2 BILANSE ENERGETYCZNE. I ZASADA TERMODYNAMIKI

2.1. PODSTAWY TEORETYCZNE

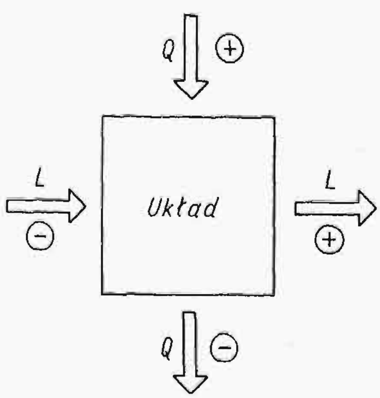
Sporządzenie bilansu energetycznego układu polega na określeniu ilości energii doprowadzonej, odprowadzonej oraz przyrostu energii układu.
Najbardziej ogólne sformułowanie I zasady termodynamiki ma postać:

$$E_1 = E_u + E_2, \qquad (2.1)$$

gdzie: E_1 - suma energii doprowadzonej do układu [J],
E_2 - suma energii odprowadzonej z układu [J],
E_u - przyrost energii układu [J].

W technice cieplnej często występują urządzenia działające w sposób ciągły (wymiennik przepływowy, turbina, kocioł). Jeżeli taki układ znajduje się w warunkach ustalonych, to bilans energetyczny odniesiony do jednostki czasu przybierze postać:

$$E_1 = E_2. \qquad (2.2)$$



Rys.2.1

Energię do układu można doprowadzić lub odprowadzić przy pomocy: pracy mechanicznej, energii cieplnej, energii elektrycznej, energii strumienia czynnika.

Ogólnie przyjęto, że energię cieplną pochłoniętą przez układ uważa się za dodatnią, energię cieplną oddaną - za ujemną. Pracę wykonaną przez układ traktuje się jako dodatnią, natomiast pracę doprowadzoną - za ujemną. Dla lepszego zapamiętania regułę tę przedstawiono na rys.2.1.

Rozpatrując pracę sprężarek wygodniej jest zmienić umowę i traktować pracę doprowadzoną jako dodatnią a odprowadzoną jako ujemną. Tak też postąpiono w rozdziale 7.

Pierwsza zasada termodynamiki mówi, że jeżeli energia cie-cieplna zostanie zamieniona na pracę mechaniczną, to ilość otrzymanej pracy jest dokładnie równa ilości zużytej energii cieplnej. Prawdziwe też jest twierdzenie odwrotne: przy zamiąnie pracy mechanicznej na energię cieplną, ilość powstałego ciepła jest dokładnie równa ilości zużytej pracy.

Matematyczne wyrażenie I zasady termodynamiki dla nieskończenie małych zmian stanu dowolnego gazu ma postać:

$$dQ = dU + dL, \tag{2.3}$$

gdzie: dQ - ilość ciepła zużyta do zmiany stanu gazu [J],
dU - zmiana energii wewnętrznej gazu [J],
dL - wykonana praca bezwzględna [J].

Każda z wartości w równaniu (2-3) może być w zależności od charakteru przemiany - większa, mniejsza lub równa zeru.
Dla masy 1 kg gazu równanie (2-3) przybierze postać:

$$dq = du + dl \tag{2.4a}$$

$$dl = p\ dv,$$

więc

$$dq = du + p\ dv \tag{2.4b}$$

Rozpatrując zmianę stanu gazu dla wartości skończonych od parametrów początkowych 1 do końcowych 2 otrzymano:

$$Q_{1-2} = (U_2 - U_1) + L_{1-2}, \tag{2.5a}$$

$$q_{1-2} = (u_2 - u_1) + l_{1-2}. \tag{2.5b}$$

Praca bezwzględna dla 1 kg gazu

$$dl = p\ dv$$

$$l_{1-2} = \int_{v_1}^{v_2} p\ dv = p(v_2 - v_1) \tag{2.6a}$$

lub dla m kg gazu

$$L_{1-2} = mp(v_2 - v_1) = p(V_2 - V_1). \tag{2.6b}$$

Pierwsze równanie termodynamiki (2-3) lub (2-4) można przedstawić w drugiej postaci, wprowadzając pojęcie pracy technicznej i entalpii:

$$dq = di - v\,dp, \qquad (2.7a)$$

$$dq = di + dl_t. \qquad (2.7b)$$

Ponieważ $dl_t = -v\,dp$

to

$$l_{t1-2} = -\int_{p_1}^{p_2} v\,dp = v(p_1 - p_2) \qquad (2.8a)$$

lub

$$L_{t1-2} = m\,v(p_1 - p_2) = V(p_1 - p_2). \qquad (2.8b)$$

Równanie definicyjne entalpii:

$$i = u + pv. \qquad (2.9)$$

Druga postać pierwszego równania termodynamiki dla wartości skończonych od stanu 1 do 2:

$$q_{1-2} = i_2 - i_1 + l_{t1-2}. \qquad (2.10)$$

2.1. ZADANIA

2.2.1. Bijak młota parowego uderzył stalowy przedmiot nagrzewając go od temperatury $T_1 = 300^\circ K$ ($27^\circ C$) do $T_2 = 350^\circ K$ ($73^\circ C$). Masa bijaka wynosiła $m_1 = 500$ kg. Wysokość swobodnego spadku $h = 2,5$ m. Zakładając, że 35% wydzielonego przy uderzeniu ciepła zużyta została na podgrzanie przedmiotu obliczyć jego masę m_2.
Przyjąć: ciepło właściwe stali $c = 0,452$ kJ/(kg·deg), przyspieszenie ziemskie $g = 9,81$ m/s^2.

Rozwiązanie

Energia spadającego bijaka zamieniona na ciepło zużyte do podgrzania przedmiotu wynosi

$$E_1 = 0,35 \cdot m_1 \cdot h \cdot g$$

oraz

$$E_2 = m_2 \cdot c \cdot (T_2 - T_1),$$

ponieważ

$$E_1 = E_2.$$

Skąd

$$m_2 = \frac{0,35\ m_1 \cdot h \cdot g}{c(T_2 - T_1)} \left[\frac{kg \cdot m \cdot \frac{m}{s^2}}{\frac{kg \cdot m^2 \cdot deg}{s^2 \cdot kg \cdot deg}} \right] = [kg],$$

$$c = 0,452\ kJ/(kg \cdot deg) = 452\ J/(kg \cdot deg),$$

$$1J = 1\ (kg \cdot m^2)/s^2;$$

ostatecznie po wstawieniu wartości liczbowych:

$$m_2 = \frac{0,35 \cdot 500 \cdot 2,5 \cdot 9,81}{452(350 - 300)} = 0,191\ kg.$$

2.2.2. Przeprowadzono badanie silnika spalinowego obciążonego hamulcem szczękowym. Uzyskano następujące wyniki:

- ilość wody chłodzącej hamulec $m_w = 1,72$ kg ,
- przyrost temperatury wody $\Delta T = 35$ deg ,
- prędkość kątowa wału $w = 157$ rad/s.

Zakładając, że 20% ciepła wytworzonego w hamulcu ulegnie rozproszeniu, oraz przyjmując ciepło właściwe wody $c = 4187$ J/(kg·deg) obliczyć moment obrotowy wału.

Rozwiązanie

W hamulcu cała moc efektywna została zamieniona na ciepło tarcia. Natomiast 80% wydzielonego ciepła podgrzewa wodę chłodzącą, czyli

$$0,8\ N = m_w \cdot c \cdot \Delta T;$$

moment obrotowy wynosi:

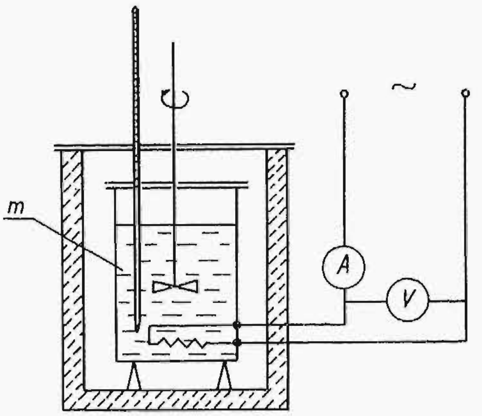
$$M = \frac{N}{w} = \frac{m_w \cdot c \cdot \Delta T}{0,8 \cdot w},$$

wstawiając wartości liczbowe otrzymano

$$M = \frac{1,72 \cdot 4187 \cdot 35}{0,8 \cdot 157} = 2000\ N \cdot m$$

$$M = 2000\ N \cdot m.$$

2.2.3. Ciepło właściwe oleju określono w kalorymetrze przedstawionym na rys.2.2. W czasie pomiaru otrzymano następujące wyniki: spadek napięcia na grzałce $\Delta U = 43$ V, wielkość prądu $J = 6$ A, czas nagrzewania badanego oleju $\tau = 720$ s, przyrost temperatury oleju $\Delta T = 18$ deg, masa badanego oleju $m = 3$ kg. Wcześniej wyznaczono stałą kalorymetru K, tj. ilość ciepła jaką należy doprowadzić częściom stałym kalorymetru (naczynie, mieszadło termometr), aby ich temperaturę podnieść o 1 deg; $K = 3120$ J/deg.



Rys.2.2

Obliczyć ciepło właściwe oleju.

Odp. $c = 2360$ J/(kg·deg).

2.2.4. Na stanowisku badawczym wał silnika bezpośrednio połączono z prądnicą prądu stałego. W trakcie pomiarów zmierzono na zaciskach prądnicy: napięcie prądu $U = 220$ V, natężenie prądu $I = 50$ A. Zakładając sprawność ogólną prądnicy $\eta_p = 0{,}98$, obliczyć moc na wale silnika.

Odp. $N = 11{,}2$ kW.

2.2.5. Samochód o masie 5000 kg poruszający się z prędkością $w = 15$ m/s został zahamowany. Obliczyć ilość ciepła wydzielonego w bębnach hamulcowych pojazdu. W obliczeniach uwzględnić wyłącznie energię kinetyczną ruchu postępowego.

Odp. $Q = 1562{,}5$ kJ.

2.2.6. Ołowiany pocisk uderzając w stalową płytę uległ stopieniu. Temperatura kuli przed uderzeniem wynosiła $T_1 = 300^0$K. Temperatura topnienia ołowiu $T_2 = 600^0$K, ciepło topnienia ołowiu $r = 20{,}09$ kJ/kg, ciepło właściwe $c = 0{,}1256$ kJ/(kg·deg). Przy założeniu, że cała wydzielona energia cieplna została zużyta na podgrzanie pocisku, obliczyć jego prędkość.

Odp. $w = 340$ m/s.

2.2.7. Rtęć o masie $m = 0,4$ kg spadła z wysokości $h = 20$ m do kalorymetru wypełnionego wodą. Temperatury wody w kalorymetrze i spadającej rtęci były równe. Obliczyć przyrost temperatury wody i rtęci, przyjmując że cała energia kinetyczna spadającej rtęci została w kalorymetrze zamieniona na ciepło. Masa wody w kalorymetrze $m_w = 0,04$ kg. Ciepło właściwe rtęci $c_{Hg} = 01398$ kJ/(kg·deg), wody $c_{H_2O} = 4,187$ kJ/(kg·deg). W obliczeniach nie uwzględniać pojemności cieplnej części stałych kalorymetru.

Odp. $\Delta T = 0,35$ deg.

2.2.8. Przy temperaturze $T = 273,16^{o}K$ i ciśnieniu bezwzględnym $p = 610,77$ N/m^3 (punkt potrójny) entalpia wody równa jest zeru. Obliczyć energię wewnętrzną wody w tym stanie, jeżeli jej objętość właściwa $v = 0,001002$ m^3/kg.

Rozwiązanie

Korzystając z równania (2-9) można napisać:

$$u = i - pv;$$

ponieważ

$$i = 0,$$

więc

$$u = - 610,77 \cdot 0,001002 = - 0,611 \ kgm/(s^2 \cdot m^2) \cdot m^3/kg,$$

$$u = - 0,611 \ J/kg.$$

2.2.9. Na skutek doprowadzenia ciepła gaz znajdujący się w cylindrze pod tłokiem zwiększył swoją objętość przy stałym ciśnieniu wykonując pracę $L_{1-2} = 3000$ kJ. Ilość doprowadzonego ciepła $Q_{1-2} = 2700$ kJ. Obliczyć zmianę energii wewnętrznej i entalpii gazu.

Rozwiązanie

Z pierwszego równania termodynamiki (2-5a) otrzymano

$$U_2 - U_1 = Q_{1-3} - L_{1-2}$$

wstawiając dane otrzymamy

$$U_2 - U_1 = 2700 - 3000 = - 300 \ kJ.$$

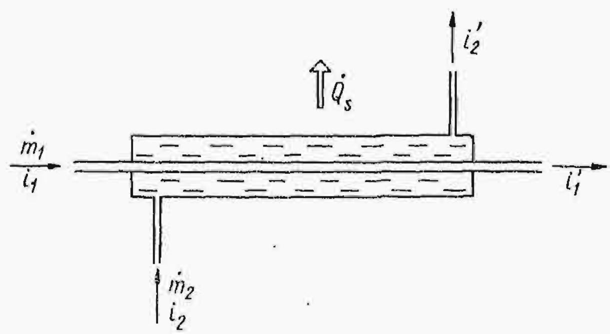
Z zależności (2-8) i (2-10) wynika, że przy $dp = 0$

$$Q_{1-2} = I_2 - I_1 = 3000 \text{ kJ}.$$

2.2.10. W zbiorniku znajduje się gaz o masie $m_1 = 50$ kg mający energię wewnętrzną $u_1 = 195$ kJ/kg. Z rurociągu doprowadzono do zbiornika $m_2 = 65$ kg takiego samego gazu o entalpii $i_2 = 1200$ kJ/kg. W trakcie ładowania gaz w zbiorniku stracił $Q_o = 2500$ kJ ciepła. Obliczyć energię wewnętrzną gazu znajdującego się w zbiorniku po doładowaniu.

Odp. $u_2 = 129{,}2$ kJ/kg.

2.2.11. W wymienniku ciepła pokazanym na rys.2.3 czynnik o masowym natężeniu przepływu $\dot{m}_1 = 0{,}5$ kg/s oddaje ciepło zmniejszając swoją entalpię od $i_1 =$ $= 2100$ kJ/kg do $i_1 = 1800$ kJ/kg. Czynnik ogrzewany przepływając przez wymiennik zwiększa swoją entalpię od $i_2 = 50$ kJ/kg do $i'_2 = 232$ kJ/kg. Wielkość strat



Rys.2.3

ciepła czynnika ogrzewanego na rzecz otoczenia wynosi $\dot{Q}_s =$ $= 8{,}44$ kW.

Obliczyć masowe natężenie przepływu czynnika ogrzewanego.

Odp. $\dot{m}_2 = 0{,}778$ kg/s.