepła, a na podgrzanie o drugie 10 K zużyto 9177 J ciepła.

[28] Rzeczywiste ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu tlenu  $\text{O}_2$  opisuje równanie

$$c_p(t) = 0,913 + 0,000187 \cdot t \quad \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

Jaką energię wewnętrzną ma 5 kg tlenu o temperaturze 400 K, jeżeli tlen o temperaturze 0 K ma energię wewnętrzną równą 0.

### ROZWIĄZANIE

$$U = m \cdot c_v \Big|_0^T \cdot T$$

$$c_p(T) = 0,913 + 0,000187 \cdot (T - 273,15) \quad \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$c_v(T) = c_p(T) - R$$

$$c_v \Big|_0^T = \frac{\int_0^T c_v(T) dT}{T}$$

[29] Rzeczywiste ciepło właściwe wodoru  $\text{H}_2$  przy stałym ciśnieniu zależy liniowo od temperatury. Dla temperatury  $10^\circ\text{C}$  ma ono wartość  $1.2559 \text{ kJ}/(\text{um}^3 \cdot \text{K})$ , natomiast dla temperatury  $50^\circ\text{C}$  jego wartość wynosi  $1.2608 \text{ kJ}/(\text{um}^3 \cdot \text{K})$ . Do 3,1 kg wodoru o temperaturze  $23^\circ\text{C}$  doprowadzono izobarycznie  $2307,6 \text{ kJ}$  ciepła. Wyznaczyć temperaturę podgrzanego wodoru.

### ROZWIĄZANIE

Dla danych dwóch punktów należało wyznaczyć współczynniki  $p$  oraz  $q$  funkcji liniowej  $C_{up}(t) = p + qt$ .

Następnie z równania kwadratowego  $2307,6 = V_u \int_{23}^{t_2} C_{up}(t) dt$  obliczyć  $t_2$ .

[30] Rzeczywiste ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu tlenu  $\text{O}_2$  (32) opisuje równanie:

$$c_p(t) = 913 + 0,187 \cdot t \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] \quad (30.1)$$

Do  $1 \text{ um}^3$  tlenu o temperaturze 310 K doprowadzono izobarycznie  $10 \text{ kJ}$  ciepła. Jaką temperaturę, w K, osiągnął tlen?

### WSKAZÓWKI

Litera  $t$  we wzorze (30.1) oznacza temperaturę w stopniach Celsjusza. Funkcja (30.1) dla temperatury w kelwinach miałaby postać

$$c_p(T) = 913 + 0,187 \cdot (T - 273,15) \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] \quad (30.2)$$

Temperaturę  $t_2$  [ $^\circ\text{C}$ ] można wyznaczyć z równania

$$Q_{1-2} = m \int_{t_1}^{t_2} c(t) dt \quad (30.3)$$

[31] Do 0,8 kg wody o temperaturze  $14^\circ\text{C}$  wrzucono kawałek metalu o temperaturze  $48^\circ\text{C}$ . Temperatury wody i metalu wyrównały się na poziomie  $21,6^\circ\text{C}$ . Obliczyć masę metalu, jeżeli jego rzeczywiste ciepło właściwe w  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  opisuje równanie  $c_m(T) = 451 + 0,0113 \cdot T$ , ciepło właściwe wody jest równe  $4,19 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ , a straty ciepła na rzecz otoczenia wyniosły  $350 \text{ J}$ . Napisać co przyjęto za układ, przypisać odpowiednie wyrażenia składnikom równania bilansu oraz dokonać sprawdzenia jednostek.

## WSKAZÓWKI

Energię wewnętrzną metalu przy temperaturze  $t_m$  oblicza się ze wzoru

$$U_m = m_m \int_0^{t_m} c_m(t) dt$$

gdzie

$$c_m(t) = 451 + 0,0113(t + 273,15)$$

a także ze wzoru

$$U_m = m_m c_m \Big|_0^{t_m} t_m$$

Ponieważ funkcja  $c_m(t)$  jest liniowa, to  $c_m \Big|_0^{t_m}$  można obliczyć jako

$$c_m \Big|_0^{t_m} = c_m\left(\frac{t_m}{2}\right) \quad \text{lub} \quad c_m \Big|_0^{t_m} = \frac{c_m(0) + c_m(t_m)}{2}$$

**[32]** Rzeczywiste ciepło właściwe pewnej substancji zależy liniowo od temperatury. W celu podgrzania 1 kg tej substancji od temperatury 22°C do temperatury 25°C należało doprowadzić 2,1 kJ ciepła. Natomiast podgrzanie tej samej ilości substancji od temperatury 25°C do temperatury 30°C wymagało doprowadzenia 3,6 kJ ciepła. Ile ciepła należy doprowadzić do 1 kg tej substancji, aby ją podgrzać od 24°C do 28°C?

**[33]** Rzeczywiste ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu pewnej substancji zmienia się liniowo wraz z temperaturą. Wynosi ono 451 J/(kg·K), dla temperatury 20°C oraz 451,8 J/(kg·K) dla temperatury 50°C. Ile ciepła należy dostarczyć izobarycznie do 5 kg tej substancji, aby ją podgrzać od temperatury 26,6°C do temperatury 67,4°C.

## ROZWIĄZANIE

Na podstawie danych rzeczywistych ciepł właściwych dla temperatur  $t_A = 20^\circ\text{C}$  oraz  $t_B = 50^\circ\text{C}$  można było wyznaczyć równanie prostej  $c(t)$

$$c(t) = c_A + \frac{c_B - c_A}{t_B - t_A} (t - t_A) \quad (\text{równanie prostej przechodzącej przez 2 dane punkty})$$

Następnie z tego równania można było wyznaczyć średnie ciepło właściwe w zakresie temperatur od  $t_1 = 26,6^\circ\text{C}$  do  $t_2 = 67,4^\circ\text{C}$  jako rzeczywiste ciepło właściwe dla temperatury średniej.

$$c \Big|_{t_1}^{t_2} = c\left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) \quad (\text{wzór ważny tylko dla liniowej zależności } c(t))$$

i dalej obliczyć

$$Q = mc \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1)$$

**[34]** Różniczka pewnej funkcji stanu ma postać

$$dF = 2v^2 dp + 4pv dv$$

Oblicz przyrost funkcji  $F$  po zmianie stanu od  $p_1=1$  bar,  $v_1=2$  m<sup>3</sup> do  $p_2=2$  bar,  $v_2=4$  m<sup>3</sup>.

## WSKAZÓWKI

Różniczka funkcji  $F$  jest różniczką zupełną. Wartość całki nie zależy od drogi całkowania. Drogę całkowania można przyjąć np. taką: odcinek AB plus odcinek BC, gdzie punkty A, B, C mają współrzędne A(2,1), B(4,1), C(4,2).



[35] Zbiorniki A oraz B zawierają azot  $N_2$  (28). W zbiorniku A jest 5 kg gazu o ciśnieniu 2 bar i temperaturze  $30^\circ C$ . W zbiorniku B jest 8 kg gazu o ciśnieniu 6 bar i temperaturze  $60^\circ C$ . Zbiorniki połączono, parametry w zbiornikach uległy wyrównaniu. Oblicz ciśnienie, temperaturę i objętość końcową gazu, jeżeli podczas przemiany 800 J ciepła przepłynęło do otoczenia.

[36] Przepływomierz gazu wskazuje strumień objętości przepływającego gazu w  $m^3/h$ . Opłata za gaz jest proporcjonalna do objętości zużytego gazu. O ile procent różni się koszt zużycia tej samej ilości substancji gazu latem, w porównaniu do okresu zimowego? Przyjąć średnie parametry gazu przepływającego przepływomierzem latem 1 bar,  $25^\circ C$  i zimą 1,05 bar,  $8^\circ C$ .

### ROZWIĄZANIE

Z tematu zadania wynika, że

$$m_L [kg] = m_Z [kg] \quad (36.1)$$

Stąd

$$\frac{p_L V_L}{T_L} = \frac{p_Z V_Z}{T_Z} \quad (36.2)$$

Koszt

$$K = V C e \quad (36.3)$$

gdzie  $C e$  jest ceną  $1 m^3$  gazu.

$$\Delta K \% = \frac{V_L - V_Z}{V_Z} \times 100\% = \left( \frac{V_L}{V_Z} - 1 \right) \times 100\% \quad (36.4)$$

Z (36.2)

$$\frac{V_L}{V_Z} = \frac{p_Z T_L}{p_L T_Z} \quad (36.5)$$

Po wykonaniu obliczeń otrzymujemy

$$\Delta K \% = 11,35\%$$

[37] Ze zbiornika zawierającego metan  $CH_4$  o ciśnieniu 6 MPa pobrano 150 kg gazu powodując spadek ciśnienia w zbiorniku o 1,38 MPa. Ile kg i kmol metanu zostało w zbiorniku? Założyć, że temperatura gazu w zbiorniku była stała.

### ROZWIĄZANIE

Termiczne równanie stanu dla stanu początkowego

$$p_1 V = m_1 R T \quad (37.1)$$

Termiczne równanie stanu dla stanu końcowego

$$p_2 V = m_2 R T \quad (37.2)$$

Równanie (37.2) dzielimy stronami przez równanie (37.1)

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{m_2}{m_1} \quad (37.3)$$

Przyrost ilości substancji w czasie przemiany 1-2

$$\Delta m_{1-2} = m_2 - m_1 \quad (37.4)$$

Przyrost ciśnienia w czasie przemiany 1-2

$$\Delta p_{1-2} = p_2 - p_1 \quad (37.5)$$

Z równania (37.4) obliczamy  $m_1$

$$m_1 = m_2 - \Delta m_{1-2} \quad (37.6)$$

Z równania (37.5) obliczamy  $p_2$

$$p_2 = p_1 + \Delta p_1 \quad (37.7)$$

Podstawiamy prawe strony równań (37.6) i (37.7) do równania (37.3)

$$\frac{p_1 + \Delta p_{1-2}}{p_1} = \frac{m_2}{m_2 - \Delta m_{1-2}} \quad (37.8)$$

Z równania (37.8) wyznaczamy  $m_2$

$$m_2 = \frac{p_1 + \Delta p_{1-2}}{\Delta p_{1-2}} \Delta m_{1-2} = \frac{6 - 1,38}{-1,38} (-150) = 502,17 [kg]$$

$$n_2 = \frac{m_2}{M} = \frac{502,17}{16} = 31,39 [kg]$$

UWAGA: Przyrosty ilości substancji i ciśnienia są ujemne, gdyż wartości na końcu przemiany są mniejsze niż na jej początku.

[38] W zbiorniku o średnicy wewnętrznej 1500 mm i wysokości 800 mm umieszczony jest sześciian miedziany o boku 100 mm. Zbiornik wypełniony jest azotem  $N_2$  o temperaturze  $30^\circ C$  i ciśnieniu 2,4 bar. Początkowa temperatura sześcianu była równa początkowej temperaturze azotu. Do zbiornika doprowadzono rurociągiem dodatkowe 0,1 kmol azotu o temperaturze  $42^\circ C$ . Po 3 minutach temperatury gazu i sześcianu wyrównały się. Średni strumień ciepła wypływający ze zbiornika podczas wyrównywania się temperatur w zbiorniku był równy 75 W. Oblicz końcową temperaturę w zbiorniku.

[39] Do chłodnicy dopływa rurociągiem 0,4 kg/s azotu  $N_2$  (28) o temperaturze  $85^\circ C$  pod ciśnieniem 6,5 bar. W chłodnicy azot oddaje 20 kW ciepła. Obliczyć temperaturę oraz gęstość azotu na wylocie z chłodnicy. Założyć, że chłodzenie azotu odbywa się przy stałym ciśnieniu. Zadanie rozwiązać wychodząc z równania pierwszej zasady termodynamiki. Napisać co przyjęto za układ termodynamiczny. Przypisać odpowiednie wyrażenia wszystkim składnikom równania bilansu.

### WSKAZÓWKI

Układem jest chłodnica. Układ jest w stanie ustalonym. Stąd

$$\dot{E}_d = \dot{E}_w$$

$$\Delta \dot{E}_u = 0$$

Strumień energii doprowadzanej do układu to strumień entalpii czynnika dopływającego do chłodnicy

$$\dot{E}_d = \dot{I}_d = \dot{m} \cdot c_p \cdot T_1$$

Strumień energii wyprowadzanej to strumień ciepła oddawanego przez czynnik w chłodnicy oraz strumień entalpii czynnika wypływającego z chłodnicy

$$\dot{E}_w = \dot{Q}_{ch} + \dot{I}_w = \dot{Q}_{ch} + \dot{m} \cdot c_p \cdot T_2$$

[40] Do nagrzewnicy o mocy 16,5 kW rurociągiem o średnicy wewnętrznej 180 mm dopływa azot  $N_2$  o ciśnieniu 1,8 bar i temperaturze  $8^\circ C$  ze średnią prędkością 6 m/s. Obliczyć temperaturę azotu na wylocie z nagrzewnicy, jeżeli strumień strat ciepła na rzecz otoczenia wynosi 220 W. Zastosować pierwszą zasadę termodynamiki.

[41] Połączono dwa zbiorniki zawierające azot. W pierwszym zbiorniku o pojemności  $2\text{ m}^3$  gaz początkowo miał ciśnienie 4 bar, w drugim zbiorniku początkowe ciśnienie gazu wynosiło 1,2 bar. Wyrównane ciśnienie w zbiornikach miało wartość 1,9 bar. Obliczyć pojemność zbiornika drugiego przy założeniu, że temperatura gazu w zbiornikach wynosiła  $25^\circ C$  podczas całego procesu.

### WSKAZÓWKA

Przemiany w zbiornikach nie można potraktować jako zamkniętej równowagowej przemiany *izotermicznej* gazu doskonałego.

[42] Zbiornik o pojemności  $50\text{ m}^3$  zawiera metan  $CH_4$  o parametrach: 7 bar,  $20^\circ C$ . Do zbiornika przyłączony jest rurociąg zasilający o średnicy wewnętrznej 300 mm zaopatrzony w zawór odcinający. Po otwarciu zaworu do zbiornika zaczął wpływać hel o ciśnieniu 10 bar i gęstości  $6,5\text{ kg/m}^3$  z prędkością 9 m/s. Po jakim czasie ciśnienie w zbiorniku wzrośnie do 9 bar?

[43] Do zbiornika zawierającego 2,6 kg cieczy o temperaturze  $28^\circ C$  włożono 6,4 kg metalu o temperaturze  $78^\circ C$ . Podczas wyrównywania się temperatury cieczy i metalu do otoczenia o temperaturze  $21^\circ C$  przepłynęły 33 kJ ciepła. Ciepło właściwe cieczy wynosiło  $3,45\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ , ciepło właściwe metalu było równe  $456\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ . Obliczyć sumę przyrostów entropii dla opisanego procesu. Czy proces ten był odwracalny? Odpowiedź uzasadnić.

### ROZWIĄZANIE

Z równania bilansu energii należy obliczyć wyrównaną temperaturę metali.

$$T_k = 310,65\text{ K}$$

Przyrost entropii układu

$$\Delta S_u = m_c c_c \ln\left(\frac{T_k}{T_c}\right) + m_m c_m \ln\left(\frac{T_k}{T_m}\right) \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{K}}\right]$$

Przyrost entropii otoczenia

$$\Delta S_{ot} = \frac{Q_{ot}}{T_{ot}}$$

Suma przyrostów entropii układu i otoczenia

$$\Pi = \Delta S_u + \Delta S_{ot} = 0,0331 \frac{\text{kJ}}{\text{K}} \quad \text{- proces nieodwracalny}$$

[44] W układzie odosobnionym znajdują się dwa kawałki miedzi, każdy o masie 2 kg i ciepłe właściwym  $385\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ . Temperatura jednego z nich była równa  $40^\circ C$ , a drugiego  $80^\circ C$ . Metale zetknięto ze sobą, aż do wyrównania temperatury. Obliczyć sumę przyrostów entropii układu i otoczenia dla procesu. Czy proces był odwracalny? Odpowiedź uzasadnić.

### ROZWIĄZANIE

Układ był odosobniony, stąd  $E_d = E_w = 0$ . W tym przypadku nie można było założyć, że układem był jeden z metali. Należało obliczyć z pierwszej zasady termodynamiki wyrównaną temperaturę metali,  $T_k$ , i dalej

$$\Pi = \Delta S_u = m_A c_A \ln \frac{T_k}{T_A} + m_B c_B \ln \frac{T_k}{T_B} \quad (44.1)$$

We wzorze (44.1) występuje entropia całkowita w J/K, a nie entropia właściwa w J/(kg·K). Otrzymamy  $\Pi$  dodatnie, stąd przemiana była nieodwracalna.

[45] Zbiornik o pojemności 200 litrów, odizolowany od otoczenia, podzielony jest przegrodą na dwie równe części. W jednej części są 2 kg helu He (4) o ciśnieniu 2,4 bar, w drugiej części jest próżnia. O ile zmieniła się entropia gazu po usunięciu przegrody?

#### WSKAZÓWKA

Temperatura na końcu procesu jest równa temperaturze początkowej. Przyrost entropii podczas procesu można było obliczyć z zależności

$$\Delta S_{1-2} = mR \ln \frac{V_2}{V_1}$$

[46] Po awarii systemu ogrzewczego temperatura w pomieszczeniu mającym kształt prostopadłościanu o wymiarach 6 m x 3 m x 2,8 m spadła do 12°C. Do zastępczego ogrzewania pomieszczenia wykorzystano grzejnik elektryczny o mocy 2 kW. Po jakim czasie temperatura w pomieszczeniu wzrośnie do 22°C, jeżeli średnio 30% mocy ogrzewczej jest tracona na rzecz otoczenia. Zadanie rozwiązać wychodząc z równania pierwszej zasady termodynamiki. Napisać co przyjęto za układ, przypisać odpowiednie wyrażenia składnikom równania bilansu oraz dokonać sprawdzenia jednostek. Brakujące dane określić na podstawie literatury.

#### WSKAZÓWKI

Powietrze jako roztwór gazów dwuatomowych jest traktowane jako gaz dwuatomowy o zastępczej masie molowej równej 29 kg/kmol.

Średnią ilość podgrzewanego powietrza można obliczyć z termicznego równania stanu dla jego średniej temperatury wynoszącej 17°C.

Przemiana ogrzewania powietrza jest izobarą.

[47] Do 0,02 kmol tlenu O<sub>2</sub> (32) o ciśnieniu 2,4 bar i objętości 0,25 m<sup>3</sup> doprowadzono *izobarycznie* (przemiana 1-2) 30 kJ ciepła, a następnie wyprowadzono *izochorycznie* (przemiana 2-3) też 30 kJ ciepła. Obliczyć dla przemiany 1-2-3 pracę bezwzględną, przyrost energii wewnętrznej oraz przyrost temperatury. Otrzymaną wartość przyrostu temperatury skomentować. Przemiany 1-2 oraz 2-3 przedstawić na wykresach  $p$ - $V$  oraz  $T$ - $S$  opisując początek i koniec przemian, kierunek przemian, pola pracy bezwzględnej i ciepła przemian. Wykonać przeliczenie jednostek.

[48] W układzie zamkniętym znajduje się 17 um<sup>3</sup> neonu Ne ( $M=20,18$  kg/kmol) o temperaturze 145°C, pod ciśnieniem 1,8 MPa. Gaz poddany został przemianie izentropowej, podczas której jego energia wewnętrzna zmalała o 340 kJ. Obliczyć temperaturę, ciśnienie, objętość i energię wewnętrzną gazu na końcu przemiany oraz pracę bezwzględną przemiany. Przemianę przedstawić na wykresach  $p$ - $V$  oraz  $T$ - $S$  opisując początek i koniec przemiany, kierunek przemiany, pola pracy bezwzględnej i ciepła przemiany. Wykonać przeliczenie jednostek.

[49] 5 um<sup>3</sup> argonu Ar odbyło przemianę politropową od stanu 6 bar, 130°C do stanu 1,2 bar, 45°C. Oblicz pracę bezwzględną i ciepło tej przemiany. Przybliżony przebieg przemiany przedstaw na wykresach  $p$ - $V$  oraz  $T$ - $S$ .

#### WSKAZÓWKA

Przemiana nie jest izochorą. Wykładnik politropy można obliczyć z równania

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{z-1}{z}}$$

[50] Podczas przemiany izobarycznej 4. um<sup>3</sup> metanu CH<sub>4</sub> jego entropia wzrosła o 1200 J/K. Początkowe ciśnienie i temperatura gazu były odpowiednio równe 4 bar i 30°C. Obliczyć pracę bezwzględną i ciepło przemiany. Przemianę przedstawić na wykresach p-V oraz T-S opisując początek (1) i koniec (2) przemiany, kierunek przemiany, pola pracy bezwzględnej i ciepła przemiany. Wykonać przeliczenie jednostek.

### WSKAZÓWKA

Końcową temperaturę przemiany można obliczyć z zależności

$$\Delta S_{1-2} = mc_p \ln \frac{T_2}{T_1}$$

[51] Tlenek węgla CO o ciśnieniu 0,5 MPa, temperaturze 450 K i objętości 0,2 m<sup>3</sup> podległ przemianie politropowej, podczas której stosunek ciepła przemiany do pracy przemiany był równy 0,4. Oblicz pracę i ciepło przemiany oraz ciśnienie i temperaturę na końcu przemiany wiedząc, że objętość na końcu przemiany wyniosła 0,45 m<sup>3</sup>.

### ROZWIĄZANIE

Ciepło przemiany politropowej

$$Q_{1-2} = mc(T_2 - T_1) \quad (51.1)$$

Gdzie ciepło właściwe politropy

$$c = c_v \frac{z - \kappa}{z - 1} \quad (51.2)$$

Praca bezwzględna przemiany politropowej

$$L_{1-2} = \frac{mR}{z-1} (T_1 - T_2) \quad (51.3)$$

Z (10.1) i (10.2) oraz (10.3) otrzymujemy

$$\frac{Q_{1-2}}{L_{1-2}} = 2,5(\kappa - z) = 0,4 \quad (51.4)$$

Z (10.4) dostajemy  $z = 1,24$  i dalej

$$p_2 = p_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^z$$

itd.

[52] Podczas kompresji *izentropowej* do 0,125 kmol metanu CH<sub>4</sub> (16) doprowadzono 240 kJ pracy. Na początku przemiany metan zajmował objętość 1,5 m<sup>3</sup>, a jego ciśnienie wynosiło 3 bar. Obliczyć: temperaturę i ciśnienie metanu na końcu przemiany, ciepło przemiany oraz przyrost entalpii gazu. Przemianę przedstawić na wykresach p-V oraz T-S zaznaczając jej początek (1) i koniec (2) oraz pola pracy i ciepła.

[53] Podczas przemiany izobarycznej 1-2 energia wewnętrzna 2 kg etylenu C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> wzrosła o 120 kJ. Parametry początkowe gazu wynosiły 3 bar, 0,6 m<sup>3</sup>. Oblicz objętość końcową gazu oraz pracę bezwzględną przemiany. Praca została doprowadzona czy wyprowadzona? Odpowiedź na to pytanie uzasadnij. Przemianę naszkicuj na wykresach p-V oraz T-S.

[54] 0,4 kg tlenu O<sub>2</sub> (32) o ciśnieniu 6 bar i temperaturze 100°C rozprężyło się politropowo do ciśnienia 3 bar. Temperatura końcowa gazu wyniosła 44,84°C. Oblicz ciepło i pracę bezwzględną przemiany. Przybliżony przebieg przemiany naszkicuj na wykresach p-V oraz T-s.

### ROZWIĄZANIE

Wykładnik politropy,  $z$ , można było wyznaczyć z równania

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{z-1}{z}} \quad (54.1)$$

Ponieważ  $z \neq \kappa$ , politropa nie była izentropą. Pracę bezwzględną można było wyznaczyć z równania

$$L_{1-2} = \frac{m \cdot R}{z-1} (T_1 - T_2) \quad (54.2)$$

a ciepło przemiany z

$$Q_{1-2} = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1) \quad (54.3)$$

gdzie ciepło właściwe przemiany jest równe

$$c = c_v \frac{z - \kappa}{z - 1} \quad (54.4)$$

[55] Przybliżony przebieg politropy na wykresach można było wydedukować na podstawie przebiegu izoterm i izentropy.

[56] Roztwór helu He (4) i tlenu O<sub>2</sub> (32) przy ciśnieniu 1,2 bar i temperaturze 320 K ma gęstość 0,75 kg/m<sup>3</sup>. Wyznaczyć skład molowy roztworu.

[57] W zbiorniku znajduje się 1,8 kmol roztworu o składzie kilogramowym: hel He (4) 0,18; dwutlenek węgla CO<sub>2</sub>(44) 0,49; tlen O<sub>2</sub>(32) 0,33. Ile kg helu należy dodać do zbiornika, aby jego udział kilogramowy w roztworze wzrósł do 0,25?

[58] 1,5 kg roztworu helu He i metanu CH<sub>4</sub>, w którym udział molowy He wynosi 0,35, podgrzano przy stałym ciśnieniu 3 bary od temperatury 15°C do temperatury 47°C. Obliczyć: objętość roztworu na końcu przemiany, ciepło przemiany, pracę bezwzględną przemiany oraz przyrost energii wewnętrznej podczas przemiany.

[59] Udziały molowe helu He i azotu N<sub>2</sub> w roztworze helu, azotu i metanu CH<sub>4</sub> wynoszą odpowiednio 0,35 oraz 0,25. Roztwór o parametrach 7,8 bar, 310°C, 0,2 m<sup>3</sup> rozprężono izentropowo do ciśnienia 1,7 bar. Obliczyć objętość i temperaturę roztworu po ekspansji oraz pracę bezwzględną przemiany. Przemianę przedstawić na wykresach p-V oraz T-S opisując początek i koniec przemiany, kierunek przemiany, pola pracy bezwzględnej i ciepła przemiany. Wykonać przeliczenie jednostek.

[60] Zastępcza masa molowa roztworu helu He i azotu N<sub>2</sub> jest równa 7. Roztwór podgrzano *izobarycznie* od stanu 3 bar, 15°C, 4 m<sup>3</sup> do temperatury 65°C. Obliczyć pracę bezwzględną i ciepło przemiany oraz przyrost energii wewnętrznej roztworu. Przemianę narysować na wykresach p-V i T-S zaznaczając początek, koniec i kierunek przemiany oraz pracę bezwzględną i ciepło przemiany.

[61] Zbiornik gazu przedzielony jest przegrodą. W jednej części znajduje się 5 kg helu He (4) o ciśnieniu 0,5 MPa i temperaturze 55°C, w drugiej części jest 50 um<sup>3</sup> wodoru H<sub>2</sub> (2) o ciśnieniu 0,1 MPa i temperaturze 10°C. Przegrodę usunięto, gazy się wymieszały, a ich temperatury się wyrównały. Jakie ciśnienie wywierał hel na ścianki naczynia po wymieszaniu się gazów?

#### WSKAZÓWKA

Podczas rozwiązywania zadań dotyczących gazu doskonałego zalecane jest wyrażanie temperatury w kelwinach. Jeżeli założymy, że

$$u = c_v \cdot t$$

to

$$i = u + p \cdot v = c_v \cdot t + R \cdot T = c_p \cdot t + 273,15 \cdot R$$

czyli

$$i \neq c_p \cdot t$$

Dla kelwinów jest

$$u = c_v \cdot T$$

oraz

$$i = c_p \cdot T$$

**[62]** Roztwór gazowy złożony z tlenu  $O_2$  oraz helu  $He$  podległ przemianie izobarycznej, podczas której roztwór pochłonął 6,1 kJ ciepła wykonując 2,4 kJ pracy bezwzględnej. Początkowe parametry roztworu były następujące: 6 bar, 4°C, 0,02 m<sup>3</sup>. Obliczyć parametry roztworu na końcu przemiany.

**[63]** Obieg cieplny silnika składa się z dwóch izobar 12 bar i 4 bar oraz dwóch izoterm 650 K i 310 K. Obliczyć: ciepło wyprowadzone z obiegu, sprawność termiczną obiegu i maksymalną objętość czynnika w obiegu. Obieg narysować na wykresach p-V i T-S. Kolejno ponumerować punkty charakterystyczne obiegu (punkty przecięcia przemian). Czynnikiem roboczym jest 0,15 kg argonu.

**[64]** Obieg silnika składa się kolejno z izentropy kompresji 1-2, izobary i izochory. Parametry punktu 1 są następujące: 1,5 bar, 310 K. Maksymalna temperatura w obiegu jest równa 900 K. Czynnikiem roboczym jest 0,1 kg azotu  $N_2$  (28). Obliczyć: pracę kompresji obiegu, ciepło doprowadzone do obiegu i sprawność termiczną obiegu. Obieg przedstawić na wykresach p-V oraz T-S.

**[65]** Obieg cieplny silnika składa się kolejno z izochory rozprężania, izentropy i izotermy. Maksymalne ciśnienie i maksymalna temperatura obiegu są odpowiednio równe 12 bar i 700 K. Praca izotermy wynosi 50 kJ. Czynnikiem roboczym jest 0,05 kg helu  $He$  (4). Obliczyć sprawność termiczną obiegu. Obieg przedstawić na wykresach p-V oraz T-S.

**[66]** Obieg cieplny silnika składa się kolejno z izobary kompresji 1-2, izentropy i izotermy. Stosunek objętości  $V_1/V_2=3$ , a parametry końca izentropowej kompresji są równe 18 bar i 1400 K. Obliczyć sprawność termiczną obiegu oraz pracę jednostkową obiegu, jeżeli czynnikiem roboczym jest hel  $He$  ( $M = 4$  kg/kmol). Obieg przedstawić na wykresach o współrzędnych p-v i T-s.

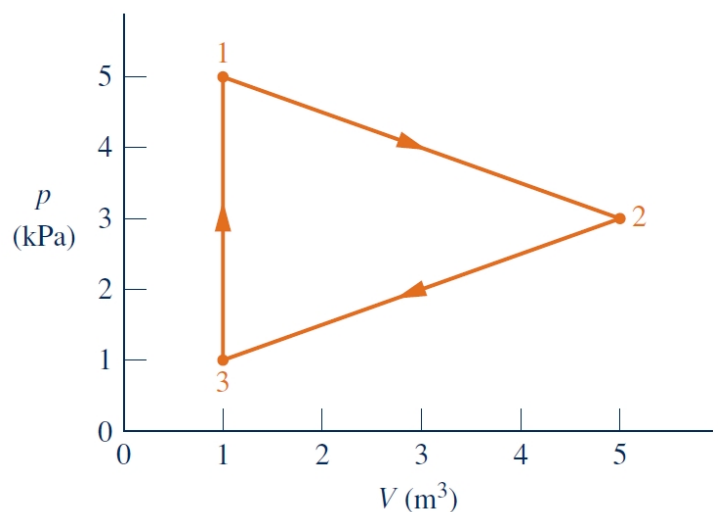
**[67]** Gaz doskonały jednoatomowy realizuje obieg przedstawiony na rysunku. Obliczyć sprawność termiczną tego obiegu.

**ROZWIĄZANIE**

$$T_1 = \frac{p_1 V_1}{mR} \quad (18.1)$$

$$L_{1-2} = \frac{p_1 + p_2}{2} \cdot (V_2 - V_1) \quad (18.2)$$

$$\Delta U_{1-2} = mc_v(T_2 - T_1) \quad (18.3)$$



$$c_v = \frac{1}{2} f R \quad (18.4)$$

Po podstawieniu (18.1) oraz (18.4) do (18.3) dostajemy

$$\Delta U_{1-2} = 0,5 f (p_2 V_2 - p_1 V_1) \quad (18.5)$$

i dalej

$$Q_{1-2} = \Delta U_{1-2} + L_{1-2} = 31 \cdot 10^3 J$$

$$\eta_t = 1 - \frac{|Q_{2-3}|}{Q_{1-2} + Q_{3-1}} = 0,216$$

[68] Obieg cieplny silnika składa się kolejno z izentropii ekspansji 1-2, izotermii i izochory. Minimalne ciśnienie w obiegu wynosi 1,5 bar, a minimalna temperatura jest równa 350 K. Ciepło przemiany izotermicznej jest równe  $-25$  kJ. Czynnik roboczy to 0,3 kg azotu  $N_2$ . Obliczyć pracę i sprawność termiczną obiegu. Obieg narysować na wykresach p-V i T-S. Wykonać przeliczenie jednostek.

#### WSKAZÓWKI

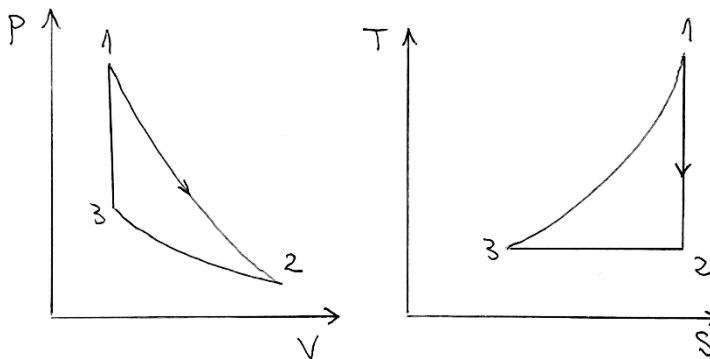
$p_3$  obliczamy z równania

$$L_{2-3} = mRT_2 \ln\left(\frac{p_2}{p_3}\right)$$

gdzie  $L_{2-3} = -25 \cdot 10^3 J$ .

Następnie obliczamy  $V_2$  z termicznego równania stanu i  $T_1$  z równania izentropii

$$T_1 = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\kappa-1} \quad T_2 = 492,3 [K]$$



[69] Obieg cieplny silnika składa się kolejno z izobary ekspansji 1-2, izentropii, izochory oraz izotermii. Ciśnienie i temperatura w punkcie 1 wynoszą odpowiednio 1,1 MPa oraz 350 K, natomiast ciśnienie końcowe przemiany izentropowej jest równe 0,4 MPa. Ciepło przemiany izobarycznej wynosi 200 kJ. Czynnikiem roboczym jest 0,4 kg powietrza. Obliczyć pracę kompresji oraz sprawność termiczną obiegu. Obieg przedstawić na wykresach p-V oraz T-S.

[70] W zbiorniku o pojemności  $10 \text{ m}^3$  znajduje się para wodna o ciśnieniu 0,5 MPa i temperaturze  $250^\circ\text{C}$ . Do zbiornika doprowadzono rurociągiem 2 kg wody o temperaturze  $90^\circ\text{C}$ . Ile wynoszą temperatura i ciśnienie pary na końcu procesu.

[71] Jaki strumień [kg/h] pary wodnej mokrej o ciśnieniu 6 bar i stopniu suchości 0,92 należy mieszać ze strumieniem wody  $6000 \text{ kg/h}$  o temperaturze  $14^\circ\text{C}$ , aby uzyskać wodę o temperaturze  $45^\circ\text{C}$ . Przyjąć, że strumień strat ciepła na rzecz otoczenie podczas mieszania wyniósł 800 W. Zadanie rozwiązać wychodząc z równania pierwszej zasady termodynamiki. Napisać co przyjęto za układ termodynamiczny. Przypisać odpowiednie wyrażenia wszystkim składnikom równania bilansu.



[72] Do 2 kg pary wodnej o parametrach  $150^{\circ}\text{C}$ , 0,5 bar, zawartej w układzie zamkniętym, doprowadzono izentropowo 400 kJ pracy. Korzystając z wykresu i-s wyznacz temperaturę, ciśnienie i objętość pary na końcu przemiany. Na szkicu wykresu i-s pokaż sposób odczytu parametrów wykorzystanych podczas rozwiązywania zadania.

[73] Strumień 4 t/h pary wodnej nasyconej mokrej o ciśnieniu 5 bar i stopniu suchości 0,2 wpływa do wymiennika ciepła, w którym do pary doprowadzany jest izobarycznie strumień 600 kW ciepła. Wyznaczyć temperaturę pary opuszczającej wymiennik oraz średnicę wewnętrzną rurociągu wylotowego, jeżeli prędkość pary w nim płynącej jest równa 6 m/s. Zadanie rozwiązać wykorzystując wykres i-s. Na szkicu wykresu przedstawić przemianę oraz sposób odczytu parametrów wykorzystanych w rozwiązaniu.

[74] Do nagrzewnicy o mocy 16,5 kW rurociągiem o średnicy wewnętrznej 180 mm dopływa azot  $\text{N}_2$  o ciśnieniu 1,8 bar i temperaturze  $8^{\circ}\text{C}$  ze średnią prędkością 6 m/s. Obliczyć temperaturę azotu na wylocie z nagrzewnicy, jeżeli strumień strat ciepła na rzecz otoczenia wynosi 220 W. Zastosować pierwszą zasadę termodynamiki.

[75] Do wymiennika ciepła dopływa strumień 0,3 kg/s pary wodnej nasyconej mokrej o ciśnieniu 1,8 bar i stopniu suchości 0,92. W wymienniku para się całkowicie skrapla izobarycznie podgrzewając strumień wody od temperatury  $35^{\circ}\text{C}$  do temperatury  $54^{\circ}\text{C}$ . 3% ciepła skraplania uchodzi do otoczenia. Obliczyć strumień podgrzewanej wody.