

1. Pierwsza zasada termodynamiki

Matematyczna forma I zasady termodynamiki, czyli zasady zachowania energii

$$E_d = \Delta E_u + E_w \quad [J] \quad (1.1)$$

$$\Delta E_u = E_d - E_w \quad (1.1a)$$

$$\Delta E_u = E_{konc} - E_{pocz} \quad (1.1b)$$

gdzie: E_d – energia doprowadzona do układu [J], E_w – energia wyprowadzona z układu [J], ΔE_u – przyrost energii układu [J].

Gdy energia doprowadzona jest większa od energii wyprowadzonej, to energia układu wzrośnie ($\Delta E_u > 0$). Z kolei, gdy energia doprowadzona jest mniejsza od energii wyprowadzonej to energia układu zmaleje ($\Delta E_u < 0$).

Z równania (1.1a) wynika, że zmiana energii układu następuje wskutek wymiany energii z otoczeniem. Energia ani nie może powstać z niczego, ani nie może zniknąć.

Gdy do układu dopływają/odpływają strumienie energii, równanie (1.1) przybiera postać

$$\dot{E}_d = \Delta \dot{E}_u + \dot{E}_w \quad [W] \quad (1.2)$$

Dla układu w stanie ustalonym (stacjonarnym) jest

$$\Delta \dot{E}_u = 0 \quad (1.3)$$

stąd równanie bilansu energii dla tego typu układu

$$\dot{E}_d = \dot{E}_w \quad [W] \quad (1.4)$$

Z równania (1.4) wynika następujący wniosek:

Jest rzeczą niemożliwą skonstruowanie perpetuum mobile I rodzaju, tj. silnika pracującego w sposób stacjonarny bez zasilania energią z zewnątrz.

Parametry stanu mogą przybierać różne wartości w różnych punktach układu stacjonarnego. W określonym punkcie układu stacjonarnego parametry stanu nie zmieniają się w czasie.

Dla układu odosobnionego jest

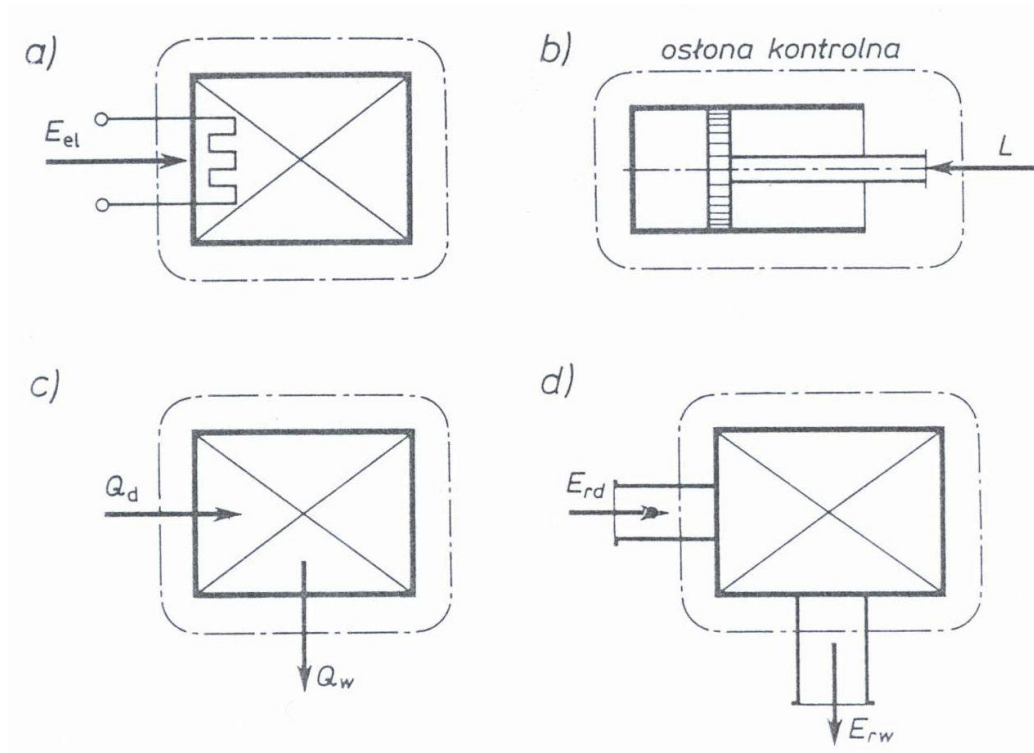
$$E_d = E_w = 0 \quad (1.5)$$

czyli

$$\Delta E_u = 0 \quad (1.6)$$

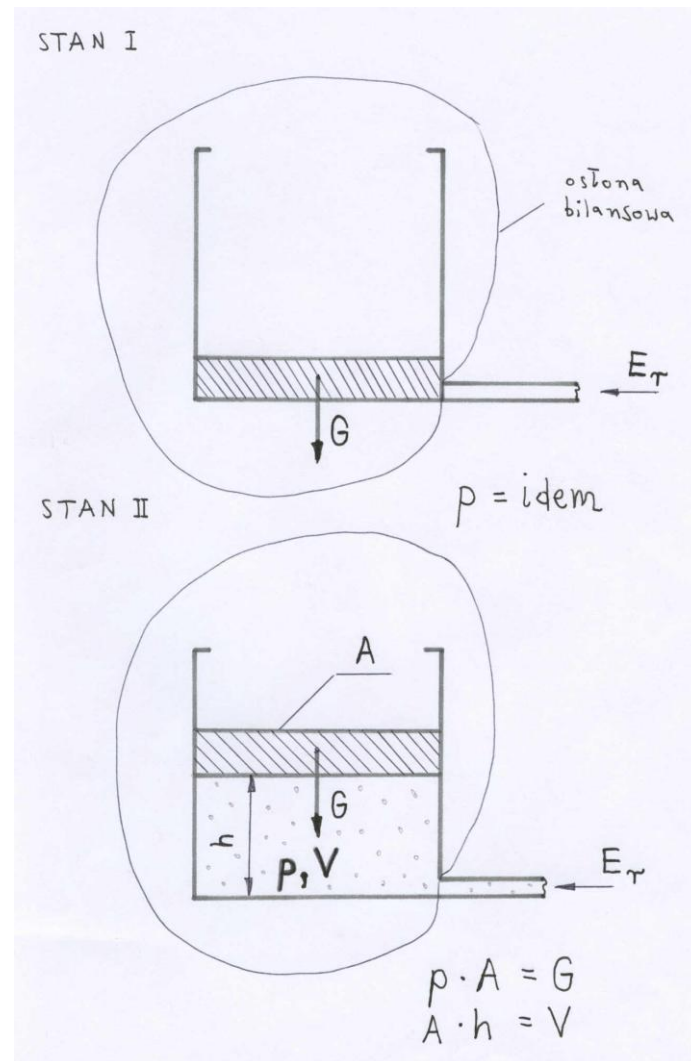
i stąd

$$E_1 = E_2 = \dots = E_k = \text{idem} \quad (1.7)$$



Rys. 1.1. Sposoby doprowadzania energii do układu termodynamicznego. Linia punktowo kreskowa to osłona bilansowa. a) Energia elektryczna E_{el} dostarczana do układu zamieniana jest w nagrzewnicy na ciepło, ciepło trafia do czynnika termodynamicznego i powiększa jego energię wewnętrzną. b) Wskutek dostarczania energii w formie pracy L następuje kompresja czynnika w układzie. Dostarczona praca powiększa energię wewnętrzną układu. c) Do układu doprowadzone jest ciepło Q_d i wyprowadzone ciepło Q_w . Przyrost energii układu jest równy $Q_d - |Q_w|$. Przy $Q_d > |Q_w|$ energia układu wzrośnie. d) Energia jest doprowadzana do układu i wyprowadzana z układu rurociągiem wraz z czynnikiem termodynamicznym. Przy pominięciu makroskopowej energii kinetycznej i potencjalnej energia ta jest równa entalpii czynnika.

2. Entalpia



Ogólne równanie pierwszej zasady termodynamiki (I ZT)

$$E_d = \Delta E_u + E_w \quad (2.1)$$

gdzie przyrost energii układu jest równy

$$\Delta E_u = E_{II} - E_I \quad (2.2)$$

E_{II} – energia układu na końcu przemiany (po wtłoczeniu substancji do układu)

E_I – energia układu na początku przemiany (przed wtłoczeniem substancji do układu)

Dla układu przedstawionego na rysunku jest

$$E_d = E_r \quad (2.3)$$

$$E_I = 0 \quad (2.4)$$

$$E_{II} = U + Gh \quad (2.5)$$

$$E_w = 0 \quad (2.6)$$

Zależności (2.2) - (2.6) podstawiamy do równania (2.1)

$$E_r = U + Gh - 0 + 0 = U + Gh \quad (2.7)$$

Siła G jest równoważona przez siłę naporu czynnika na tłok, stąd

$$G = pA \quad (2.8)$$

Po podstawieniu (2.8) do (2.7) i wykorzystaniu zależności

$$Ah = V \quad (2.9)$$

dostajemy

$$E_r = U + pV \quad (2.10)$$

Prawa strona równania (2.10) jest pewną funkcją stanu. Funkcję tę oznaczamy I i nazywamy ją entalpią

$$I = U + pV [J] \quad (2.11)$$

Po podzieleniu równania (2.11) stronami przez ilość substancji $m [kg]$ otrzymujemy wyrażenie na entalpię właściwą

$$i = u + pv [J/kg] \quad (2.12)$$

która jest intensywnym parametrem (funkcją) stanu.

W interpretacji fizycznej entalpia jest energią czynnika termodynamicznego przetłaczanego rurociągiem, dla przypadku, w którym można pominąć makroskopową energię potencjalną i kinetyczną czynnika. Uwzględniając makroskopową energię kinetyczną i potencjalną, całkowity strumień energii czynnika przetłaczanego rurociągiem może być obliczony ze wzoru

$$\dot{E}_r = \dot{m} \left(gh + \frac{w^2}{2} + u + pv \right) [W] \quad (2.13)$$

Strumień czynnika \dot{m} można obliczyć z zależności

$$\dot{m} = \dot{V} \rho = Aw\rho [kg/s] \quad (2.14)$$

gdzie:

- A - pole przekroju poprzecznego rurociągu, m^2
- w - średnia (dla przekroju poprzecznego) prędkość czynnika, m/s
- ρ - gęstość czynnika, kg/m^3

3. Szczególne przypadki bilansu energetycznego

3.1. Układ zamknięty

$$Q_{1-2} = \Delta U_{1-2} + L_{1-2} \quad [\text{J}] \quad (3.1)$$

Q_{1-2} – ciepło doprowadzone do układu (jeżeli ciepło jest wyprowadzane z układu to podstawiamy je do wzoru (3.1) ze znakiem *minus*), w J

ΔU_{1-2} – przyrost energii wewnętrznej układu, w J

L_{1-2} – praca wyprowadzona z układu (jeżeli praca jest doprowadzona do układu to podstawiamy ją do wzoru (3.1) ze znakiem *minus*), w J

Po podzieleniu stronami równania (3.1) przez ilość substancji m otrzymujemy

$$q_{1-2} = \Delta u_{1-2} + l_{1-2} \quad [\text{J/kg}] \quad (3.2)$$

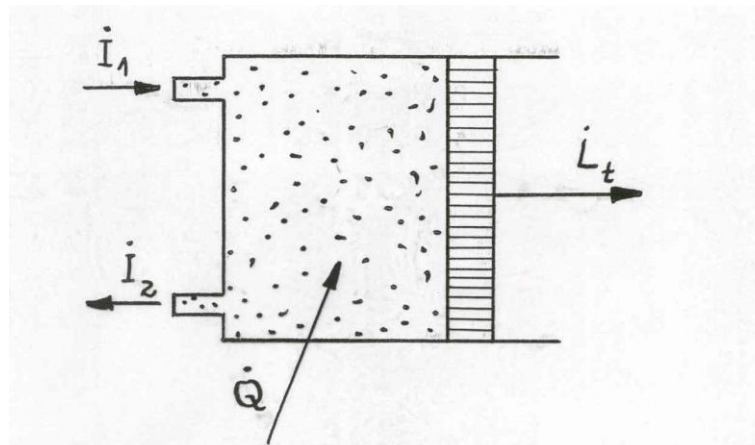
Postać różniczkowa równania (2)

$$dq = du + dl = du + pdv \quad (3.3)$$

3.2. Idealna maszyna przepływowa

strona odkorbowa

strona kukorbowa



Ogólne równanie bilansu energetycznego dla układów przepływowych ma postać

$$\dot{E}_d = \Delta \dot{E}_u + \dot{E}_w \quad [\text{W}] \quad (3.4)$$

Dla stanu ustalonego przyrost energii wewnętrznej układu jest równy zeru

$$\Delta \dot{E}_u = 0 \quad (3.5)$$

Strumień energii doprowadzanej do układu

$$\dot{E}_d = \dot{I}_1 + \dot{Q} \quad (3.6)$$

Strumień energii wyprowadzanej z układu

$$\dot{E}_w = \dot{I}_2 + \dot{L}_t \quad (3.7)$$

Po podstawieniu (3.5) - (3.7) do (3.4) dostajemy

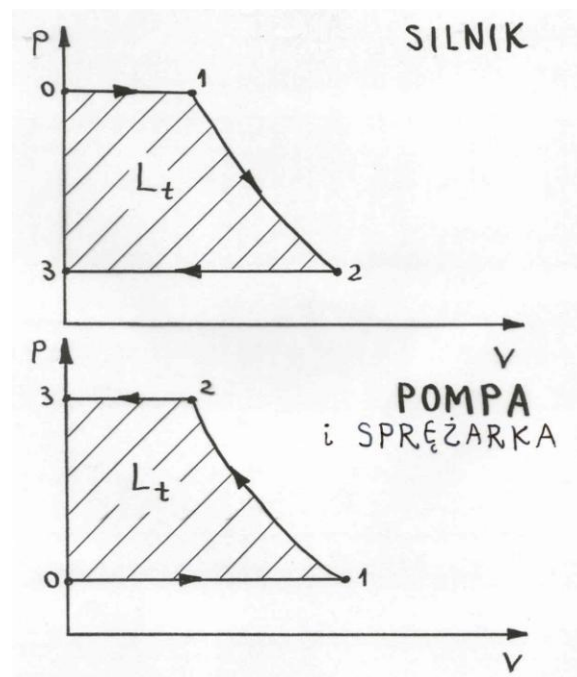
$$\dot{I}_1 + \dot{Q} = 0 + \dot{I}_2 + \dot{L}_t \quad (3.8)$$

Równanie (3.8) przepisujemy w formie analogicznej do (3.1)

$$\dot{Q} = \dot{I}_2 - \dot{I}_1 + \dot{L}_t = \Delta \dot{I}_{1-2} + \dot{L}_t \quad (3.9)$$

Dla $\dot{Q} = 0$ równanie (3.9) upraszcza się do postaci

$$\dot{L}_t = N_t = \dot{I}_1 - \dot{I}_2 \quad (3.10)$$



Równanie (3.9) dzielimy stronami przez strumień substancji \dot{m} otrzymując

$$q = i_2 - i_1 + l_t = \Delta i_{1-2} + l_t \quad (3.11)$$

Następnie do (11) podstawiamy za entalpię właściwą i

$$i = u + pv \quad (3.12)$$

a za jednostkową pracę techniczną l_t

$$l_t = p_1 v_1 + l_{1-2} - p_2 v_2 \quad (3.13)$$

dostając

$$q = u_2 + p_2 v_2 - u_1 - p_1 v_1 + p_1 v_1 + l_{1-2} - p_2 v_2 = u_2 - u_1 + l_{1-2} \quad (3.14)$$

czyli równanie bilansu energii sformułowane dla układu zamkniętego, identyczne jak równanie (3.2). W analogiczny sposób równanie (3.2) można przekształcić do postaci (3.11). Różniczkowa forma równania (3.11) jest następująca

$$dq = di + dl_i = di - vdp \quad (3.15)$$

Zróżniczkujemy stronami równanie (3.12)

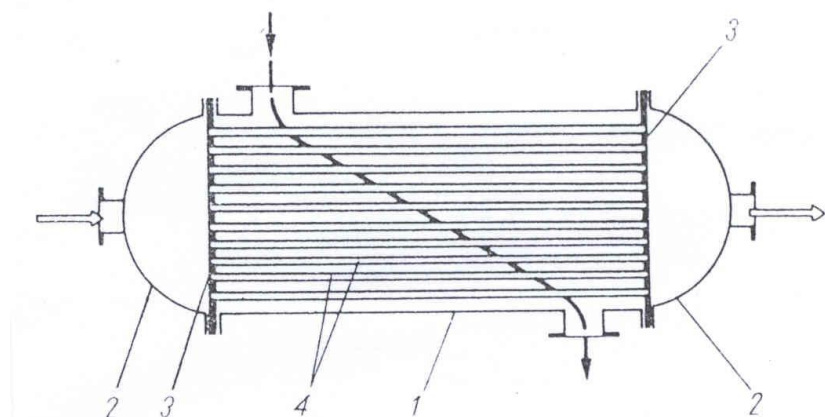
$$di = du + pdv + vdp \quad (3.16)$$

i podstawmy otrzymany wynik do równania (3.15)

$$dq = du + pdv + vdp - vdp = du + pdv \quad (3.17)$$

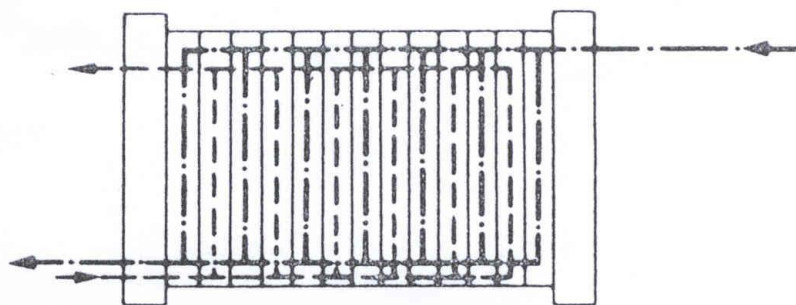
W ten sposób równanie (3.15) przekształciliśmy w równanie (3.3).

3.3. Adiatermiczny wymiennik ciepła

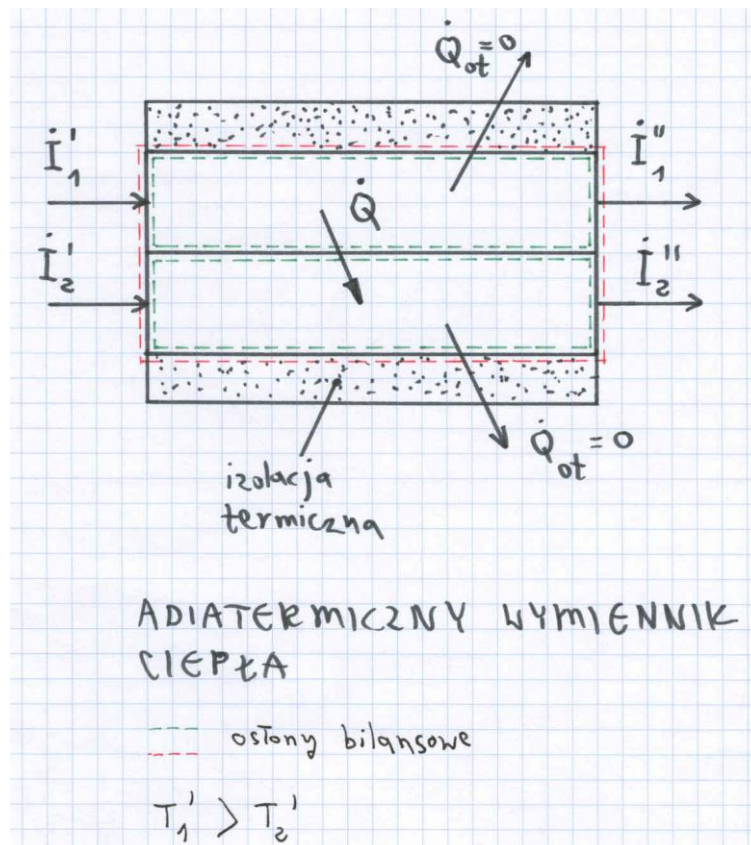


Rys. 2.1. Schemat rurowego wymiennika ciepła

1 — kadłub; 2 — pokrywa; 3 — ściana sitowa; 4 — rury



Rys. 2.9. Schemat płytowego wymiennika ciepła



Zajmiemy się bilansem energii adiatermicznego wymiennika ciepła w stanie ustalonym. Ogólne równanie bilansu energii dla układu przepływowego ma postać (3.4). Rozpatrzmy trzy przypadki szczególne, zależnie od sposobu poprowadzenia osłony bilansowej. Dla wszystkich rozpatrywanych przypadków, z uwagi na analizę stanu ustalonego, przyrost energii wewnętrznej jest równy zero

$$\Delta \dot{E}_u = 0 \quad (3.18)$$

3.3.1. Osłona obejmuje kanał z czynnikiem cieplejszym

Strumień energii dostarczany do kanału z czynnikiem cieplejszym

$$\dot{E}_d = \dot{I}'_1 \quad (3.19)$$

Strumień energii wyprowadzanej z kanału z czynnikiem cieplejszym

$$\dot{E}_w = \dot{Q} + \dot{I}''_1 \quad (3.20)$$

Po podstawieniu do (3.4) zależności (3.18) – (3.20) otrzymujemy

$$\dot{I}'_1 = 0 + \dot{Q} + \dot{I}''_1 \quad (3.21)$$

i po uporządkowaniu

$$\dot{Q} = \dot{I}'_1 - \dot{I}''_1 \quad (3.22)$$

Strumień ciepła oddawanego przez czynnik gorący jest równy spadkowi strumienia entalpii tego czynnika.

3.3.2. Osłona obejmuje kanał z czynnikiem zimniejszym

$$\dot{E}_d = \dot{I}'_2 + \dot{Q} \quad (3.23)$$

$$\dot{E}_w = \dot{I}''_2 \quad (3.24)$$

Po wprowadzeniu do (3.4) wyrażeń (3.18), (3.23) i (3.24) dostajemy

$$\dot{I}'_2 + \dot{Q} = 0 + \dot{I}''_2 \quad (3.25)$$

i po uporządkowaniu

$$\dot{Q} = \dot{I}''_2 - \dot{I}'_2 \quad (3.26)$$

Strumień ciepła pobieranego przez czynnik zimny jest równy przyrostowi strumienia entalpii tego czynnika.

3.3.3. Osłona obejmuje dwa kanały

$$\dot{E}_d = \dot{I}'_1 + \dot{I}'_2 \quad (3.27)$$

$$\dot{E}_w = \dot{I}''_1 + \dot{I}''_2 \quad (3.28)$$

Po podstawieniu do (3.4) wyrażeń (3.18), (3.27) i (3.28) dostajemy

$$\dot{I}'_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}''_1 + \dot{I}''_2 \quad (3.29)$$

i po uporządkowaniu

$$\dot{I}'_1 - \dot{I}''_1 = \dot{I}''_2 - \dot{I}'_2 \quad (3.30)$$

Spadek strumienia entalpii czynnika ciepłego jest równy przyrostowi strumienia entalpii czynnika zimnego.