

KATEDRA SYSTEMÓW ENERGETYCZNYCH i URZĄDZEŃ OCHRONY ŚRODOWISKA

Termodynamika

LABORATORIUM

Bilansowanie układów termodynamicznych według I zasady termodynamiki

Opracował:
dr inż. Jerzy Wojciechowski

**AGH WIMiR
KRAKÓW**

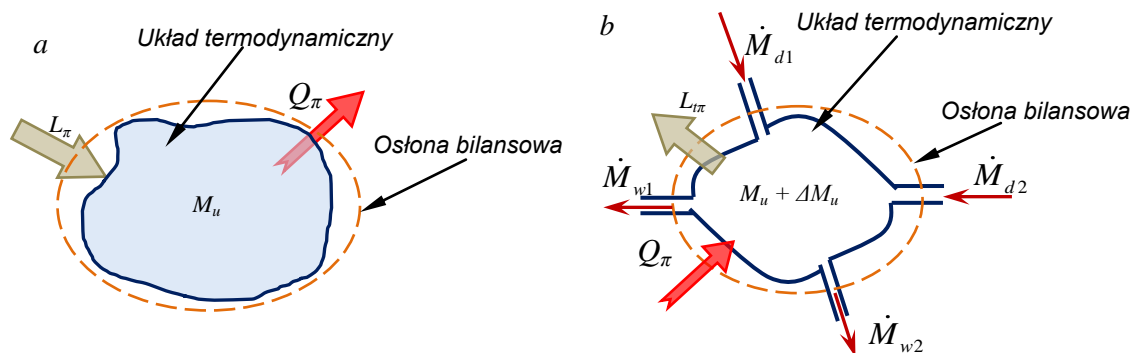
Bilansowanie układów termodynamicznych według I zasady termodynamiki

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zastosowanie I zasady termodynamiki do wykonania bilansu energetycznego układu grzewczego. Dla elektrycznego podgrzewacza wody zostanie wyznaczony przyrost energii wewnętrznej. Dla płytowego wymiennika ciepła współczynnik przenikania ciepła oraz wartość strat strumienia ciepła do otoczenia i sprawność wymiennika.

1. Oddziaływanie układu termodynamicznego z otoczeniem

Układ termodynamiczny to wydzielona za pomocą osłony bilansowej część przestrzeni zawierająca substancję, którą nazywamy czynnikiem termodynamicznym. Osłona bilansowa (kontrolna) może być rzeczywista lub abstrakcyjna. Przestrzeń pozostająca na zewnątrz układu termodynamicznego nazywamy *otoczeniem*. Jeżeli nie ma możliwości przepływu substancji między otoczeniem a układem to układ termodynamiczny jest *zamknięty* (rys. 1a). Taki układ może oddziaływać z otoczeniem za pomocą przepływu energii. Bódźce energetyczne powodują zmianę stanu energetycznego układu zamkniętego. Jeżeli między układem a otoczeniem może odbywać się przepływ substancji to układ termodynamiczny jest *otwarty* (rys. 1b). W układzie otwartym również mogą występować energetyczne oddziaływania pomiędzy układem a otoczeniem prowadzące do zmiany stanu energetycznego układu. Stan energetyczny układu może ulegać zmianie przez oddziaływanie z otoczeniem związane ze zmianą ilości substancji w układzie i bódźce (oddziaływania) energetyczne, które nie powodują zmiany ilości substancji (w układzie termodynamicznym).



Rys. 1. Układ termodynamiczny, a – zamknięty układ termodynamiczny, b – otwarty układ termodynamiczny

Podstawą opisu i analizy zachowań układów termodynamicznych są zasada zachowania ilości substancji i zasada zachowania energii.

1.1. Zasada zachowania ilości substancji

Zasada zachowania ilości substancji postuluje, że nie ulega zmianie:

- liczba drobin w procesach fizycznych;
- liczba atomów pierwiastków w procesach chemicznych;
- liczba nukleonów w procesach rozszczepienia i syntezy jąder.

W termodynamice technicznej ilość substancji najczęściej jest określana przez masę czynnika termodynamicznego.

Dla układu termodynamicznego zasada zachowania ilości substancji przyjmuje formę bilansu. Substancja doprowadzona do układu i z niego wyprowadzona powoduje zmianę ilości substancji w układzie.

$$M_d = \Delta M_u + M_w \quad (1)$$

M_d – masa substancji doprowadzonej do układu (suma wszystkich mas doprowadzonych),
 M_w – masa substancji wyprowadzonej z układu (suma wszystkich mas wyprowadzonych),
 ΔM_u – przyrost masy układu

Jeżeli przepływ substancji między układem a otoczeniem jest określony za pomocą strumieni, to równanie 1 przyjmuje postać:

$$\dot{M}_d \Delta \tau = \Delta M_u + \dot{M}_w \Delta \tau \quad (2)$$

\dot{M}_d – strumień masy substancji doprowadzonej do układu (suma wszystkich strumieni mas doprowadzonych),

\dot{M}_w – strumień masy substancji wyprowadzonej z układu (suma wszystkich strumieni mas wyprowadzonych),

$\Delta \tau$ – przedział czasu.

Dla procesu elementarnego:

$$\dot{M}_d d\tau = dM_u + \dot{M}_w d\tau \quad (2a)$$

$d\tau$ – elementarny przedział czasu

Dla procesu ustalonego ilość substancji zawartej w układzie nie ulega zmianie ($\Delta M_u = 0$, $dM_u = 0$) równanie (2) otrzymuje postać:

$$\dot{M}_d = \dot{M}_w \quad (3)$$

Strumień masy substancji o gęstości ρ przepływający w kanale o polu przekroju poprzecznego A ze średnią prędkością w jest równy

$$\dot{M} = \rho w A \quad (4)$$

W stanie ustalonym strumień masy substancji w każdym kanale przepływowym jest stały. Wartości strumieni oraz ilość substancji przepływającej między układem a otoczeniem określa się na granicy osłony bilansowej.

1.2. Zasada zachowania energii

Zgodnie z zasadą zachowania energii, energia nie może być wytworzona ani również nie może zniknąć. Energia podlega różnym przekształceniom zmieniając formę i postać, co prowadzi do zmian stanu energetycznego układu. Zasadę zachowania energii dla układu termodynamicznego zapisuje się w postaci bilansu energii. Oddziaływanie energetyczne pomiędzy układem a otoczeniem określa się na granicy bilansowej. Równanie bilansu energii ujmuje wzór

$$E_d = \Delta E_u + E_w \quad (5)$$

E_d – energia doprowadzona do układu,

E_w – energia wyprowadzona z układu,

ΔE_u – przyrost energii układu

Dla procesu elementarnego równanie bilansu energii przyjmuje postać

$$\delta E_d = dE_u + \delta E_w \quad (6)$$

W równaniu (6) tylko elementarny przyrost energii układu dE_u jest różniczką zupełną. Elementarne ilości energii doprowadzonej δE_d i wyprowadzonej δE_w są liniowymi wyrażeniami różniczkowymi. Jeżeli energia przepływająca pomiędzy otoczeniem a układem jest określona przez strumienie energii, to równanie bilansu wyraża równanie

$$\dot{E}_d d\tau = d\dot{E}_u + \dot{E}_w d\tau \quad (7)$$

\dot{E}_d – strumień energii doprowadzonej do układu (suma wszystkich strumieni energii doprowadzonych),

\dot{E}_w – strumień energii wyprowadzonej z układu (suma wszystkich strumieni energii wyprowadzonych),

$d\tau$ – elementarny przedział czasu

W stanie ustalonym energia doprowadzona do układu jest równa wyprowadzonej

$$dE_u = 0 \quad \text{i} \quad \dot{E}_d = \dot{E}_w \quad (8)$$

Energia układu odosobnionego (izolowanego) jest niezmienna $E_u = \text{idem}$, $\Delta E_u = 0$.

2. Energia układu, energia wewnętrzna, entalpia

Energia układu jest funkcją stanu. Oznacza to, że zmiana energii układu może być obliczona, jako różnica energii końcowej i początkowej układu. Nie zależy od sposobu przejścia od stanu początkowego do końcowego

$$\Delta E_u = E_{uk} - E_{up} \quad (9)$$

ΔE_u – przyrost energii układu,

E_{up} – energia układu w stanie początkowym,

E_{uk} – energia układu w stanie końcowym.

Całkowita energia układu jest wielkością ekstensywną, czyli zależy od wielkości układu.

Energia układu jest sumą energii kinetycznej, potencjalnej i energii wewnętrznej.

$$E_u = E_k + E_p + U \quad (10)$$

E_u – energia układu,

E_k – energia kinetyczna układu,

E_p – energia potencjalna układu,

U – energia wewnętrzna układu.

Energia kinetyczna E_k układu termodynamicznego jest określana wtedy, kiedy układ jest w ruchu względem nieruchomego układu odniesienia. Wartość energii kinetycznej jest wyznaczana na podstawie masy układu i prędkości jego środka masy.

Energia potencjalna E_p układu termodynamicznego jest wyznaczana w odniesieniu do położenia środka masy układu względem umownego poziomu odniesienia.

W analizie termodynamicznej najczęściej, można przyjąć, że układ termodynamiczny jest nieruchomy i nie zmienia położenia względem umownego poziomu odniesienia. Oznacza to, że suma energii kinetycznej i potencjalnej nie ulega zmianie przy przejściu układu ze stanu początkowego do stanu końcowego. W wyniku oddziaływania układu z otoczeniem ulega zmianie tylko trzeci człon prawej strony równania (10), czyli energia wewnętrzna U układu.

Energia wewnętrzna U jest parametrem (funkcją) stanu, zależnym jedynie od stanu czynnika termodynamicznego. Jest ona parametrem ekstensywnym.

Składnikami energii wewnętrznej są:

- energia kinetyczna ruchu postępowego i obrotowego cząsteczek,
- energia ruchu drgającego atomów w cząsteczce,
- energia potencjalna oddziaływań międzycząsteczkowych,
- energia stanów elektronowych,
- energia jądrowa.

W obliczeniach termodynamicznych, praktycznie, nie wyznacza się bezwzględnych wartości energii wewnętrznej układu. Obliczane są przyrosty energii wewnętrznej ΔU układu. Stan odniesienia, względem którego są liczone wartości funkcji energii wewnętrznej, może być ustalony, w dużym stopniu, w sposób dowolny (często zakłada się $U = 0$ dla $t = 0^\circ\text{C}$). W termodynamice technicznej przyjmuje się, że zależy ona tylko od temperatury, ciśnienia i objętości układu.

W termodynamice, obok energii wewnętrznej, duże znaczenie ma inna funkcja stanu nazywana *entalpią*. Entalpia definiowana jest za pomocą równania Gibbsa

$$I = U + pV \quad (11)$$

I – entalpia,

U – energia wewnętrzna,

p – bezwzględne ciśnienie statyczne,

V – objętość całkowita.

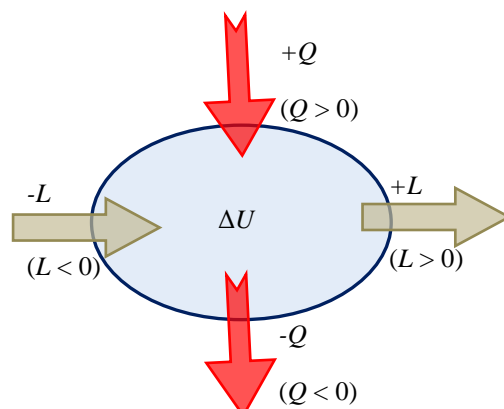
W obliczeniach termodynamicznych, praktycznie, nie wyznacza się bezwzględnych wartości entalpii układu. Obliczane są przyrosty entalpii ΔI układu. Stan odniesienia, względem którego są liczone wartości funkcji entalpii, może być ustalony, w dużym stopniu, w sposób dowolny. W termodynamice technicznej przyjmuje się, że zależy ona od tych samych parametrów stanu, co energia wewnętrzna.

Wszystkie rodzaje energii omówione w tym punkcie są wielkościami ekstensywnymi, czyli zależą od wielkości układu. W analizie układu termodynamicznego można korzystać z wielkości intensywnych, niezależnych od wielkości układu. Przejście do parametrów i funkcji intensywnych uzyskuje się przez podzielenie odpowiednich równań przez ilość czynnika termodynamicznego określoną przez masę. Równania nie zmieniają postaci, są zapisywane za pomocą małych liter odpowiadających symbolom odpowiednich wielkości fizycznych.

3. Oddziaływanie między układem termodynamicznym a otoczeniem

W wyniku procesów termodynamicznych ulega zmianie stan energetyczny układu. Zmiana stanu energetycznego dokonuje się przez oddziaływanie układu z otoczeniem. Oddziaływanie pomiędzy układem termodynamicznym a otoczeniem może być wynikiem przepływu substancji lub bodźców energetycznych. Energia układu jest wielkością ekstensywną, oznacza to, że zmiana ilości substancji (wielkości układu) powoduje zmianę stanu energetycznego. Energię można doprowadzić lub wyprowadzić z układu termodynamicznego za pomocą doprowadzenia lub pobrania substancji z układu. Bodźce energetyczne za pomocą, których można zmieniać poziom energetyczny układu to *praca* i *ciepło*. Praca i ciepło są tymi postaciami energii, które mogą powodować zmianę stanu energetycznego układu. Ilość pracy i ciepła jest określana na granicy układu i otoczenia. Oddziaływanie układu z otoczeniem na sposób pracy i ciepła trwa dopóty, dopóki układ nie osiągnie stanu równowagi z otoczeniem. Ilość pracy i ciepła zależy od sposobu realizacji tego oddziaływania, czyli nie są to funkcje stanu, zaliczamy je do wielkości procesowych. Ilość pracy i ciepła zależy od historii układu. W termodynamice technicznej obowiązuje konwencja znakowania oddziaływania pracy i ciepła z układem, umowa ta jest przedstawiona na rysunku 2. Praca jest dodatnia, jeżeli układ wykonuje ją nad otoczeniem (silnik), jeżeli otoczenie wykonuje pracę nad układem to znak pracy jest

ujemny (maszyna robocza). Ciepło doprowadzane do układu jest dodatnie, natomiast ciepło wyprowadzone z układu do otoczenia jest ujemne.



Rys. 2. Konwencja znakowania ciepła i pracy w oddziaływaniu pomiędzy układem termodynamicznym a otoczeniem; L – praca, Q – ciepło, ΔU – zmiana energii wewnętrznej układu

3.1. Praca

Praca jest definiowana w mechanice klasycznej. *Praca* jest to iloczyn skalarny siły i przemieszczenia. W termodynamice technicznej praca jest sposobem zmiany stanu energetycznego. Definicja jest dostosowana do oddziaływania pomiędzy układem a otoczeniem. *Pracą nazywamy każde oddziaływanie pomiędzy układem termodynamicznym a otoczeniem, które można sprowadzić do przemieszczenia ciężaru znajdującego się poza układem.* W termodynamice definicyjną zależność opisującą pracę przekształca się w taki sposób, aby była ona określona przez mierzalne parametry stanu układu termodynamicznego. Praca jest wielkością procesową, której wielkość zależy od historii układu.

Praca bezwzględna

Pracą bezwzględną nazywamy pracę wykonaną przez czynnik termodynamiczny przy zmianie jego objętości.

$$\delta L_{\pi} = p dV \quad (12)$$

δL_{π} – elementarna ilość pracy w przemianie π ,
 dV – elementarna zmiana objętości układu,
 p – bezwzględne ciśnienie statyczne czynnika.

Dla odwracalnej przemiany skończonej π , realizowanej pomiędzy stanami 1 – 2, ilość pracy bezwzględnej określa równanie

$$L_{\pi} = L_{1-2} = \int_1^2 p dV \quad (13)$$

L_{π} – zewnętrzna praca bezwzględna przemiany odwracalnej π ,
 L_{1-2} – praca bezwzględna przemiany odwracalnej 1 – 2

Do obliczenia całki w równaniu (13) konieczna jest znajomość zależności ciśnienia od objętości $p = p(V)$.

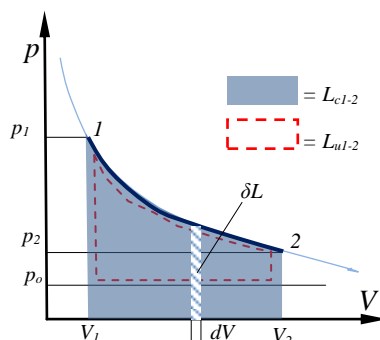
Równania (12) i (13) określają zewnętrzną pracę bezwzględną w przemianie odwracalnej (rys. 3). W przemianach nieodwracalnych część pracy czynnika zostaje zużyta na pokonanie oporów tarcia.

Praca bezwzględna całkowita jest sumą zewnętrznej pracy bezwzględnej i pracy zużytej na pokonanie tarcia.

$$\delta L_c = \delta L_\pi + \delta L_f = pdV \quad (14)$$

δL_c – elementarna ilość pracy całkowitej,

δL_f – elementarna ilość pracy tarcia.



Rys. 3. Praca bezwzględna i użyteczna w układzie pracy (układ Clapeyrona)

Zewnętrzna praca bezwzględna w przemianach nieodwracalnych jest określona równaniem

$$\delta L_\pi = \delta L_c - \delta L_f = pdV - \delta L_f \quad (15)$$

Zewnętrzna praca bezwzględna w przemianach nieodwracalnych jest mniejsza w porównaniu z pracą bezwzględną w przemianach odwracalnych.

Elementarna praca tarcia jest równa elementarnemu ciepłu tarcia. Praca tarcia w całości przekształca się w ciepło tarcia, które jest przekazane do czynnika termodynamicznego lub w części może być odprowadzone do otoczenia.

$$\delta L_f = \delta Q_f \quad (16)$$

Na rysunku 3 przedstawiona jest interpretacja pracy bezwzględnej w układzie $p - V$. Pole pod krzywą przemiany i osią odciętych V przedstawia pracę bezwzględną całkowitą. Jeżeli przemiana jest odwracalna to pole jest pracą bezwzględną zewnętrzną.

Praca bezwzględna jest dodatnia, jeżeli objętość czynnika zwiększa się, $dV > 0$, proces taki nazywamy *ekspansją*. Praca bezwzględna jest ujemna, jeżeli objętość czynnika zmniejsza się, $dV < 0$, proces taki nazywamy *kompresją*.

Praca użyteczna

Jeżeli ciśnienie na zewnątrz układu jest różne od zera to część pracy ekspansji czynnika jest wykorzystana do kompresji otoczenia. Różnicę pomiędzy pracą bezwzględną a pracą kompresji otoczenia nazywamy *pracą użyteczną* (rys. 3).

$$L_u = L_{1-2} - p_o(V_2 - V_1) \quad (17)$$

L_u – praca użyteczna,

L_{1-2} – praca bezwzględna,

p_o – ciśnienie otoczenia,

V_1, V_2 – objętość początkowa i końcowa czynnika w układzie.

Praca techniczna

Praca bezwzględna ma interpretację fizyczną w zamkniętych układach termodynamicznych, w układach otwartych jest określana praca nazywana *pracą techniczną*. Praca techniczna jest sumą pracy napełniania układu, przemiany w układzie zamkniętym i wytłoczenia czynnika z układu. Jest to praca, którą uzyskuje się w silnikach cieplnych lub doprowadzana do maszyn przepływowych.

W przemianach odwracalnych elementarna praca techniczna jest określona wzorem

$$\delta L_{t\pi} = -Vdp \quad (18)$$

$\delta L_{t\pi}$ – elementarna ilość pracy technicznej w przemianie π ,

dp – elementarna zmiana bezwzględnego ciśnienia statycznego,

V – objętość czynnika.

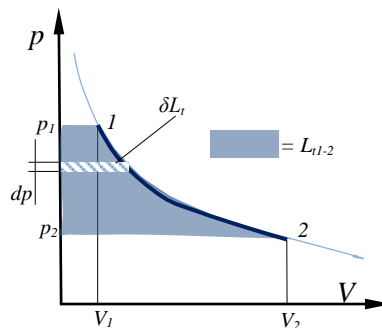
Dla odwracalnej przemiany skończonej π , realizowanej pomiędzy stanami 1 – 2, ilość pracy technicznej określa równanie

$$L_{t\pi} = L_{t1-2} = - \int_1^2 V dp \quad (19)$$

L_{t1-2} – praca techniczna przemiany odwracalnej 1 – 2

Do obliczenia całki w równaniu (19) konieczna jest znajomość zależności objętości od ciśnienia $V = V(p)$.

W układzie pracy ($p - V$) pracę techniczną przedstawia pole zawarte między krzywą przemiany w układzie zamkniętym a osią rzędnych p (rys. 4).



Rys. 4. Praca techniczna w układzie $p - V$

Równania (18) i (19) określają zewnętrzną pracę techniczną w przemianie odwracalnej (rys. 4). W przemianach nieodwracalnych część pracy czynnika zostaje zużyta na pokonanie oporów tarcia. Praca techniczna całkowita jest sumą zewnętrznej pracy technicznej i pracy zużytej na pokonanie tarcia.

$$\delta L_{tc} = \delta L_{t\pi} + \delta L_f = -Vdp \quad (20)$$

δL_{tc} – elementarna ilość pracy technicznej całkowitej,

δL_f – elementarna ilość pracy tarcia.

Praca techniczna jest dodatnia, jeżeli ciśnienie czynnika zmniejsza się, $dp < 0$, proces taki nazywamy *rozprężaniem*. Praca techniczna jest ujemna, jeżeli ciśnienie czynnika zwiększa się, $dp > 0$, proces taki nazywamy *sprężaniem*.

3.2. Ciepło

Ciepło jest sposobem oddziaływania układu termodynamicznego z otoczeniem, które prowadzi do zmiany stanu energetycznego. *Ciepłem* jest takie oddziaływanie pomiędzy układem a otoczeniem, którego nie można sprowadzić do przemieszczenia ciężaru znajdującego się poza układem. Ciepło jest postacią przekazywania energii pomiędzy układem a otoczeniem, który trwa dopóty, dopóki układ nie osiągnie stanu równowagi termicznej z otoczeniem. Boddźcem, który jest odpowiedzialny za przepływ ciepła jest różnica temperatur. Gdy różnica temperatur pomiędzy układem a otoczeniem, określona na granicy bilansowej, osiąga wartość zero, oddziaływanie na sposób ciepła ustaje. Ciepło nie jest parametrem stanu, jest to wielkość procesowa, której ilość zależy od historii układu, czyli rodzaju przemiany. Całkowita ilość ciepła przejęta przez układ termodynamiczny jest sumą ciepła zewnętrznego przepływającego pomiędzy układem a otoczeniem i ciepła wewnętrznego, które jest efektem dyssypacji energii. Ilość ciepła opisuje relacja

$$\delta Q_c = \delta Q_\pi + \delta Q_f \quad (21)$$

δQ_c – elementarna ilość ciepła całkowitego,

δQ_π – elementarna ilość ciepła przemiany π (ciepło zewnętrzne),

δQ_f – elementarna ilość ciepła tarcia (ciepło wewnętrzne przemiany).

Ilość ciepła zewnętrznego przepływającego pomiędzy układem a otoczeniem zależy od sposobu realizacji procesu, wielkości układu (ilości czynnika termodynamicznego) oraz bodźca wywołującego przepływ ciepła, czyli różnicy temperatur.

Ciepło wewnętrzne wynikające z rozproszenia energii jest efektem zamiany pracy tarcia na ciepło. Związek ten jest określony równaniem (16).

Dla skończonego procesu określonego przez stan początkowy i końcowy układu równanie określające ilość ciepła ma postać

$$Q_{c1-2} = Q_{\pi1-2} + Q_{f1-2} \quad (22)$$

W procesach odwracalnych, w których nie ma dyssypacji energii całkowita ilość ciepła jest równa ciepłu przemiany. Jeżeli $Q_{f1-2} = 0$ to $Q_{c1-2} = Q_{\pi1-2}$.

Całkowita ilość ciepła Q_{c1-2} może być określona na podstawie zdolności kumulacyjnych czynnika termodynamicznego i przyrostu jego temperatury.

$$Q_{c1-2} = M \int_1^2 c_\pi dT \quad (23)$$

M – masa czynnika termodynamicznego,

c_π – ciepło właściwe przy stałym parametrze stanu π ,

dT – elementarna zmiana temperatury.

Przy założeniu, że ciepło właściwe nie zależy od temperatury równanie (23) zapisujemy w postaci:

$$Q_{c1-2} = Mc_\pi (T_2 - T_1) \quad (24)$$

T_1, T_2 – temperatura bezwzględna w stanie początkowym i końcowym.

4. I Zasada Termodynamiki

Zasada zachowania energii zastosowana do procesów zmiany stanu czynnika termodynamicznego w układzie wydzielonym z otoczenia osłoną bilansową nazywana jest pierwszą zasadą termodynamiki. Pierwsza zasada termodynamiki może być sformułowana następująco:

Nie istnieje perpetuum mobile pierwszego rodzaju, to znaczy nie jest możliwe skonstruowanie silnika pracującego w sposób ciągły bez dostarczania do niego energii z zewnątrz.

Pierwsza zasada termodynamiki w matematycznej formule jest zapisywana w dwóch postaciach. Pierwsza postać ma interpretację fizyczną w układach zamkniętych, drugą postać I ZT wykorzystuje się przy analizie otwartych układów termodynamicznych.

Przy formułowaniu zapisu pierwszej zasady termodynamiki zakładamy, że układ termodynamiczny jest w stanie spoczynku oraz, że jego położenie nie ulega zmianie. Założenia te prowadzą do braku zmian energii kinetycznej i potencjalnej układu.

4.1. I zasada termodynamiki dla układu zamkniętego

Jeżeli układ termodynamiczny jest zamknięty, to nie ma przepływu substancji pomiędzy układem a otoczeniem. Zmiana stanu energetycznego może się dokonać tylko przez oddziaływania energetyczne. Oddziaływanie energetyczne pomiędzy układem a otoczeniem może być w postaci pracy i ciepła. Przy założeniu braku zmian energii kinetycznej i potencjalnej układu, oddziaływania w postaci pracy i ciepła powodują zmianę energii układu, która jest równa zmianie energii wewnętrznej. Równanie (5) bilansu energii, przy tych założeniach, ma postać.

$$Q_{c1-2} = \Delta U_{1-2} + L_{c1-2} \quad (25)$$

Q_{c1-2} – całkowita ilość ciepła w procesie,
 ΔU_{1-2} – zmiana energii wewnętrznej układu,
 L_{c1-2} – całkowita ilość pracy bezwzględnej w procesie.

Dla elementarnego procesu pierwszą postać I zasady termodynamiki przedstawia wzór:

$$\delta Q_c = dU + \delta L_c \quad (26)$$

δQ_c – elementarna ilość ciepła,
 dU – nieskończenie mała zmiana energii wewnętrznej układu,
 δL_c – elementarna ilość pracy bezwzględnej.

Jeżeli w analizowanym procesie nie występuje dyssypacja energii, to ciepło i praca zależą od rodzaju przemiany. Równanie pierwszej zasady termodynamiki można wtedy zapisać następująco:

$$Q_{\pi 1-2} = \Delta U_{1-2} + L_{\pi 1-2} \quad (27)$$

$Q_{\pi 1-2}$ – ilość ciepła w przemianie π ,
 $L_{\pi 1-2}$ – ilość pracy bezwzględnej w przemianie π .

Wielkości występujące w równaniach można odnieść do jednostkowej ilości substancji.

$$q_{\pi 1-2} = \Delta u_{1-2} + l_{\pi 1-2} \quad (28)$$

$q_{\pi 1-2}$ – jednostkowa ilość ciepła w przemianie π ,
 $l_{\pi 1-2}$ – jednostkowa ilość pracy bezwzględnej w przemianie π ,
 Δu_{1-2} – jednostkowa zmiana energii wewnętrznej układu.

Dla procesu elementarnego zapisujemy

$$\delta q_{\pi} = du + \delta l_{\pi} \quad (29)$$

Jeżeli w równaniu (29) praca bezwzględna (praca zmiany objętości) zostanie zapisana za pomocą wzoru (12) to I zasadę termodynamiki wyraża równanie

$$\delta q_{\pi} = du + p dv \quad (30)$$

δq_{π} – elementarna jednostkowa ilość ciepła w przemianie π ,

du – elementarna jednostkowa zmiana energii wewnętrznej,

p – ciśnienie bezwzględne w układzie ($p = p(v)$),

dv – elementarna zmiana objętości właściwej.

4.2. I zasada termodynamiki dla układu otwartego

Jeżeli układ termodynamiczny jest otwarty, to występuje przepływ substancji pomiędzy układem a otoczeniem. Zmiana stanu energetycznego może się dokonać przez oddziaływania energetyczne i przepływ substancji. Oddziaływanie energetyczne pomiędzy układem a otoczeniem może być w postaci pracy i ciepła. Przy założeniu braku zmian energii kinetycznej i potencjalnej układu, oddziaływania w postaci pracy i ciepła powodują zmianę energii układu, która jest równa zmianie entalpii czynnika termodynamicznego w układzie otwartym. Praca w układzie otwartym jest opisana zależnością (18), czyli jest to praca techniczna. Równanie (5) bilansu energii przy tych założeniach ma postać.

$$Q_{c1-2} = \Delta I_{1-2} + L_{tc1-2} \quad (31)$$

Q_{c1-2} – całkowita ilość ciepła w procesie,

ΔI_{1-2} – zmiana entalpii układu,

L_{tc1-2} – całkowita ilość pracy technicznej w procesie.

Dla elementarnego procesu drugą postać I zasady termodynamiki przedstawia wzór:

$$\delta Q_c = dI + \delta L_{tc} \quad (32)$$

δQ_c – elementarna ilość ciepła,

dI – nieskończenie mała zmiana entalpii układu,

δL_{tc} – elementarna ilość pracy technicznej.

Jeżeli w analizowanym procesie nie występuje dyssypacja energii, to ciepło i praca techniczna zależą od rodzaju przemiany. Drugą postać równania pierwszej zasady termodynamiki można wtedy zapisać następująco:

$$Q_{\pi 1-2} = \Delta I_{1-2} + L_{t\pi 1-2} \quad (33)$$

$Q_{\pi 1-2}$ – ilość ciepła w przemianie π ,

$L_{t\pi 1-2}$ – ilość pracy technicznej w przemianie π .

Wielkości występujące w równaniach można odnieść do jednostkowej ilości substancji.

$$q_{\pi 1-2} = \Delta i_{1-2} + l_{t\pi 1-2} \quad (34)$$

$q_{\pi 1-2}$ – jednostkowa ilość ciepła w przemianie π ,
 $l_{t\pi 1-2}$ – jednostkowa ilość pracy technicznej w przemianie π ,
 Δi_{1-2} – jednostkowa zmiana entalpii układu.

Dla procesu elementarnego zapisujemy drugą postać I ZT

$$\delta q_{\pi} = di + \delta l_{t\pi} \quad (35)$$

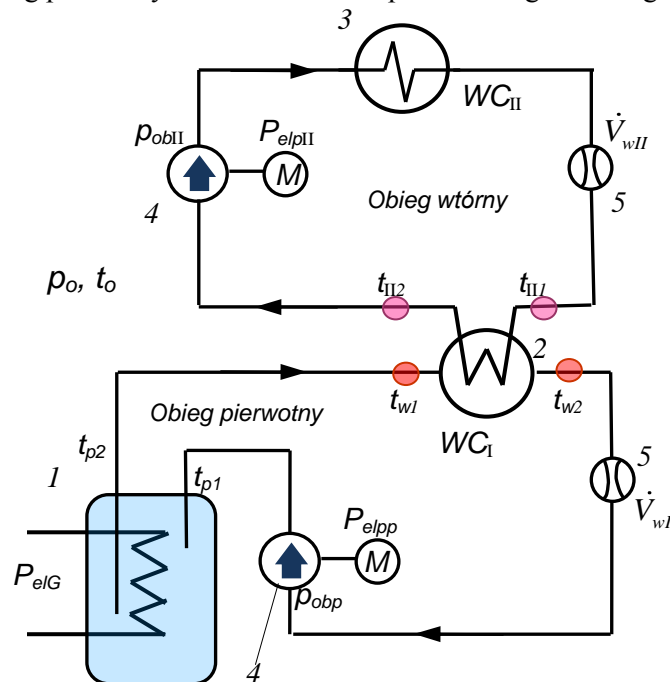
Jeżeli w równaniu (35) praca techniczna zostanie zapisana za pomocą wzoru (18), to I zasadę termodynamiki wyraża równanie

$$\delta q_{\pi} = di - vdp \quad (36)$$

δq_{π} – elementarna jednostkowa ilość ciepła w przemianie π ,
 di – elementarna jednostkowa zmiana entalpii,
 v – objętość właściwa czynnika ($v = v(p)$),
 dp – elementarna zmiana ciśnienia bezwzględnego.

5. Stanowisko pomiarowe Pomiary

Stanowisko pomiarowe, (na którym będą wykonane pomiary do ćwiczenia) to prosty model układu grzewczego. Schemat stanowiska jest pokazany na rysunku 5. W układzie są dwa obiegi: pierwotny i wtórny. Obieg pierwotny stanowi źródło ciepła dla obiegu wtórnego.



Rys. 5. Schemat stanowiska pomiarowego do analizy I zasady termodynamiki

1 – elektryczny podgrzewacz wody, 2 – płytowy wymiennik ciepła woda – woda WC_I , 3 – wymiennik ciepła woda – powietrze WC_{II} , 4 – zespół pompy obiegowej, 5 – przepływomierz, P_{elG} – moc elektryczna grzałki, P_{elp} – moc elektryczna pompy obiegowej, \dot{V} – strumień objętości wody, t_{p1} , t_{p2} – temperatura na wejściu i wyjściu podgrzewacza wody, t_{w1} , t_{w2} – temperatura wody na wejściu i wyjściu wymiennika WC_I w obiegu pierwotnym, t_{II1} , t_{II2} – temperatura wody na wejściu i wyjściu wymiennika WC_I w obiegu wtórnym

Podstawowe elementy obiegu pierwotnego to: elektryczny podgrzewacz wody 1, płytowy wymiennik ciepła woda – woda 2, zespół pompy obiegowej (pompa z napędem) 4. W obiegu wtórnym należy wyróżnić: wymiennik ciepła woda – powietrze 3, oraz zespół pompy obiegowej 4 (taka sama pompa jak w obiegu pierwotnym). Płytowy wymiennik ciepła 2 stanowi element łączący oba obiegi. Układ jest wyposażony w czujniki pozwalające na pomiar podstawowych wielkości dla wykonania bilansu energetycznego. Mierzone są następujące parametry:

- Obieg pierwotny I
 - temperatura na wejściu do płytowego wymiennika ciepła – t_{w1} , ($t_{w1} = t_{p2}$)
 - temperatura na wyjściu z płytowego wymiennika ciepła – t_{w2} , ($t_{w2} = t_{p1}$)
 - strumień objętości przepływającej wody – \dot{V}_{wI} ,
 - moc elektryczna doprowadzona do podgrzewacza wody – P_{elG} ,
 - moc elektryczna doprowadzona do napędu pompy w obiegu pierwotnym – P_{elp}
- Obieg wtórny II
 - temperatura na wejściu do płytowego wymiennika ciepła – t_{II} ,
 - temperatura na wyjściu z płytowego wymiennika ciepła – t_{II2} ,
 - strumień objętości przepływającej wody – \dot{V}_{wII} ,

Pompy w obiegach są takie same, zakłada się, że jeżeli pracują na jednakowym biegu, to pobór mocy każdej pompy jest taki sam. Jeżeli pompy pracują na różnych biegach, to pobór mocy jest proporcjonalny do biegu.

Przed przystąpieniem do pomiarów układ powinien być doprowadzony do stanu ustalonego wynikającego z przyjętej nastawy dla podgrzewacza wody. Elektryczny podgrzewacz wody pracuje w sposób cykliczny, częstość cykli nagrzewania zależy od nastawionej temperatury i intensywności pobierania ciepła w płytowym wymienniku ciepła. Zasilanie podgrzewacza wyłącza się po osiągnięciu zadanej temperatury, jeżeli, w wyniku przekazywania ciepła do obiegu wtórnego, temperatura wody powrotnej obniży się do wartości zadanej na termostacie, następuje ponowne włączenie zasilania. W czasie ćwiczenia należy zrealizować pełny cykl nagrzewania i chłodzenia. Rejestrację wartości mierzonych wielkości należy przeprowadzać w przedziałach minutowych ($\Delta\tau = 60$ s lub $\Delta\tau = 30$ s). Czas trwania pomiaru zależy od przyjętych nastaw elektrycznego podgrzewacza wody i wielkości strumienia wody (wybranego biegu pompy) oraz intensywności chłodzenia wymiennika 3 woda – powietrze w obiegu wtórnym (może wynosić kilkanaście minut).

W tabeli 1 są zebrane wielkości, które należy zarejestrować w czasie realizacji pomiarów.

Tabela 1. Wielkości mierzone (wyniki pomiarów)

czas τ	Obieg pierwotny					Obieg wtórny		
	strumień objętości wody \dot{V}_{wI}	temperatura t_{w1}	temperatura t_{w2}	moc grzałki elektrycznej P_{elG}	moc pompy w obiegu pierwotnym P_{elp}	strumień objętości wody \dot{V}_{wII}	temperatura t_{II}	temperatura t_{II2}
min	m ³ /h	°C	°C	W	W	m ³ /h	°C	°C
0								
1								
2								

Uwaga: Zakładamy, że: temperatura wody na wejściu do wymiennika jest równa temperaturze na wyjściu z podgrzewacza $t_{w1} = t_{p2}$; temperatura wody na wyjściu z wymiennika jest równa temperaturze na wejściu do podgrzewacza $t_{w2} = t_{p1}$.

6. Opracowanie wyników pomiarów

Przed przystąpieniem do zestawienia bilansu energetycznego układu należy przygotować wyniki pomiarów tak, aby były zgodne z obowiązującym układem jednostek. Odczytać z tablic parametry wody, które zależą od temperatury: gęstość i ciepło właściwe.

Tabela 2. Parametry pracy układu grzewczego

czas τ	Obieg pierwotny							
	strumień objętości wody \dot{V}_{wI}	temperatura		temperatura		moc grzałki elektrycznej P_{elG}	Strumień masy wody \dot{M}_{wI}	moc pompy obiegowej P_{elpp}
		t_{w1}	T_{w1}	t_{w2}	T_{w2}			
s	m ³ /s	°C	K	°C	K	W	kg/s	W
0								
60								

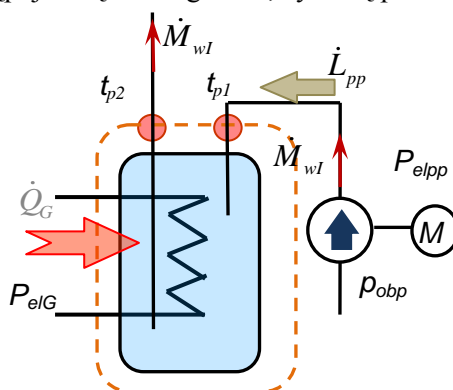
czas τ	Obieg wtórny					Strumień masy wody \dot{M}_{wII}
	strumień objętości wody \dot{V}_{wII}	temperatura		temperatura		
		t_{II1}	T_{II1}	t_{II2}	T_{II2}	
s	m ³ /s	°C	K	°C	K	kg/s
0						
60						
120						

Na podstawie wyników pomiarów należy wykonać wykres zmiany temperatury czynnika termodynamicznego w zależności od czasu $t = t(\Delta\tau)$ dla obiegu pierwotnego i wtórnego.

W układzie grzewczym, na którym są realizowane pomiary, można wyróżnić kilka podukładów, dla których na podstawie pierwszej zasady termodynamiki można zestawić odpowiednie bilanse. Podukład pierwszy, to elektryczny podgrzewacz wody. Podukład drugi to płytowy wymiennik ciepła.

6.1. Elektryczny podgrzewacz wody

Elektryczny podgrzewacz wody jest otwartym układem termodynamicznym (rys. 6). Praca podgrzewacza ma charakter cykliczny. Pierwsza faza pracy to nagrzewanie, czyli kumulowanie energii, doprowadzanej w postaci ciepła, w zbiorniku wody z jednoczesnym przepływem wody i wykonaniem pracy przez pompę obiegową. Po osiągnięciu określonej temperatury zostaje wyłączona grzałka, czyli nie występuje doprowadzanie ciepła. Przepływ wody powoduje obniżenie stanu energetycznego, czego efektem jest obniżenie temperatury. Jeżeli wartość temperatury osiągnie dolną granicę nastawy termostatu następuje włączenie grzałki, cykl się powtarza.



Rys. 6. Elektryczny podgrzewacz wody – otwarty układ termodynamiczny

Równanie bilansowe dla elektrycznego podgrzewacza wody ma postać

$$Q_G + I_{p1} = \Delta U_{1-2} + I_{p2} + L_{pp} \quad (37)$$

Q_G – ilość ciepła doprowadzona do wody za pomocą grzałki elektrycznej,
 I_{p1}, I_{p2} – entalpia wody na wejściu i wyjściu podgrzewacza,
 ΔU_{1-2} – zmiana energii wewnętrznej wody w podgrzewaczu,
 L_{pp} – ilość pracy wykonanej nad wodą przez pompę obiegową.

Wartości wielkości występujących w równaniu (37) należy wyznaczyć na podstawie pomiarów i odpowiednich zależności.

Ilość ciepła doprowadzona do wody przez grzałkę elektryczną Q_G wynika z mocy elektrycznej grzałki i jej czasu pracy.

$$Q_G = \eta_{elG} \cdot P_{elG} \cdot \Delta\tau_G \quad (38)$$

P_{elG} – moc elektryczna grzałki,
 $\Delta\tau_G$ – przedział czasu pracy grzałki,
 η_{elG} – sprawność zamiany energii elektrycznej na ciepło.

W obliczeniach zakładamy, że cała energia elektryczna, doprowadzona do grzałki, zamienia się na ciepło, czyli sprawność elektryczna $\eta_{elG} = 1$.
 Wartość entalpii I_p na wejściu i wyjściu podgrzewacza wody jest określona zależnością.

$$I_p = \dot{M}_{wl} \cdot c_w|_0^t \cdot (t_p - 0) \cdot \Delta\tau \quad (39)$$

\dot{M}_{wl} – masowy strumień wody w obiegu pierwotnym,
 $c_w|_0^t$ – średnie ciepło właściwe wody w przedziale temperatur $0 - t$,
 $\Delta\tau$ – przedział czasu, dla którego zestawiany jest bilans.

Średnie ciepło właściwe wody trzeba odczytać z tabeli Z1.
 Należy wyznaczyć entalpię dla strumienia wody dopływającego i wypływającego.

Ilość pracy doprowadzonej do wody przez pompę obiegową określa równanie.

$$L_{pp} = \eta_{pp} \cdot P_{elpp} \cdot \Delta\tau \quad (40)$$

P_{elpp} – moc elektryczna pompy obiegowej w obiegu pierwotnym,
 η_{pp} – sprawność pompy obiegowej,
 $\Delta\tau$ – przedział czasu, dla którego zestawiany jest bilans.

Sprawność pompy obiegowej należy odczytać z rysunku Z1 dla odpowiedniego strumienia wody.

Z równania (37) wyznaczana jest zmiana energii wewnętrznej wody znajdującej się w podgrzewaczu.

$$\Delta U_{1-2} = Q_G + I_{p1} - I_{p2} - L_{pp} \quad (41)$$

Uwzględniając w równaniu (41) zależności (38 – 40) zapisujemy równanie zmiany energii wewnętrznej wody w podgrzewaczu w postaci.

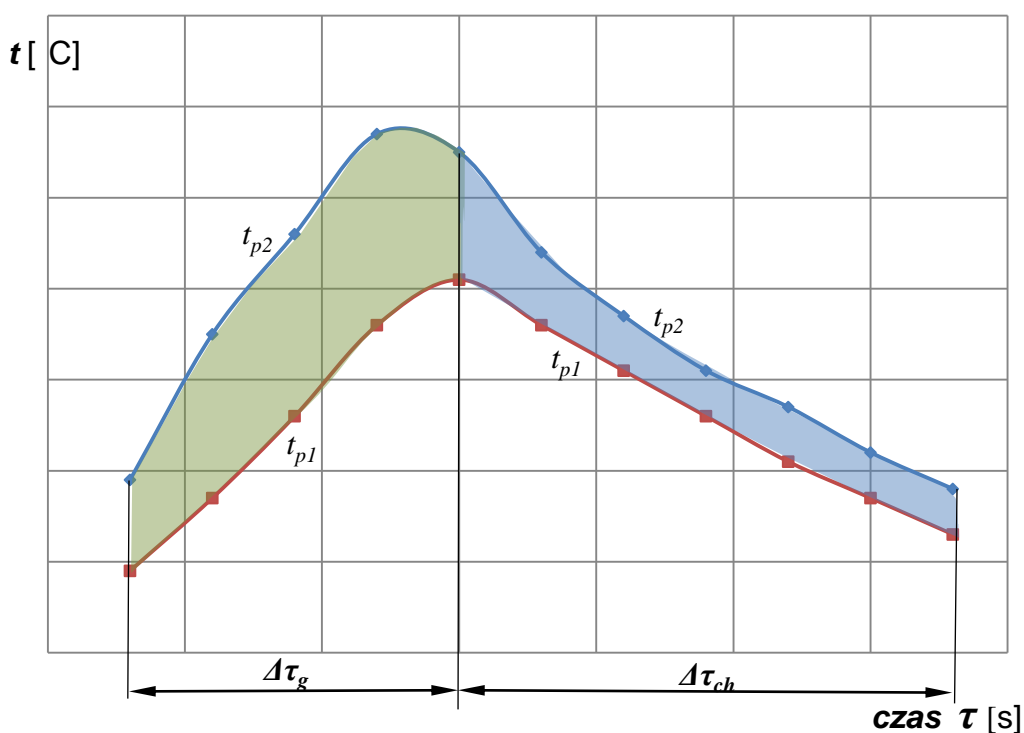
$$\Delta U_{1-2} = P_{elG} \Delta \tau_G + \dot{M}_{wl} c_w \Big|_{t_{p1}}^{t_{p2}} (t_{p1} - t_{p2}) \Delta \tau - \eta_p P_{elpp} \Delta \tau \quad (42)$$

Średnie ciepło właściwe wody w przedziale temperatur $t_2 - t_1$ obliczamy z zależności:

$$c_w \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{c_w \Big|_0^{t_2} t_2 - c_w \Big|_0^{t_1} t_1}{(t_2 - t_1)} \quad (43)$$

Temperatury t_1 i t_2 dla wyznaczenia średniego ciepła właściwego (wzór 43) należy określić, jako średnie arytmetyczne temperatur na dopływie i wypływie z podgrzewacza. Wartość iloczynu różnicy temperatur i czasu $((t_1 - t_2)\Delta\tau)$ należy wyznaczyć, jako różnicę odpowiednich pól na wykresie przebiegu temperatur w zależności od czasu (rys. 7).

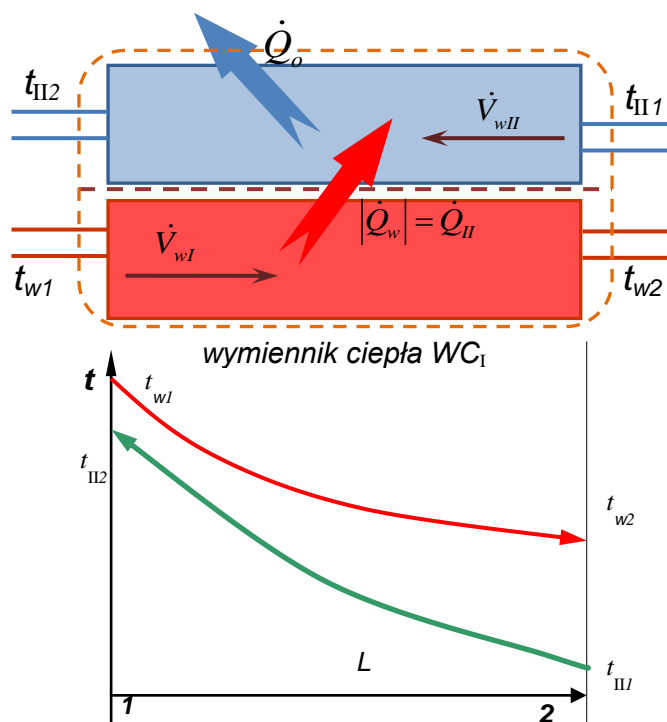
W obliczeniach należy zwrócić uwagę na znak pracy pompy. Praca pompy jest wykonywana nad czynnikiem termodynamicznym – wodą – czyli praca, zgodnie z konwencją znakowania, jest ujemna (do wzoru (42) wstawiamy pracę pompy ze znakiem „minus”).



Rys. 7. Interpretacja graficzna iloczynu różnicy temperatur i czasu pomiaru $(t_{p1} - t_{p2})\Delta\tau$
 $\Delta\tau_g$ – przedział czasu pracy grzałki elektrycznej, $\Delta\tau_{ch}$ – przedział czasu chłodzenia
 (wartość iloczynu $(t_{p1} - t_{p2})\Delta\tau$ jest mniejsza od zera, temperatura wody wypływającej z podgrzewacza (t_{p2}) jest wyższa niż wody dopływającej (t_{p1}); odpowiedniej powierzchni przypisujemy znak „minus”)

6.2. Płytkowy wymiennik ciepła woda – woda

Płytkowy wymiennik ciepła woda – woda (rys. 8) jest otwartym układem termodynamicznym. Jest to wymiennik o przeciwnieprądowym przepływie czynników.



Rys. 8. Płytkowy wymiennik ciepła woda – woda – otwarty układ termodynamiczny. Rozkład temperatur w wymienniku

Dla uproszczenia obliczeń przyjmujemy założenie, że układ pracuje w stanie ustalonym. Oznacza to, że wartości parametrów w układzie nie zależą od czasu. Temperatury zmieniają się wzdłuż drogi przepływu, strumień masy czynników nie ulegają zmianie. Zakładamy również, że ciśnienie w układzie jest stałe. Pierwszą zasadę termodynamiki zapisujemy w drugiej postaci, dla układu otwartego (33).

$$Q_{\pi 1-2} = \Delta I_{1-2} + L_{t\pi 1-2}$$

Układ nie oddziałuje z otoczeniem za pomocą pracy, $L_{t\pi 1-2} = 0$. Ilość ciepła przepływająca pomiędzy układem a otoczeniem odpowiada zmianie entalpii czynników. Równanie I zasady termodynamiki dla wody po stronie pierwotnej (czynnik gorący) ma postać

$$\dot{Q}_{w1-2} = \Delta \dot{I}_{w1-2} = \dot{I}_{w2} - \dot{I}_{w1}, \quad L_{tw1-2} = 0 \quad (44)$$

gdzie

$$\dot{I}_{w1} = \dot{M}_{wI} c_w \Big|_0^{t_{w1}} (t_{w1} - 0) \quad \text{i} \quad \dot{I}_{w2} = \dot{M}_{wI} c_w \Big|_0^{t_{w2}} (t_{w2} - 0) \quad (45)$$

$\dot{I}_{w1}, \dot{I}_{w2}$ – strumień entalpii wody w obiegu pierwotnym w przekroju początkowym i końcowym wymiennika,

\dot{M}_{wI} – masowy strumień wody w obiegu pierwotnym,

$c_w \Big|_0^t$ – średnie ciepło właściwe wody w przedziale temperatur $0 - t$,

Uwzględniając równania (45) w (44) otrzymujemy zależność na strumień ciepła oddawany przez strumień I wody w obiegu pierwotnym.

$$\dot{Q}_{w1-2} = \dot{M}_{wI} c_w \Big|_{t_{w2}}^{t_{w1}} (t_{w2} - t_{w1}) \quad (46)$$

Do obiegu wtórnego doprowadzany jest strumień ciepła \dot{Q}_{II1-2} , którego źródłem jest obieg pierwotny. Wartość strumienia ciepła \dot{Q}_{II1-2} jest równa wartości bezwzględnej strumienia oddawanego przez wodę w obiegu pierwotnym $\dot{Q}_{II1-2} = |\dot{Q}_{w1-2}|$. Strumień ciepła doprowadzony do obiegu wtórnego jest przekazany do wody w tym obiegu \dot{Q}_{wII1-2} oraz przepływa do otoczenia \dot{Q}_o . W obiegu wtórnym wymiennika ciepła czynnik nie wykonuje pracy. Pierwsza zasada termodynamiki ma postać.

$$\dot{Q}_{II1-2} = \dot{Q}_{wII1-2} + \dot{Q}_o = \Delta \dot{I}_{wII1-2} + \dot{Q}_o = \dot{I}_{wII2} - \dot{I}_{wII1} + \dot{Q}_o, \quad L_{II1-2} = 0 \quad (47)$$

gdzie

$$\dot{I}_{wII1} = \dot{M}_{wII} c_w \Big|_0^{t_{II1}} (t_{II1} - 0) \quad \text{i} \quad \dot{I}_{wII2} = \dot{M}_{wII} c_w \Big|_0^{t_{II2}} (t_{II2} - 0) \quad (48)$$

Zmiana strumienia entalpii $\Delta \dot{I}_{wII1-2}$ wynosi

$$\Delta \dot{I}_{wII1-2} = \dot{M}_{wII} c_w \Big|_{t_{II1}}^{t_{II2}} (t_{II2} - t_{II1}) \quad (48a)$$

$\dot{I}_{wII1}, \dot{I}_{wII2}$ – strumienie entalpii wody w obiegu wtórnym w przekroju początkowym i końcowym wymiennika,

\dot{M}_{wII} – masowy strumień wody w obiegu wtórnym,

\dot{Q}_o – strumień ciepła przepływający między wymiennikiem a otoczeniem.

Po uwzględnieniu równań (48a) w równaniu (47) wyznacza się strumień ciepła przepływający między wymiennikiem a otoczeniem.

$$\dot{Q}_o = \dot{Q}_{II1-2} - \Delta \dot{I}_{wII1-2} \quad \dot{Q}_o = \dot{Q}_{II1-2} - \dot{M}_{wII} c_w \Big|_{t_{II1}}^{t_{II2}} (t_{II2} - t_{II1}) \quad (49)$$

W równaniu (49) należy uwzględnić warunek $\dot{Q}_{II1-2} = |\dot{Q}_{w1-2}|$.

Średnie ciepło właściwe w przedziale temperatur $t_1 - t_2$ we wzorach (46) i (49) należy wyznaczyć korzystając z zależności (43) i odczytując odpowiednie wartości średniego ciepła właściwego w przedziałach $0 - t$ z tabeli Z2.

W wymienniku płytowym przekazywanie energii pomiędzy czynnikami odbywa się przez przenikanie ciepła przez przegrodę rozdzielającą czynniki. Przenikanie ciepła to złożony proces, który składa się z przejmowania ciepła przez ściankę od czynnika gorącego, następnie przewodzenie ciepła w przegrodzie i przejmowanie ciepła od ścianki przez czynnik zimny. Proces przenikania opisuje równanie Pecleta

$$\dot{Q} = kA\Delta T_m \quad (50)$$

\dot{Q} – strumień ciepła przepływający w wymienniku (moc cieplna wymiennika),

k – współczynnik przenikania ciepła,

A – powierzchnia wymiany ciepła,

ΔT_m – średnia logarytmiczna różnica temperatur w wymienniku.

Dla wymiennika przeciwprądowego średnia logarytmiczna różnica temperatur jest opisana zależnością:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad \Delta T_1 = T_{w1} - T_{II2} \quad \Delta T_2 = T_{w2} - T_{II1} \quad (51)$$

Oznaczenia we wzorze (51) odpowiadają oznaczeniom na rysunku 8.

Wykorzystując wzór (50) i przyjmując, że moc cieplna wymiennika jest równa strumieniowi ciepła oddawanemu przez wodę w obiegu pierwotnym $\dot{Q} = |\dot{Q}_{w1-2}|$, można wyznaczyć współczynnik przenikania ciepła k w płytowym wymienniku ciepła.

$$k = \frac{|\dot{Q}_{w1-2}|}{A \Delta T_m} \quad (52)$$

Powierzchnia wymiany ciepła w płytowym wymienniku ciepła wynosi $A = 0,114 \text{ m}^2$.

Znając wartości strumienia ciepła oddawanego w obiegu pierwotnym i strumienia ciepła przejętego w obiegu wtórnym przez wodę można określić współczynnik sprawności wymiennika ciepła.

$$\eta_{wci} = \frac{\Delta \dot{I}_{wII1-2}}{|\dot{Q}_{w1-2}|} \quad (53)$$

7. Sprawozdanie

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno zawierać:

1. Cel ćwiczenia,
2. Schemat stanowiska,
3. Tabelę wyników pomiaru,
4. Tabelę przeliczenia wyników pomiaru na obowiązujący układ jednostek,
5. Wykres przebiegu temperatur w funkcji czasu $t = f(\Delta\tau)$.
6. Bilans elektrycznego podgrzewacza wody wykonany według punktu 6.1,
7. Bilans płytowego wymiennika ciepła wykonany według punktu 6.2,
8. Wnioski.

Zagadnienia do opracowania

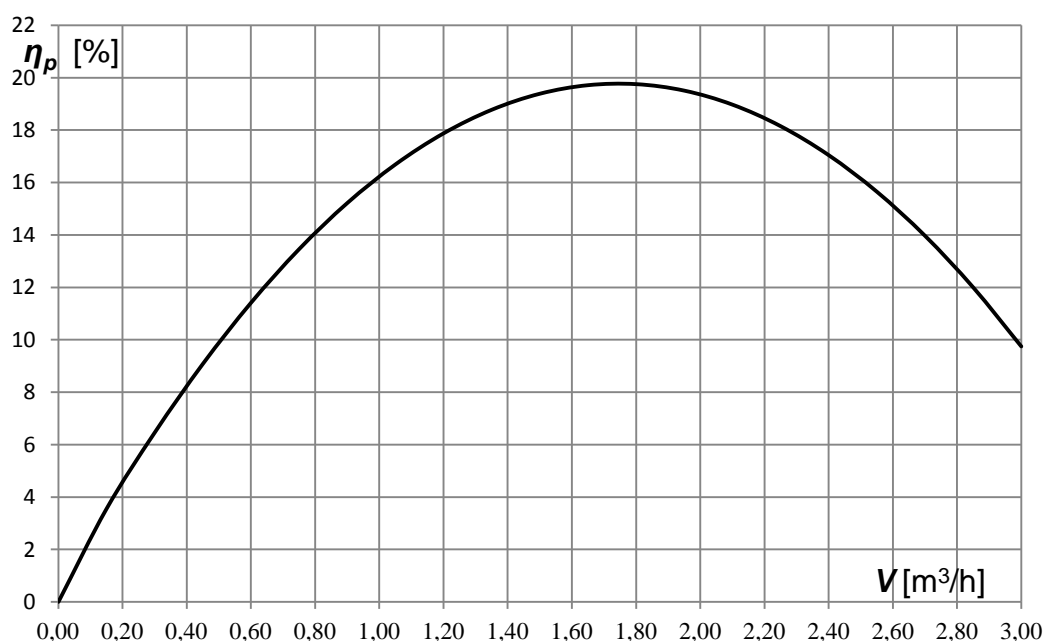
1. Oddziaływanie układu termodynamicznego z otoczeniem; zasada zachowania ilości substancji, zasada zachowania energii.
2. Energia układu, energia wewnętrzna, entalpia.
3. Praca (praca bezwzględna, użyteczna, techniczna), ciepło.
4. I zasada termodynamiki dla układu zamkniętego.
5. I zasada termodynamiki dla układu otwartego.

Literatura:

1. Szewczyk W., Wojciechowski J.: Wykłady z termodynamiki z przykładami zadań. Uczelniane Wydawnictwo Naukowo – Dydaktyczne AGH, Kraków 2007.
2. Szargut J. Termodynamika. PWN, Warszawa 2016.
3. Wiśniewski S.: termodynamika techniczna WNT, Warszawa 2017.

Materiały pomocnicze do ćwiczenia

1. Charakterystyka sprawnościowa pompy obiegowej



Rys. Z1. Sprawność pompy obiegowej w zależności od wydajności

2. Właściwości wody

Tabela Z1. Gęstość wody w zależności od temperatury

t °C	Gęstość ρ kg/m ³	t °C	Gęstość ρ kg/m ³	t °C	Gęstość ρ kg/m ³	t °C	Gęstość ρ kg/m ³	t °C	Gęstość ρ kg/m ³
-10	998,15	6	999,97	22	997,8	38	992,99	54	986,21
-9	998,43	7	999,93	23	997,56	39	992,63	55	985,73
-8	998,69	8	999,88	24	997,32	40	992,24	60	983,24
-7	998,92	9	999,81	25	997,07	41	991,86	65	980,59
-6	999,12	10	999,73	26	996,81	42	991,47	70	977,81
-5	999,3	11	999,63	27	996,54	43	991,07	75	974,89
-4	999,45	12	999,52	28	996,26	44	990,66	80	971,83
-3	999,58	13	999,4	29	995,97	45	990,25	85	968,65
-2	999,7	14	999,27	30	995,67	46	989,82	90	965,34
-1	999,79	15	999,13	31	995,37	47	989,4	95	961,92
0	999,87	16	998,97	32	995,05	48	988,96	100	958,38
1	999,93	17	998,8	33	994,73	49	988,52	110	951,0
2	999,97	18	998,62	34	994,4	50	988,07	120	943,4
3	999,99	19	998,43	35	994,06	51	987,61	130	935,2
4	1000	20	998,23	36	993,71	52	987,15	140	926,4
5	999,99	21	998,02	37	993,36	53	986,69	150	917,3

Tabela Z2. Średnie ciepło właściwe wody w przedziale temperatur 0 – t

Temperatura <i>t</i>	Ciepło właściwe <i>c</i>	Temperatura <i>t</i>	Ciepło właściwe <i>c</i>	Temperatura <i>t</i>	Ciepło właściwe <i>c</i>
°C	<i>kJ/kgK</i>	°C	<i>kJ/kgK</i>	°C	<i>kJ/kgK</i>
11	4,1893	26	4,1776	41	4,1776
12	4,1881	27	4,1772	42	4,1780
13	4,1872	28	4,1768	43	4,1784
14	4,1860	29	4,1763	44	4,1788
15	4,1851	30	4,1763	45	4,1797
16	4,1839	31	4,1763	46	4,1801
17	4,1830	32	4,1759	47	4,1809
18	4,1822	33	4,1759	48	4,1818
19	4,1814	34	4,1759	49	4,1826
20	4,1809	35	4,1759	50	4,1835
21	4,1801	36	4,1763	60	4,1910
22	4,1793	37	4,1763	70	4,1950
23	4,1788	38	4,1768	80	4,1990
24	4,1784	39	4,1768	90	4,2075
25	4,1780	40	4,1772	100	4,2160