



POLSKA AKADEMIA NAUK
Instytut Badań Systemowych

ENERGIA, ŚRODOWISKO | EKONOMIA

Wiesław Ciechanowicz

Warszawa 1995



**ENERGIA, ŚRODOWISKO
I
EKONOMIA**

Wiesław Ciechanowicz

Warszawa 1995

Opiniodawcy: Prof. dr hab. inż. Jan Łach
Prof. dr hab. inż. Jan Madejski
Członek rzeczywisty PAN

Wydano z wykorzystaniem dotacji
KOMITETU BADAŃ NAUKOWYCH



~~Bibl. polska~~

43297

Wykonano z oryginałów tekstowych dostarczonych przez autora

© Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa 1995

ISBN 83-85847-06-5

Mojemu wychowawcy

Janowi Semce – bojującemu o polskość Ziemi
Sztumskiej w czasie plebiscytu, Żołnierzowi Armii Krajowej,
a następnie więźnowi politycznemu PRL.

Wstęp

Celem niniejszej monografii jest omówienie zbioru źródeł energii i zbioru technologii jej użytkowania z punktu widzenia możliwości rozwoju sektorów konsumentów i producentów energii. Kładzie się przy tym nacisk na problematykę ochrony środowiska, a także warunki ekonomiczne wprowadzenia tych technologii i źródeł energii do gospodarki narodowej.

Energia jest podstawą rozwoju społeczeństwa. Poziom jej konsumpcji w dużym stopniu świadczy o postępie w rozwoju sił wytwórczych społeczeństwa, a także o postępie technologicznym. Okres lat 1950-70 charakteryzował się szybkim wzrostem konsumpcji energii. Jeżeli podczas całego okresu rozwoju cywilizacji, ludzkość zużytkowała energię w ilości równoważnej ponad 250 mld ton węgla, to 2/3 tej ilości przypada na lata po drugiej wojnie światowej. W 1985 roku łączne zużycie paliw kopalnych, a więc: węgla, ropy i gazu, stanowiło - w przeliczeniu na węgiel - około 11 miliardów ton. Przewiduje się, że zapotrzebowanie na energię może osiągnąć w przeliczeniu na węgiel: 13-15 mld ton w 2000 roku i 40-80 mld ton rocznie przy końcu XXI wieku. W sprostaniu przewidywanemu wzrostowi zapotrzebowania na energię w okresie następnych 30-50 lat znaczny udział będą zapewne miały paliwa kopalne. Znaczący udział może mieć także energia jądrowa, ale pod warunkiem, że będzie akceptowana przez społeczeństwo. Można oczekiwać, że będzie również wzrastał udział takich źródeł odnawialnych, jak energia: słoneczna, biomasy i wiatru.

Obok problemu energii powstaje i narasta problem środowiska naturalnego. W szerokim sensie jest on rozumiany jako związane z użytkowaniem energii, bezpośrednio lokalne oddziaływanie na zdrowie ludzkie, a to poprzez wpływ kwaśnych deszczów, oraz wpływ na biosferę i zmianę klimatu planety w wyniku narastania efektu cieplarnianego, powodowanego emisją dwutlenku węgla do atmosfery.

Z każdym rokiem stają się coraz bardziej zauważalne zagrożenia destrukcji bilansów ekologicznych tak w sensie globalnym jak i lokalnym. Przyczyna takiej sytuacji tkwi we wzrastającym zużyciu energii i strukturze zużycia jej nośników. Powstaje więc pytanie: **Co należy zrobić dziś, ażeby zachować naturę w przyszłości?** Rozwiązania problemu należy poszukiwać między innymi poprzez opracowywanie odpowiednich technologii użytkowania energii i wykorzystywania jej odnawialnych źródeł. Wymagać to jednak będzie niemałych nakładów finansowych. Powstaje więc obok problemu energii i środowiska problem ekonomii. Te trzy wzajemnie powiązane problemy mogą być rozwiązywane z punktu widzenia rozwoju gospodarki narodowej za pomocą badań systemowych, na podstawie których będzie możliwe:

1. *oszacowanie konsekwencji rozwoju sektorów konsumentów i producentów energii dla określonych scenariuszy rozwoju tych sektorów,*
2. *zweryfikowanie czy gospodarka narodowa będzie w stanie ponieść wyżej wymienione konsekwencje przy założonym scenariuszu rozwoju gospodarki,*
a następnie
3. *w wyniku oceny regionalnego rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego zasugerowanie regionalnej lokalizacji technologii redukcji zanieczyszczeń.*

Wśród szeregu decydentów i pewnej części społeczeństwa panuje konserwatywne przekonanie, iż w warunkach krajowych najkorzystniejsze są dotychczasowe technologie wykorzystywania paliw kopalnych, które są ponadto łatwo akceptowalne. Natomiast kwestia

wykorzystywania energii słonecznej, wiatru czy biomasy jest wciąż traktowana marginesowo, co po części wynika z braku odpowiednich informacji. Jednym z celów niniejszej monografii jest próba przynajmniej częściowego naświetlenia tej tak ważnej problematyki. Rozważane są bowiem zagadnienia: energii, środowiska i ekonomii, które coraz większego znaczenia nabierają w znajdywaniu odpowiedzi na następujące pytanie:

Jakiego rodzaju decyzje winny być podjęte dziś, ażeby zapewnić w przyszłości odpowiednie warunki rozwoju gospodarki narodowej?

Chciałbym wyrazić wdzięczność Panom: Profesorowi Janowi Madejskiemu i Profesorowi Janowi Łachowi – recenzentom niniejszej monografii – za szczegółowe i wnikliwe uwagi.

Dziękuję również moim kolegom z Instytutu Badań Systemowych PAN: dr. Piotrowi Holnickiemu, dr. Leonowi Stomińskiemu i mgr. Zygmuntowi Uhrynowskiemu oraz Panu mgr. Wiktorowi Lisowiczowi za pomoc w redagowaniu pracy.

Wiesław Ciechanowicz

Rozdział 3

Wybrane zagadnienia termodynamiki

W rozdziale podane są podstawowe pojęcia i zasady termodynamiki niezbędne dla zrozumienia istoty poszanowania energii. Poszanowanie energii rozumiane jest w sensie odzyskiwania tej jej części, którą traci się na rzecz otoczenia, w wyniku bardziej efektywnego wykorzystywania energii w procesach termodynamicznych. Omówiono pojęcie układu, systemu, parametrów stanu, pracy, potencjału mechanicznego i energii. Podano pierwszą i drugą zasadę termodynamiki, omówiono podstawowe cykle termodynamiczne i sprawność drugiego rodzaju. W końcowym paragrafie rozdziału podano pojęcie poszanowania energii i rozważono zastosowanie jej do elektrowni węglowych i procesów przemysłowych.

3.1 Uwagi wstępne

Zmniejszenie strat energii na rzecz otoczenia, a tym samym zmniejszenie emisji zanieczyszczeń, można uzyskać dokonując odpowiednich zmian technologicznych, powodujących zmiany w układzie termodynamicznym, a więc na gruncie termodynamiki. Celem niniejszego rozdziału jest przypomnienie wybranych zagadnień termodynamiki, które są konieczne dla zrozumienia istoty zmian w układzie termodynamicznym, prowadzących do lepszego wykorzystania energii pierwotnej.

Pojęcie energii wprowadzono po raz pierwszy do mechaniki klasycznej. Rozwiązywano szereg złożonych problemów posługując się funkcją zwaną *energiją*. Metoda ta była ograniczona do układów zachowawczych, w których występują jedynie siły zachowawcze - zachowujące energię (jakimi są siły potencjalne) - w odróżnieniu od sił rozpraszających energię takich jak siły tarcia lub lepkości. Zastosowanie pojęcia energii do tych wszystkich procesów, w których występują siły zachowawcze i rozpraszające stało się możliwe, gdy poznano prawo zachowania energii. Opracowano je na gruncie termodynamiki i podano jako pierwszą zasadę termodynamiki. Następnym problemem, jaki stanął przed nauką był problem zamiany ciepła na pracę i odwrotnie. Możliwość takiej zamiany nie określa pierwsza zasada termodynamiki. Fakt ten stał się przyczyną odkrycia drugiej zasady termodynamiki, z którą wiąże się pojęcie entropii. Określenie podstawowych pojęć takich jak praca, energia, potencjały termodynamiczne jak również przedstawienie wspomnianych zasad termodynamiki będzie między innymi stanowić treść tego rozdziału. Poprzedzi to podanie pojęcia układu, systemu, parametrów systemu.

3.2 Podstawowe pojęcia i zasady termodynamiki

3.2.1 Pojęcie układu, systemu i parametrów stanu

Układ fizyczny stanowią wyodrębnione z otaczającego nas świata obiekty (ciała fizyczne), którymi się zajmujemy. Otoczenie tego układu stanowią obiekty nie należące do tego układu. Z punktu widzenia termodynamiki fenomenologicznej (dotyczącej zjawisk jako dostępnych poznaniu aspektów rzeczywistości) układem zamkniętym nazywa się taki, który

nie wymienia substancji z otoczeniem. Otwartymi nazywamy układy, które wymieniają substancję z otoczeniem.

Powyższe pojęcia nieco odmiennie definiuje teoria sterowania i cybernetyka techniczna. Układami nazywa się zespoły elementów materialnych wzajemnie na siebie oddziaływujących i wzajemnie warunkujących się, w ramach których występują większe nasilenia oddziaływań wewnętrznych aniżeli na zewnątrz. Związek układu z otoczeniem zachodzi poprzez wejścia i wyjścia układu. Układy nie mające ani jednego wejścia i ani jednego wyjścia nazywa się układami bezwzględnie odosobnionymi.

Przez system rozumie się zespół układów, między którymi istnieje związek przyczynowo-skutkowy. Zadania układów lub elementów systemu oraz ich wzajemne powiązania stanowią organizację systemu. Sposób połączenia układów tworzących system nazywa się strukturą systemu.

Parametrami lub zmiennymi stanu wewnętrznymi lub zewnętrznymi nazywamy wielkości, które określają odpowiednio stan układu lub otoczenia. Funkcje parametrów stanu nazywa się funkcjami stanu. Przejście układu fizycznego z jednego stanu do drugiego określa się mianem procesu. Niezmiernie powolny proces, w trakcie którego układ przechodzi przez kontinuum stanów równowagi, nazywa się procesem quasi-statycznym. Proces cykliczny jest to taki, w którym układ wraca do stanu wyjściowego. Proces nazywamy odwracalnym, jeżeli możliwe jest przywrócenie stanu początkowego układu i otoczenia.

W wielu przypadkach korzystnie jest zastąpić współrzędne prostokątne takimi współrzędnymi, których liczba jest najmniejszą potrzebną do określania stanu układu. Tę najmniejszą liczbę współrzędnych nazywa się *współzrędnymi uogólnionymi*. Odpowiednio do uogólnionych współrzędnych wprowadza się pojęcie *uogólnionych sił* określanych następująco: siłą uogólnioną nazywa się wielkość taką, która pomnożona przez przyrost dq uogólnionej współrzędnej daje wartość pracy wykonywanej przez siły dane na przesunięciu określonym przyrostem dq .

3.2.2 Praca, potencjał mechaniczny, energia

Iloczyn skalarowy

$$dL = \vec{P} \cdot d\vec{s} \quad 3.1$$

nazywamy pracą elementarną siły P na przesunięciu elementarnym ds .

Gdy używamy metody analitycznej i określamy siłę \vec{P} jej składowymi X, Y, Z , a położenie punktu M współzrędnymi x, y, z , to dx, dy, dz oznaczają zarazem składowe przesunięcia $d\vec{s}$ i otrzymamy wyrażenie analityczne pracy elementarnej

$$dL = Xdx + Ydy + Zdz \quad 3.2$$

Przyjmuje się konwencję, że praca pobierana przez układ ma wartość dodatnią, $L > 0$, a praca wykonywana przez układ ma wartość ujemną, $L < 0$ [3.3].

Praca potrzebna na skończoną zmianę stanu układu w procesie quasi-statycznym określona jest całką krzywoliniową

$$\int_c d'L \quad 3.3$$

gdzie c jest drogą w przestrzeni euklidesowej x_1, \dots, x_n , po której przebiega proces. Wartość takiej pracy zależy na ogół od drogi. Pracę odnosi się więc do procesu, a nie do stanu. Oznacza to, że jest funkcją drogi przejścia. Fakt ten, że L nie jest funkcją stanu, a więc dL nie jest różniczką zupełną, której całka krzywoliniowa nie zależy od drogi, jest przyczyną

użycia w rów. 3.2 specjalnego symbolu różniczkowego d' . Ma on przypominać, że $d'L$ jest liniowym wyrażeniem różniczkowym.

Istnieje nader ważny przypadek szczególnych sił określonych polem, których praca na dowolnym torze jest zależna tylko od położenia początkowego i końcowego punktu materialnego, czyli jest niezależna od ruchu, jaki punkt materialny wykonywa pomiędzy danymi dwoma położeniami. Taki przypadek zachodzi, gdy wyrażenie pracy elementarnej (3.20) jest różniczką zupełną dF (jednoznacznej) funkcji współrzędnych $F(x,y,z)$. Wtedy bowiem:

$$L = \int_{M_0}^{M_1} (Xdx + Ydy + Zdz) = \int_{M_0}^{M_1} dF = \int_{x_0, y_0, z_0}^{x_1, y_1, z_1} dF = F(x_1, y_1, z_1) - F(x_0, y_0, z_0) = F_1 - F_0$$

3.4

przy czym $x_0, y_0, z_0, x_1, y_1, z_1$, oznaczają odpowiednio współrzędne punktu początkowego M_0 i końcowego M_1 , a F_0 i F_1 wartość początkową i końcową funkcji F .

Warunkiem koniecznym i wystarczającym, aby wyrażenie różniczkowe dL' sprowadzało się do różniczki zupełnej, jest aby dla każdej pary wskaźników i, k zachodziła równość

$$\frac{\partial X_i}{\partial x_k} = \frac{\partial X_k}{\partial x_i}, \quad (i, k = 1, 2, \dots)$$

3.5

Całka krzywoliniowa z różniczki zupełnej nie zależy od drogi całkowania. Wobec tego, aby scałkować różniczkę zupełną po drodze przebiegającej ze stanu początkowego A do stanu końcowego B , wystarczy znać punkt początkowy i końcowy na drodze całkowania. Ponieważ całka krzywoliniowa różniczki zupełnej dF równa jest różnicy wartości funkcji na końcu i początku drogi, mamy

$$L = - \int_A^B \sum_{i=1}^n X_i \cdot dx_i = - \int_A^B dF = F(A) - F(B)$$

3.6

lub przyjmując $U \equiv -F$

$$L = U(B) - U(A)$$

3.7

Funkcję $U(x_i)$ mającą tę własność, że jej pochodne cząstkowe ujemnie wzięte są składowymi siły w kierunku odpowiednich osi współrzędnych, nazywamy **potencjałem mechanicznym**.

W mechanice, obok pracy, nadzwyczaj ważną rolę gra inna wielkość, zależna od czasu, nazywana **energją kinetyczną**. Określa ją znana zależność

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

3.8

gdzie: m - masa, v - prędkość.

Przyrost elementarny energii kinetycznej równa się pracy elementarnej wszystkich sił działających na punkt materialny

$$d\left(\frac{1}{2}mv^2\right) = \sum_i X_i dx_i$$

3.9

Na drodze od punktu A do B mamy

$$\frac{1}{2}mv_B^2 = \frac{1}{2}mv_A^2 - \int_A^B dL \quad 3.10$$

Równanie to wyraża twierdzenie, które nosi nazwę *zasady energii* albo *zasady pracy*. Jeśli pole sił jest polem potencjalnym, wówczas zgodnie z (3.6) (3.7)

$$-\int_A^B dL = -[U(B) - U(A)] \quad 3.11$$

Po podstawieniu tego wyrażenia do pracy w równaniu (3.10) otrzymujemy

$$\frac{1}{2}mv_B^2 + U(B) = \frac{1}{2}mv_A^2 + U(A) \quad 3.12$$

lub

$$E + U = \text{const} \quad 3.13$$

co wyraża, że *podczas ruchu punktu materialnego w potencjalnym polu sił całkowita energia punktu zachowuje wartość stałą* [3.1].

W dowolnym układzie mechanicznym:

1. jego energia może być wykorzystywana za pomocą pracy. Ponadto
2. dąży on do stanu równowagi, który charakteryzuje się *minimalną wartością energii potencjalnej*.

Układ termodynamiczny zachowuje się nieco odmiennie. Może on być opisywany przez funkcje, które w określonych sytuacjach spełniają warunki 1 i 2, pomimo, że nie reprezentują całkowitej energii układu lub energii potencjalnej. Stanowią one potencjały termodynamiczne. Określa się je posługując się podstawowymi prawami termodynamiki, jakimi są pierwsza i druga zasada termodynamiki.

3.2.3 Pierwsza Zasada Termodynamiki

W termodynamice podobne własności do potencjału mechanicznego ma energia wewnętrzna, określająca stan wewnętrzny ciała. Jest ona funkcją stanu zależną od wszystkich niezależnych zmiennych określających zarówno stan wewnętrzny, jak i położenie układu względem ciał otoczenia. Energię wewnętrzną określa, podobnie jak potencjał mechaniczny, równanie

$$\int_A^B dL = U(B) - U(A) \quad 3.14$$

Równanie to głosi pierwszą zasadę termodynamiki, a mianowicie:

w procesach adiabatycznych, tzn. zachodzących w układach bez wymiany ciepła z otoczeniem, praca sił zewnętrznych nie zależy od drogi przejścia.

Dla dowolnych procesów odwracalnych pierwsza zasada termodynamiki przyjmuje następującą postać różniczkową

$$dU = d'Q + d'L \quad 3.15$$

co oznacza, że *energię wewnętrzną układu można zamienić albo przez wykonywanie pracy L lub przez dostarczanie układowi ciepła Q*. Ciepło jest więc odmiennym od pracy sposobem przekazywania energii. Odnosi się tak jak i praca zawsze do procesu (drogi przejścia), a nigdy do stanu.

Należy podkreślić, że jednoznaczny podział energii wewnętrznej na różne formy nie jest możliwy i samo pojęcie odrębnych form energii, za wyjątkiem energii kinetycznej i potencjalnej, ma charakter przybliżony i umowny. Wszystkie zjawiska zachodzące w makroskopowym ciele są ściśle powiązane i nie dadzą się oddzielić. Jedynie w szczególnych przypadkach, gdy zmiany jednego rodzaju zjawisk przeważają nad innymi, można w przybliżeniu pominąć wzajemną współzależność zjawisk i mówić przy rozważaniu pewnych wąskich klas procesów o odrębnych formach energii np. cieplnej, mechanicznej lub elektrycznej.

3.2.4 Druga Zasada Termodynamiki

Pierwsza zasada termodynamiki określa tylko równowagę pracy i ciepła. Nie mówi kiedy jest możliwa zamiana pracy na ciepło i odwrotnie. O ile pracę można zamienić całkowicie na ciepło, to ciepło nie zawsze może być zamienione na pracę. Jeżeli jest zamienione to nie całkowicie, a tylko częściowo.

Prawo zamiany ciepła na pracę sformułowano w postaci *drugiej zasady termodynamiki*, która głosi:

aby ciepło zamienić na pracę, muszą istnieć dwa źródła ciepła o różnych temperaturach. Ciepło odbierane przez ciało pośredniczące (gaz lub parę) ze źródła, o temperaturze wyższej (grzejnicy), częściowo tylko zamienia się na pracę. Resztę ciepła ciało pośredniczące musi oddać źródłu o temperaturze niższej (chłodnicy).

Najwyższą sprawność dla danych warunków fizycznych pozwala uzyskać układ pracujący w obiegu odwracalnym ograniczonym dwiema izotermami i dwiema adiabatami, a więc układ Carnota. Sprawność takiego układu określa zależność

$$\eta = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad 3.16$$

gdzie: T_1 - temperatura, przy której doprowadza się ciepło do układu w ilości Q_1 ($Q_1 > 0$), T_2 - temperatura, przy której układ oddaje ciepło w ilości Q_2 ($Q_2 < 0$) do otoczenia.

Z równania (3.16) wynika, że

$$1 + \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad 3.17$$

lub

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0 \quad 3.18$$

Równanie (3.18) może być traktowane jako zapis drugiej zasady termodynamiki w odniesieniu do obiegu Carnota.

Druga zasada termodynamiki dla wszystkich obiegów odwracalnych przyjmuje następującą postać

$$\oint \frac{d'Q}{T} = 0 \quad 3.19$$

przy czym całka

$$\oint \frac{d'Q}{T} \quad 3.20$$

nazywana jest całką Clausiusa.

Przypuśćmy, że wartość całki Clausiusa przy przejściu ze stanu A do C osiąga pewną wartość a , to znaczy

$$\int_{ABC} \frac{d'Q}{T} = a \quad 3.21$$

Przyjmijmy dalej, że przy innym sposobie przejścia ze stanu A do C (poprzez punkt D) całka Clausiusa przyjmuje wartość b

$$\int_{ADC} \frac{d'Q}{T} = b \quad 3.22$$

Obie przemiany tworzą obieg zamknięty odwracalny, dla którego

$$\int_{ABCD} \frac{dQ}{T} = a + b = 0 \quad 3.23$$

lub uwzględniając, że $a - b = 0$ mamy

$$\int_{ABC} \frac{d'Q}{T} = \int_{ADC} \frac{d'Q}{T} \quad 3.24$$

Wynika stąd wniosek, że wartość całki Clausiusa nie zależy od drogi przejścia, a więc jest funkcją stanu. Tę nową funkcję określono mianem *entropii S*, gdzie

$$\int_A^B \frac{d'Q}{T} = S_A - S_B \quad \text{lub} \quad \frac{d'Q}{T} = dS \quad 3.25$$

Jak wynika z powyższych rozważań, wartość entropii dla obiegów odwracalnych jest stała. Inaczej jest dla przemian nieodwracalnych. Jeżeli układ pobiera ciepło podczas przemiany od A do B, to

$$S_A - S_B = - \int_A^B \frac{d'Q}{T} \quad 3.26$$

Ponieważ przemiana jest nieodwracalna, pobieranie ciepła i jego oddawanie odbywa się przy skończonej różnicy temperatur ΔT , więc zmiana entropii źródła ciepła podczas tej przemiany jest równa

$$S_{B'} - S_{A'} = - \int_A^B \frac{d'Q}{T + \Delta T} \quad 3.27$$

Dodając stronami te dwa równania otrzymujemy

$$S_B + S_{B'} - S_A - S_{A'} = \int_A^B \frac{d'Q}{T} - \int_A^B \frac{d'Q}{T + \Delta T} \quad 3.28$$

Ponieważ

$$\frac{d'Q}{T} > \frac{d'Q}{T + \Delta T} \quad 3.29$$

wobec tego

$$S_B + S_{B'} > S_A + S_{A'} \quad 3.30$$

co oznacza, że podczas przemiany nieodwracalnej entropia całkowita układu wzrasta.

W przypadku procesów nieodwracalnych druga zasada termodynamiki sprowadza się do następującego prawa:

w procesach nieodwracalnych zachodzących w adiabatycznie osłoniętym układzie entropia układu wzrasta.

3.2.5 Potencjały termodynamiczne

Funkcję stanu, której pochodne cząstkowe ujemnie wzięte są składowymi sił w kierunku odpowiednich osi współrzędnych określonych parametrami stanu nazywa się, analogicznie do potencjału mechanicznego, potencjałem termodynamicznym. Stwierdzono poprzednio, że taką własność dla procesów adiabatycznych posiada energia wewnętrzna. Istnieje szereg innych funkcji stanu posiadających, przy odpowiednich ograniczeniach, własności potencjału termodynamicznego. Do nich należy *energia swobodna, entalpia i entalpia swobodna*. Poniżej określi się warunki, dla których wymienione funkcje stanu posiadają własności potencjału termodynamicznego.

Energia swobodna. Wykorzystując definicję entropii, z której wynika, że $dQ = TdS$, pierwszą zasadę termodynamiki wyraża się wzorem

$$dU = TdS + d'L \quad 3.31$$

Równanie to można zapisać w postaci

$$dU - TdS - SdT = -SdT + d'L \quad 3.32$$

lub

$$dF = d(U - TS) = -SdT + d'L \quad 3.33$$

gdzie

$$F = U - TS \quad 3.34$$

określa się mianem *energii swobodnej*.

Przy $T = \text{const}$.

$$\int_A^B d'L = \int_A^B dF = F(B) - F(A) \quad 3.35$$

co oznacza, że całka z pracy nie zależy od drogi, a praca elementarna wykonywana w izotermicznym (odbywającym się w stałej temperaturze) odwracalnym procesie wyraża się przez różniczkę nowej funkcji stanu F , zwanej energią swobodną. Energia swobodna jest miarą zdolności układu do wykonywania pracy w odwracalnej przemianie izotermicznej.

Entalpia. Korzystając z zależności

$$d(pV) = pdV + Vdp \quad 3.36$$

gdzie p -ciśnienie, V -objętość, pierwszą zasadę termodynamiki można wyrazić zależnością

$$dU = TdS + d'L = -d(pV) + TdS + Vdp + pdV + d'L \quad 3.37$$

względnie

$$dI = d(U + pV) = Vdp + TdS + d'L + pdV = Vdp + TdS + d'L' \quad 3.38$$

Funkcję stanu $I = U + pV$, oznaczaną także symbolem H , nazywa się *entalpią*, a L' spełniającą równanie

$$d'L' = d'L + pdV \quad 3.39$$

określa się mianem **pracy pożytecznej** lub nieobjętościowej L' [3.3], w przeciwieństwie do pracy objętościowej L nazywanej pracą absolutną. Wyrażenie pdV w (3.39) przedstawia pracę w procesach odbywających się pod stałym ciśnieniem, jaką układ wykonuje przeciwko zewnętrznemu ciśnieniu. Pracy tej nie możemy się pozbyć, tak że pracę, którą rzeczywiście dysponujemy, otrzymamy dopiero po odjęciu od całkowitej wykonanej pracy $d'L$ członu objętościowego pdV .

Jeżeli układ poza pracą Vdp wykonuje jedynie pracę rozprężania $-d'L = pdV$ wówczas

$$dI = Vdp + TdS - pdV + pdV = Vdp + TdS \quad 3.40$$

Wyrażenie Vdp nazywa się pracą techniczną, oznaczaną symbolem $d'L_t$.

Z wzoru (3.38) wynika, że entalpia jest potencjałem termodynamicznym dla pracy pożytecznej, gdy przemiana odbywa się na drodze przemiany izobaryczno-adiabaticznej, tzn. dla $p = \text{const}$ i $S = \text{const}$

$$d'L' = dI \quad 3.41$$

Entalpia swobodna. Pracę pożyteczną można wyrazić w postaci

$$d'L' = d'L + pdV = dU - TdS + pdV = d(U + pV - TS) + SdT - Vdp \quad 3.42$$

Funkcję

$$G = U + pV - TS = I - TS \quad 3.43$$

nazywa się *entalpią swobodną* lub funkcją Gibbsa. Funkcja ta spełniająca równanie

$$dG = d'L' - SdT + Vdp \quad 3.44$$

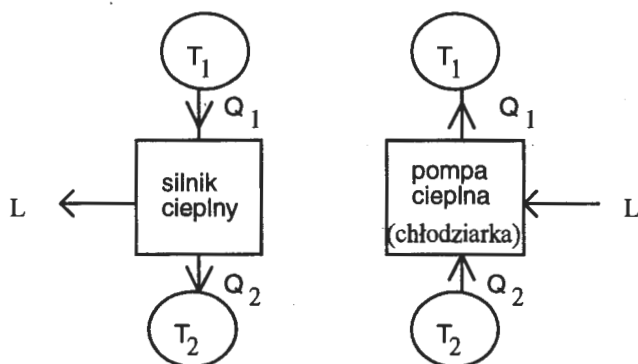
gdzie G jest potencjałem termodynamicznym dla pracy pożytecznej, wykonywanej na drodze przemiany izobaryczno-izotermicznej.

Zmiany stanu czynnika mogą być traktowane jako zachodzące na drodze adiabatycznej (izentropowej), na której nie zachodzi wymiana ciepła pomiędzy czynnikiem i jego otoczeniem, względnie na drodze izotermicznej, podczas której temperatura czynnika pozostaje stała. Jest możliwe przedstawianie zmian w stanie czynnika w postaci graficznej

na wiele sposobów. Klasyczną reprezentacją jest wykres p-V (p-ciśnienie, V-objętość), na którym powierzchnia ma wymiar pracy. Inne często stosowane reprezentacje to wykresy T-S (temperatura - entropia) oraz p-i (ciśnienie - entalpia). Na wykresie T-S powierzchnia ma wymiar ciepła, podczas gdy wykres p-i pozwala odczytać pracę techniczną dla przemiany adiabatycznej w postaci odcinka ΔI .

3.2.6 Obiegi termodynamiczne, silniki i pompy ciepłne

Obieg termodynamiczny jest to taki zespół przemian lub przemiana przebiegająca w układzie zamkniętym, której stan końcowy pokrywa się ze stanem początkowym. Jeżeli wszystkie odcinki przemian tworzących obieg są odwracalne, to cały obieg jest także odwracalny. Jeśli natomiast, co najmniej część jednej przemiany jest nieodwracalna, to i cały obieg jest nieodwracalny. Definicja obiegu odwracalnego i nieodwracalnego jest taka sama jak definicja przemiany odwracalnej i nieodwracalnej, gdyż obieg jest szczególnym przypadkiem przemiany termodynamicznej.



Rys. 3.1 Schematyczne przedstawienie cyklu silnika cieplnego i pompy ciepłej

Stan układu na początku i na końcu obiegu jest taki sam, a więc i energia wewnętrzna układu na początku i na końcu układu jest jednakowa. Zgodnie z pierwszą zasadą termodynamiki dla obiegu obowiązuje więc następująca zależność

$$Q_{ob} = L_{ob} \quad 3.45$$

przy czym Q_{ob} oraz L_{ob} oznaczają ciepło oraz pracę obiegu, to znaczy algebraiczną sumę ciepła i pracy doprowadzanych do układu podczas całego obiegu. Na ostateczną wartość Q_{ob} może się składać ciepło dodatnie, doprowadzane do układu, jak i ciepło ujemne, odprowadzane z układu, zależnie od zmiany stanu układu w czasie wykonywania obiegu. Podobna uwaga jest także słuszna w odniesieniu do pracy obiegu L_{ob} .

W przypadku gdy $L_{ob} > 0$, musi być także $Q_{ob} > 0$, czyli w obiegu wykonywana jest praca kosztem doprowadzanego ciepła, a urządzenie, w którym jest realizowany taki obieg, nosi nazwę *silnika termodynamicznego lub cieplnego*. Jeżeli $L_{ob} < 0$, to również $Q_{ob} < 0$, czyli do obiegu doprowadzana jest praca, z obiegu zaś odprowadza się więcej ciepła, niż ewentualnie się do niego doprowadza. Odpowiednie urządzenie pracujące według takiego obiegu, nazywanego obiegiem wstecznym, nosi nazwę *pompy ciepłej*. Jeśli silnik lub pompa ciepła pracują według obiegu odwracalnego, to są to urządzenia odwracalne, w przeciwnym przypadku silnik lub pompa ciepła są nieodwracalne.

Rys. 3.1 przedstawia schematycznie obiegi silnika i pompy ciepłej. W obiegu pompy ciepła o wartości Q_2 jest pobierane przy temperaturze T_2 i o większej wartości ciepło Q_1

jest oddawane przy wyższej temperaturze T_1 . Odbywa się to kosztem doprowadzanej do obiegu pracy L . Dla idealnego układu, w którym nie występują straty powodowane na przykład tarciem, L reprezentuje całkowitą pracę jaka musi być wykonana. Jest ona równa różnicy Q_1 i Q_2 , a mianowicie

$$L = Q_1 - Q_2 \quad 3.46$$

Dla oceny silnika cieplnego stosuje się wielkość, zwaną sprawnością, zdefiniowanego w następujący sposób

$$\eta = \frac{L_{ob}}{Q_1} \quad 3.47$$

gdzie L_{ob} oznacza pracę obiegu, Q_1 zaś ciepło doprowadzane do obiegu.

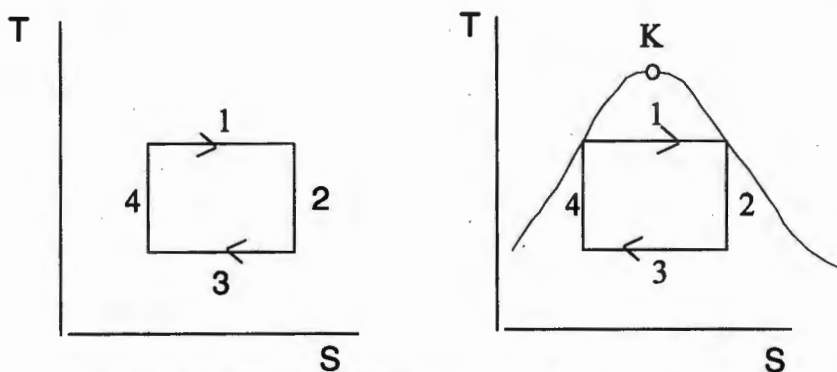
Wielkością charakteryzującą pod względem energetycznym pompę ciepłą jest współczynnik wydajności obiegu, określamy zależnością

$$\varepsilon = \frac{Q_1}{L_{ob}} \quad 3.48$$

który musi być zawsze większy od jedności.

3.2.7 Wybrane obiegi termodynamiczne

Podstawowymi obiegami termodynamicznymi silników cieplnych są obiegi Carnota, Rankine'a i Braytona- Joule'a.



Rys. 3.2 Obieg Carnota dla dowolnego gazu i dwufazowej pary nasyconej w układzie T-S.

Obieg Carnota. Sadi Carnot zaproponował w 1824 roku koncepcję obiegu procesu odwracalnego, który wykorzystywany jest dla porównywania sprawności silników cieplnych. Obiekt ten zilustrowano na wykresie T-S na rys.3.2, dla dowolnego gazu i dla dwufazowej pary nasyconej. Składa się on z czterech następujących procesów.

1. Z dowolnego źródła, ciepło w ilości Q_1 , jest dostarczane do czynnika, który jest rozprężany do objętości V w sposób odwracalny izotermicznie, oddając na zewnątrz pracę L_1 .
2. Na drodze 2 czynnik jest rozprężany odwracalnie do temperatury chłodniejszego zbiornika, będąc izolowanym adiabatycznie od źródła i upustu ciepła. Wykonuje pracę L_2 .

3. Następuje izotermiczne odwracalne sprężanie na drodze 3, w którym układ wykonuje pewną pracę L_3 i oddaje pewną ilość ciepła Q_3 .
4. Na drodze 4 czynnik odwracalnie po adiabacie powraca do stanu wyjściowego, pobierając pracę sprężania w ilości L_4 .

Całkowita praca uzyskana po wykonaniu takiego obiegu równa jest sumie ciepła Q_1 pobranego przez silnik z cieplejszego zbiornika i ciepła Q_2 oddanego zimniejszemu zbiornikowi, co można zapisać

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 = Q_1 + Q_2 \quad 3.49$$

Sprawność teoretyczna obiegu Carnota wyraża stosunek

$$\eta = \frac{L}{Q_1} = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} \quad 3.50$$

Ponieważ obieg Carnota odbywa się odwracalnie, więc entropia całkowita nie ulega zmianie, co zapisujemy

$$\Delta S_c = -\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0 \quad 3.51$$

a więc

$$Q_2 = -Q_1 \frac{T_2}{T_1} \quad 3.52$$

Podstawiając (3.52) do (3.50) znajdujemy

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad 3.53$$

Sprawność η odwracalnego silnika cieplnego pracującego według cyklu Carnota zależy jedynie od stosunku temperatur bezwzględnych obu zbiorników. Wartość η nie zależy od rodzaju użytej w silniku substancji. Obie te ważne własności podał Carnot w 1824 roku, a więc jeszcze przed sformulowaniem obu zasad termodynamiki.

Proces przenoszenia ciepła z ciała zimniejszego do cieplejszego będzie możliwy, jeżeli pobierzemy z zewnątrz pewną pracę i oddamy ją w postaci ciepła ciału o wyższej temperaturze. W ten sposób możemy powiększyć przyrost entropii ciała cieplejszego o tyle, by ΔS_c stało się nieujemne. W rozważanym przypadku dwóch zbiorników o stałych temperaturach otrzymamy

$$\Delta S_c = \frac{Q_2 + L}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} \geq 0 \quad 3.54$$

Cała różnica pomiędzy maszyną chłodniczą i silnikiem cieplnym sprowadza się do zmiany znaków Q_1 i Q_2 , gdzie obecnie

$$Q_1 = -Q_2 - L < 0, \quad Q_2 > 0 \quad 3.55$$

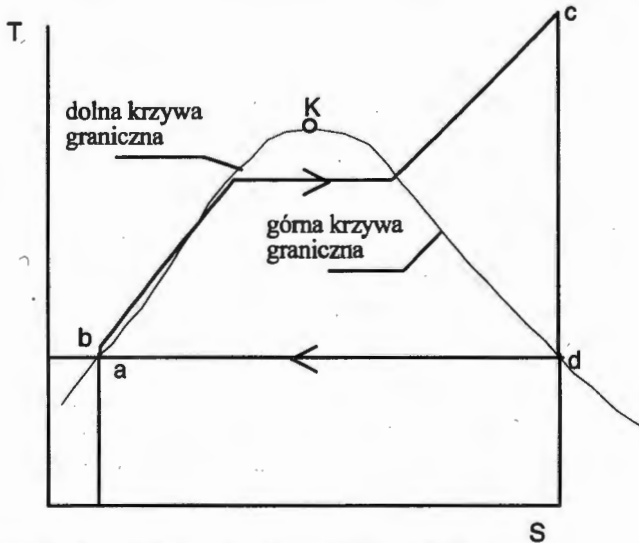
Najprostsza maszyną chłodniczą, w tym pompą ciepłą, będzie maszyna oparta na odwrotnym obiegu Carnota. Składa się on z identycznych odcinków izoterm i adiabat jak w silniku cieplnym, tylko o przebiegach w odwrotnym kierunku. Analogiczny jak dla

sprawności silnika cieplnego otrzymuje się, dla maszyny chłodniczej - pompy ciepłej - pracującej odwracalnie według obiegu Carnota, współczynnik wydajności o następującej postaci

$$\epsilon = \frac{Q_2}{L} = -\frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad 3.56$$

zależny jedynie od stosunku temperatur bezwzględnych obu zbiorników.

Obieg Rankine'a. Jest to obieg dla siłowni parowej, w której występuje turbina parowa. Niestety nie jest praktycznie możliwa realizacja obiegu Carnota w odniesieniu do obiegu turbiny parowej. Wynika to z trudności sprężania mokrej pary wodnej do pary nasyconej przy stałej entropii. Alternatywnym obiegiem, w którym nie występuje powyższa trudność, jest obieg podany dla silnika parowego przez szkockiego fizyka i inżyniera Williama Rankine'a w 1850 roku. Był to obieg otwarty, o ciągłym uzupełnianiu czynnika pracującego, w którym następowało rozprężanie pary do warunków atmosferycznych, a więc 100°C i 1 atmosfery. Zamknięty obieg Rankine'a dla turbiny parowej kondensacyjnej, pokazano na rys. 3.3 na tle krzywej granicznej odpowiadającej stanom cieczy (na lewo od dolnej krzywej granicznej i punktu K), cieczy i pary (wewnątrz obszaru objętego krzywą graniczną) i pary suchej nasyconej (na prawo od górnej krzywej granicznej). Obieg Rankine'a ma następujący przebieg. Woda o parametrach opisanych punktem a zostaje wtłoczona za pomocą pompy wirnikowej do kotła parowego, co przedstawia przemiana izentropowa a-b. Następnie w kotle powstaje para przegrzana w przemianie izentropowej b-c. Para o parametrach odpowiadających punktowi c przepływa do turbiny i rozpręża się w niej izentropowo aż do punktu d. Następnie rozprężona para dopływa do kondensatora-skraplacza, w którym przepływająca woda chłodząca powoduje skroplenie pary izobarycznie d-a.



Rys.3.3 Obieg Rankine'a dla pary wodnej w układzie T-S.

Praca obiegu jest równa różnicy pracy turbiny L_T oraz pracy pompy zasilającej kocioł. Ta ostatnia jest jednak dużo mniejsza od pracy turbiny, gdyż objętość wody jest znacznie

mniejsza od objętości pary przepływającej przez turbinę. Wobec tego pracę pompy można pominąć i założyć, że praca obiegu jest równa pracy turbiny, to znaczy

$$L_T = i_c - i_d \quad 3.57$$

gdzie i - entalpia.

Ciepło doprowadzane do obiegu jest ciepłem przemiany izobarycznej $b-c$, a więc

$$Q = i_c - i_b \quad 3.58$$

Ostatecznie sprawność teoretyczna obiegu Rankine'a jest równa

$$\eta_t = \frac{i_c - i_d}{i_c - i_b} \quad 3.59$$

Obieg Brytona lub Joule'a. Obieg Braytona dotyczy układu termodynamicznego, w którym występuje sprężarka wirnikowa, komora spalania i turbina gazowa. Na rys. 3.4 uwidoczniono schemat układu termodynamicznego otwartego turbiny gazowej i obieg Braytona w układzie T-S. W układzie tym gaz o parametrach odpowiadających punktowi 1 zostaje zassany i sprężony przez sprężarkę według przemiany izentropowej 1-2 do ciśnienia odpowiadającego punktowi 2. Następnie gaz przepływa do komory spalania, w której wtryskiwane paliwo spala się w sposób ciągły pod stałym ciśnieniem według przemiany 2-3. Spaliny uchodzące z komory spalania przepływają przez turbinę i wykonują pracę rozprężając się izentropowo do ciśnienia początkowego. Część tej pracy zostaje użyta do napędu sprężarki, reszta zaś może być odprowadzana na zewnątrz. Rozprężone spaliny uchodzą do atmosfery przy ciśnieniu atmosferycznym, których stan odpowiada punktowi 4. Temperatura i entalpia uchodzących spalin jest wyższa od temperatury i entalpii gazu na wlocie. Wobec tego usuwanie spalin jest równoważne pod względem termodynamicznym przemianie oddawania ciepła. Przemiana ta w rozważanym przypadku jest izobarą 4-1. Praca turbiny w układzie otwartym jest równoważna obiegowi termodynamicznemu 1-2-3-4-1. Ciepło doprowadzane do obiegu i odprowadzane z niego przy stałym ciśnieniu określają zależności

$$\begin{aligned} Q_1 &= i_3 - i_2 = c_p(T_3 - T_2) \\ Q_2 &= i_4 - i_1 = c_p(T_4 - T_1) \end{aligned} \quad 3.60$$

gdzie c_p - ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu. Wobec tego sprawność obiegu określa zależność

$$\eta = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)}{T_2\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)} \quad 3.61$$

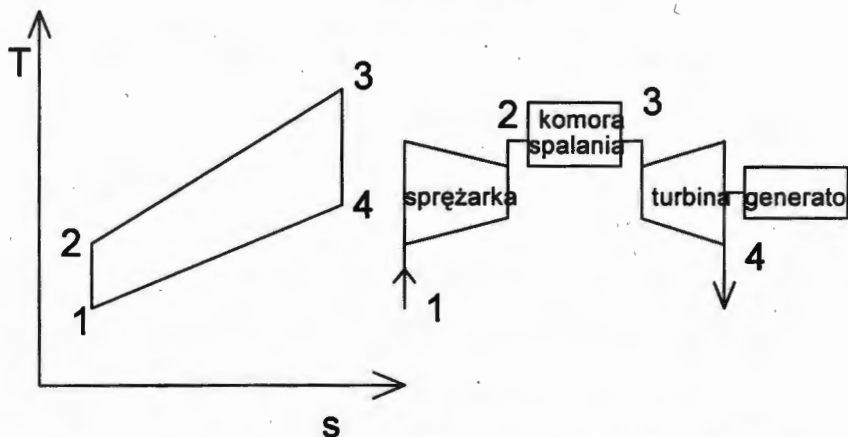
Mając na uwadze, że

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad \text{albo} \quad \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \quad 3.62$$

gdzie: $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$, c_v - ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu, otrzymujemy

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad 3.63$$

Z powyższego wzoru wynika, że sprawność obiegu Braytona jest tym wyższa, im większy jest stosunek ciśnień na końcu i na początku sprężania.



Rys. 3.4 Schemat układu termodynamicznego otwartego turbiny gazowej i odpowiadający jej obieg Braytona w układzie T-S.

3.2.8 Praca maksymalna, sprawność II-go rodzaju.

Przyczyną nieodwracalności procesów termodynamicznych jest dysypacja pracy oraz niequasistatyczność procesów. Zjawiska dysypacyjne to: tarcie, lepkość, histereza lub opór elektryczny. Niezmiernie powolny proces, w którym układ przechodzi przez continuum stanów równowagi, nazywamy *procesem quasistatycznym* [3.3]. Do grupy niequasistatycznych procesów należą spontaniczne reakcje chemiczne, swobodna dyfuzja lub wyrównywanie temperatur w termicznie niejednorodnym układzie. Pracy traconej w wyniku dysypacji nie potrafimy odzyskać za pomocą odwrócenia kierunku procesu. Natomiast pracę traconą z powodu niequasistatyczności procesu można by odzyskać, gdyby proces przebiegał odwracalnie. Wartość pracy, którą można teoretycznie osiągnąć podczas przemiany odwracalnej nosi nazwę *pracy maksymalnej*.

Pojęcie pracy maksymalnej nie jest jednoznaczne. Jest bowiem uzależnione od parametrów otoczenia. Dla przykładu przydatność energii materii jest równa zero, jeśli jej parametry stanu są zgodne z parametrami otoczenia. Te braki pojęcia energii z punktu widzenia zdolności do wykonywania pracy uwzględniono wprowadzając pojęcie *egzergii*, które określa maksymalną pracę wyznaczoną względem otoczenia. Według J. Szarguta [3.4] definicja egzergii jest następująca.

Egzergia substancji jest to maksymalna praca użyteczna, jaką ta substancja może wykonać w procesie odwracalnym, w którym wykorzystuje się otoczenie jako źródło bezwartościowego ciepła i bezwartościowych substancji, jeżeli przy końcu tego procesu wszystkie uczestniczące w nim postacie substancji osiągają stan równowagi termodynamicznej z powszechnymi składnikami otoczenia.

Można z przedstawionych uwag wysnuć wniosek, że zdolność układu termodynamicznego do wykonywania maksymalnej pracy charakteryzuje przydatność energii tego układu.

Energia wewnętrzna w stanie początkowym i końcowym obiegu zamkniętego przyjmuje tę samą wartość. Wynika stąd, że pierwsza zasada termodynamiki dla takiego układu sprowadza się do postaci

gdzie ciepło obiegu zamkniętego Q jest równe różnicy wartości ciepła doprowadzanego Q_1 do układu i ciepła odprowadzanego Q_2 , a więc $Q = Q_1 - Q_2$.

Miarą wykorzystywania przez układ ciepła doprowadzanego Q_1 jest sprawność określana zależnością

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{L}{Q} \quad 3.65$$

Warunkiem na to by η przybierała wartość maksymalną jest, aby zamiana ciepła na pracę w danym układzie odbywała się według obiegu Carnota. Sprawność η , zdefiniowana w sensie obiegu Carnota, jest warunkiem, który określa najlepszy sposób wykorzystywania danego urządzenia.

Istnieje możliwość lepszego wykorzystania pracy pożytecznej danego procesu termodynamicznego, (na przykład procesu spalania). Miarą wykorzystania pracy pożytecznej procesu termodynamicznego jest sprawność, określaną mianem **sprawności II-go rodzaju** (w odróżnieniu od η , którą w takim przypadku nazywa się sprawnością I-go rodzaju) lub **sprawność egzergijna** definiowana w następujący sposób

$$\varepsilon = \frac{L'}{L'_{\max}} \quad 3.66$$

Stanowi ona stosunek rzeczywistej uzyskiwanej wartości pracy pożytecznej, w optymalnie zaprojektowanym urządzeniu, do wartości maksymalnej pracy pożytecznej, którą można teoretycznie osiągnąć. Warunkiem najlepszego wykorzystania pracy pożytecznej jest więc

$$L' = L'_{\max} \quad 3.67$$

3.3 Poszanowanie energii

3.3.1 Poszanowanie energii jako lepsze wykorzystanie pracy pożytecznej

Możliwość oszczędzania energii w procesach produkcyjnych będziemy rozróżniać jako:

- **racjonalne użytkowanie energii**, między innymi poprzez optymalne zarządzanie energią w przedsiębiorstwie,
- **poszanowanie energii**, traconej na rzecz otoczenia, poprzez bardziej efektywne wykorzystywanie energii w procesach termodynamicznych (w literaturze anglosaskiej określanej jako energy conservation).

Termin **racjonalizacja** można (i należy) stosować wyłącznie do przypadków, w których z punktu widzenia układu termodynamicznego nic się nie zmienia. Przykładami racjonalizacji mogą być między innymi:

- stosowanie bardziej dokładnej analizy strukturalnej budynków i materiałów zastępczych,
- planowanie przestrzenne osiedli, uwzględniające odpowiednie usytuowanie budynków względem słońca i kierunków wiatrów,
- wprowadzanie czasu letniego.

Są to działania konieczne w sytuacji drogiej energii i narastającego jej deficytu, ale nie dające rozwiązań w takiej skali, jaką mogło by dać lepsze wykorzystanie pracy pożytecznej w układach termodynamicznych. Wszelkie możliwe działania w kierunku

bardziej efektywnego użytkowania paliw kopalnych będą przyczyniać się do zmniejszenia emisji zanieczyszczeń do atmosfery.

Średnia sprawność wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach węglowych w Polsce wynosi około 30%. Oznacza to, że wykorzystuje się tylko 30% energii pierwotnej, jaką niesie węgiel jako nośnik energii. Pozostała część ogrzewa atmosferę. Powstaje więc problem **poszanowania** możliwie największej ilości energii pierwotnej równoważnej wartości kalorycznej paliwa, w czasie przekazywania jej na drodze od źródła do użytkownika. W przypadku elektrowni węglowych można oczekiwać w przyszłości sprawności 50%. Niesie to za sobą możliwość poszanowania dalszych 20% energii pierwotnej. Jednakże, zmniejszenie energii traconej na rzecz otoczenia jest możliwe tylko w wyniku odpowiednich zmian w układzie termodynamicznym, w wyniku wprowadzania innowacji technologicznych, kosztem oczywiście kapitału łożonego na badania i inwestycje. Działania takie, które pozwala poszanować (zachować) znaczne ilości energii pierwotnej w wyniku zmian w układzie termodynamicznym, nazywa się **poszanowaniem energii**. Nie jest to ani usprawnianie czy racjonalizacja, ani oszczędność w ścisłym tego słowa znaczeniu. Jest to lepsze wykorzystywanie pracy pożytecznej, którą zdefiniowaliśmy w paragrafie 3.2.5 równaniem 3.39.

Zwiększanie wartości pracy pożytecznej to bardziej efektywne wykorzystywanie energii w procesach termodynamicznych, a więc poszanowanie energii traconej na rzecz otoczenia.

3.3.2 Poszanowanie energii w elektrowniach węglowych

W elektrowniach węglowych można wyróżnić dwa zasadnicze procesy:

- spalanie węgla,
- zamiana entalpii pary na pracę mechaniczną w turbinie parowej.

Proces spalania dotyczy przejścia układu otwartego ze stanu początkowego, w którym występuje mieszanie paliwa i tlenu, do stanu równowagi produktów końcowych z atmosferą. Do chwili ustalenia się równowagi proces spalania przebiega samorzutnie przy stałym ciśnieniu, wykonując jedynie pracę rozprężania $dL = -p dV$. Warunek samorzutnego przebiegu procesu uzyskuje się z I-wszej zasady termodynamiki

$$Q = dI - L - p dV \quad 3.68$$

w postaci

$$Q = dI \quad 3.69$$

gdzie: Q - ciepło spalania.

Pracę pożyteczną procesu spalania, przy pominięciu pracy równoważnej energii wnoszonej przez wpływającą substancję, określa zależność

$$d'L' = dI - TdS \quad 3.70$$

lub

$$d'L' = dQ - TdS \quad 3.71$$

Oznacza to, że pracę pożyteczną procesu spalania można zwiększyć zmniejszając jedynie wartość wyrażenia TdS , którego istnienie warunkują:

- zmiana entropii dS_1 wynikająca z faktu, że suma entropii mieszaniny reaktantów jest różna od sumy entropii produktów spalania,
- zmiana entropii dS_2 powodowana izobarycznym ogrzewaniem produktów spalania.

Zmiana entropii dS_2 jest znacznie większa od dS_1 i zależy od właściwości fizycznych paliwa, tak samo jak temperatura płomienia. Wobec tego w przypadku stosowania technologii spalania właściwej danemu paliwu, sprawność spalania będzie warunkowana

rodzajem stosowanego paliwa. Najwyższą sprawność spalania - użytkowania paliwa, wynoszącą około 90% zapewnia wodór.

W celu określenia sprawności II-giego rodzaju - sprawności egzergijnej - procesu spalania, rozważmy układ termodynamiczny, w którym przebiega proces spalania przy temperaturze płomienia T_1 i ciśnieniu p . Ciepło w ilości Q jest przekazywane na drodze przewodzenia i promieniowania do otoczenia, którego temperatura wynosi T_0 . Pracę pożyteczną dla $p = \text{const}$ określa zależność

$$\begin{aligned} L &= (\Delta I_1 - T_1 \Delta S_1) + (\Delta I_0 - T_0 \Delta S_0) = \\ &= (\Delta I_1 + \Delta I_0) - T_1 \Delta S_1 \left[1 + \left(\frac{T_0}{T_1} \right) \left(\frac{\Delta S_0}{\Delta S_1} \right) \right] \end{aligned} \quad 3.72$$

gdzie symbol Δ przedstawia skończony przyrost zmiennych stanu. Gdy wymiana ciepła Q zachodzi przy $p = \text{const}$, wówczas

$$I_1 = -Q \quad \text{i} \quad I_0 = +Q. \quad \text{Zmiana entropii układu wynosi } \Delta S_1 = -\frac{Q}{T_1}.$$

Maksymalny przyrost entropii otoczenia równy $\Delta S_0 = -\Delta S_1$ uzyskuje się w przypadku idealnym, gdy wymiana ciepła pomiędzy układem i otoczeniem następuje według przemiany odwracalnej, co oznacza, że:

$$\Delta S_1 + \Delta S_0 = 0 \quad 3.73$$

Warunek $\Delta S_0 = -\Delta S_1$ wyznacza górną granicę wartości pracy pożytecznej, czyli

$$L' = Q \left[1 - \frac{T_0}{T_1} \right] \quad 3.74$$

Wartość graniczna ciepła przekazywanego do otoczenia stanowi całkowite ciepło spalania Q_s . Ponieważ dla $\frac{T_0}{T_1} \ll 1$ $L = Q_s$ to wobec tego maksymalna wartość pracy pożytecznej rozważanego układu określa warunek

$$L'_{\max} = Q_s \quad 3.75$$

Mając to na uwadze, uzyskujemy

$$\frac{L'}{L'_{\max}} = \frac{Q \left[1 - \frac{T_0}{T_1} \right]}{Q_s} = \eta \left[1 - \frac{T_0}{T_1} \right] \quad 3.76$$

gdzie η - sprawność Carnota.

Oznacza to, że w przypadku stosowania temperatury spalania równej temperaturze płomienia, właściwej danemu paliwu, uzyskuje się największą wartość ϵ .

W układzie turbiny następuje ustalony przepływ czynnika z równoczesnym rozprężaniem. Pracę pożyteczną wykonywaną w czasie tej przemiany, przy kontakcie z otoczeniem traktowanym jako źródło bezwartościowej energii, opisuje zależność

$$L'_1 = \Delta I - T_0 \Delta S \quad 3.77$$

wyrażająca pracę techniczną, gdzie ΔI jest spadkiem entalpii opanowywanym przez turbinę. T_0 określa temperaturę otoczenia, $T_0 \Delta S = T_0(S_1 - S_0)$ stanowi ciepło tracone na

rzecz źródła bezwartościowej energii, jakim jest otoczenie, gdzie indeks 1 oznacza stan na wlocie do turbiny.

Pracę pożyteczną układu, w którym zachodzi spalanie paliwa wyraża, zgodnie z (3.69), wzór

$$L'_2 = Q - T_0(S_1 - S_2) \quad 3.78$$

gdzie: Q - ciepło spalania, a $T_0(S_1 - S_2)$ - ciepło tracone na rzecz otoczenia.

Warunkiem maksymalnego wykorzystywania pracy pożytecznej procesu spalania i procesu rozprężania w turbinie jest, aby

$$L'_1 = L'_2 \quad 3.79$$

lub

$$Q - \Delta I = T_0(S_1 - S_2) \quad 3.80$$

Ponieważ $Q = \Delta I$, (3.69), wobec tego warunek (3.80) mówi, że spadek entalpii równoważny ciepłu spalania winien być możliwie bliski spadkowi entalpii opanowywanemu przez układ turbin, lub aby temperatura spalania była zbliżona do temperatury na wlocie turbiny.

W obecnie stosowanych układach turbin parowych przedstawiony warunek nie może być zrealizowany, ponieważ temperatura spalania znacznie przewyższa dopuszczalną temperaturę czynnika, jaka może być opanowana przez turbinę parową. Dla metanu jako paliwa różnica temperatur wynosi około 1400°C.

W 1950 roku sprawność termiczna konwencjonalnego obiegu Rankine'a, realizowanego w układzie z turbiną parową, osiągnęła wartość graniczną ze względu na ograniczenia temperatury. Wytrzymałość łopatek turbiny parowej wykonanych ze stali chromoniklowej maleje raptownie powyżej temperatury 600°C. Ponadto, nieco powyżej tej temperatury, para zaczyna ulegać częściowemu rozkładowi na wodór i tlen. Wodór dyfunduje przez gorące ścianki metalu, powoduje jego erozję, a tlen powoduje szybko postępującą korozję.

W tej sytuacji istnieją dwie możliwe drogi podwyższania sprawności egzergijnej (lepszego wykorzystywania pracy pożytecznej) elektrowni opalanej węglem, które mogą być stosowane równocześnie. Oto one:

- obniżenie temperatury procesu spalania,
- tak zwany obieg podwyższający, urządzenie pozwalające wykorzystywać część entalpii gazów spalinowych, wytwarzając energię eklektyczną, zanim gazy te zostaną przekazane do kotła parowego stowarzyszonego z turbiną parową,
- tak zwany obieg obniżający, urządzenie pozwalające bardziej efektywnie wykorzystywać entalpię w zakresie niskich temperatur, aniżeli można tego dokonywać stosując turbinę parową.

Obniżenie temperatury procesu spalania można uzyskać tworząc na bazie węgla takie paliwo, którego temperatura płomienia właściwa temu paliwu będzie niższa od temperatury płomienia węgla. Istnieją dwa sposoby takiego podejścia. Są to:

- spalanie w złożu fluidalnym, którego składowymi jest popiół, piasek i węgiel (temperatura 925°C),
- stosowanie gazu niskokalorycznego, uzyskiwanego w wyniku zgazowywania węgla w obecności powietrza (temperatura 1500°C).

W obydwóch przypadkach będzie można eliminować zanieczyszczenie środowiska przez SO_2 i obniżyć emisję NO_x .

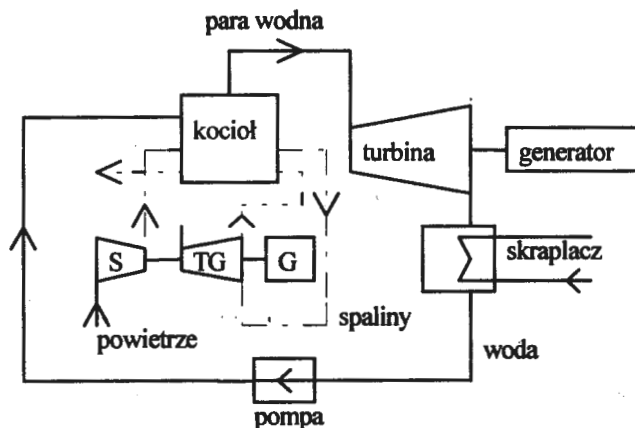
Obieg podwyższający opanowałby różnicę temperatur procesu spalania i pary na wlocie do turbiny lub bardziej ściśle opanowałby spadek entalpii identyfikowany z wyżej

wymienioną różnicą temperatur. Można tego dokonać, stosując dodatkowo obok turbiny parowej:

- turbinę, w której czynnikiem pracującym jest potas,
- turbinę gazową,
- generator magnetohydrodynamiczny MHD,
- generator termioniczny.

Rys. 3.4 ilustruje schemat układu siłowni parowo - gazowej. Sprężone w sprężarce wimikowej powietrze zostaje skierowane do kotła, w którym spalanie zachodzi przy podwyższonym ciśnieniu. Spaliny oddają ciepło parze i następnie dopływają do turbiny gazowej, wykonując w niej pracę. Turbina napędza sprężarkę, a nadmiar pracy zostaje użyty na napęd generatora. Obieg parowy odbywa się w normalnym układzie siłowni kondensacyjnej, obejmującej turbinę parową.

Obieg odpowiadający układowi przedstawionemu na rys. 3.4 pokazano na rys. 3.5. Obieg zakreskowany 1-2-3-4-5-1 jest obiegiem parowym. Jest to obieg podstawowy Rankine'a. Obieg 6-7-8-9-6, jako obieg podwyższający, jest obiegiem turbiny gazowej. Powietrze o stanie 6 zostaje sprężone do punktu 7 i skierowane do kotła. Po spalaniu paliwa w przemianie izobarycznej osiąga się stan opisany punktem 10. Przemiana 10-8 przedstawia oddawanie ciepła przez spaliny parze, a więc ciepło pod krzywą 8-10 musi być równe ciepłu pod linią 2-3-4. Następnie spaliny o stanie odpowiadającym punktowi 8 zostają skierowane do turbiny gazowej, w której rozprężają się według przemiany 8-9, wykonując pracę. Spaliny opuszczające turbinę mają jeszcze wysoką temperaturę i mogą być skierowane do podgrzewacza wody, w którym oddają ciepło, reprezentowane polem pod linią 1-2, ochładzając się do stanu opisanego punktem 11.



Rys. 3.4 Schemat układu siłowni parowo - gazowej.

Obieg obniżający pozwoli zmniejszyć straty ciepła na rzecz otoczenia powodowane koniecznością schładzania czynnika pracującego w obiegu turbiny. Można tego dokonać wprowadzając w zakresie niskich temperatur zamiast turbiny parowej tak zwaną turbinę organiczną, w której czynnikiem pracującym są organiczne ciecze ropopochodne [3.5]. Przy temperaturze 260°C sprawność turbiny parowej wynosi 18%, podczas gdy sprawność turbiny organicznej osiąga wartość 24%.

3.3.3 Poszanowanie energii w procesach przemysłowych

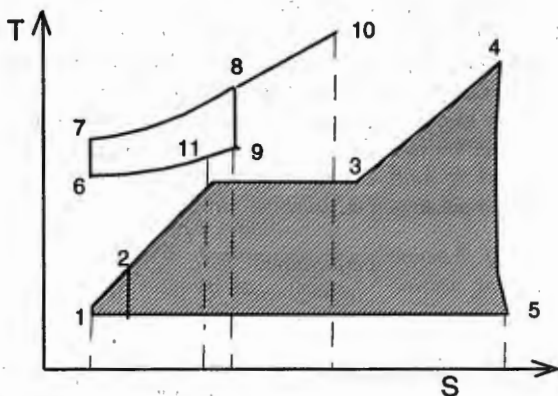
Wartość pracy pożytecznej wykorzystywanej w wielu procesach przemysłowych wyrazić można zależnością

$$L' = \Delta I - T_0 \Delta S \quad 3.81$$

gdzie ΔI określa spadek entalpii równoważny ciepłu doprowadzanemu do procesu, a $T_0 \Delta S$ stanowi ciepło tracone na rzecz źródła bezwartościowej energii jakim jest otoczenie.

Mechanizmami lepszego wykorzystania pracy pożytecznej w procesach przemysłowych stają się więc:

1. opanowanie możliwie całkowitego spadku entalpii ΔI , uwarunkowanego temperaturą źródła ciepła i temperaturą otoczenia,
2. zmniejszenie strat ciepła na rzecz otoczenia.



Rys 3.5 Obieg podstawowy turbiny parowej z obiegiem podwyższającym turbiny gazowej

Głównymi użytkownikami ciepła są: przemysł szklarski, cementowy, hutnictwa żelaza i stali, metali nieżelaznych, przemysł chemiczny, papierniczy i gospodarka komunalno-bytowa. Wykorzystywane jest tam ciepło w różnych zakresach temperatur począwszy od 1800°C (szkło) do 100°C (gospodarka komunalno-bytowa). W konsekwencji realizacja mechanizmu 1-go jest uwarunkowana kojarzeniem poszczególnych procesów technologicznych wokół pojedynczego źródła ciepła, co prowadzi do tworzenia *układów skojarzonych*.

Straty ciepła można między innymi identyfikować z:

- gorącymi substancjami chemicznymi wymagającymi chłodzenia w celu dalszej przeróbki,
- gazami wylotowymi o temperaturze około 350°C wielu procesów przemysłowych.

Zmniejszenia strat ciepła $T_0 \Delta S$ można dokonać poprzez przemianę części tego ciepła na energię elektryczną, stosując turbiny organiczne, w których czynnikiem pracującym są substancje organiczne o niskiej temperaturze wrzenia, jak na przykład izobutan.

W zastosowaniu do wykorzystywania ciepła odpadowego zaletami turbin organicznych w porównaniu do turbin parowych są:

- wyższa teoretyczna sprawność przy niskich temperaturach w porównaniu z turbiną parową,
- mniej złożone zagadnienie smarowania.

Wadą jest niski współczynnik przejmowania ciepła przez czynnik organiczny. Konsekwencją jest konieczność budowy wymiennika ciepła o dużych powierzchniach, którego koszt ma stanowić 2/3 kosztów całego urządzenia energetycznego.

Potencjalnymi odbiorcami turbin organicznych to:

1. przemysł, w tym rafineryjny i chemiczny,
2. energetyka wykorzystująca je jako obieg obniżający [3.5-3.7].

3.3.4 Układy skojarzone

Układy skojarzone mogą znaleźć zastosowanie w niektórych procesach przemysłowych i gospodarce komunalno-bytowej. Większość procesów przemysłowych wykorzystuje ciepło w określonym zakresie temperatur. Ilustrują to dane zawarte w tabelicy 3.1.

Temperaturę źródła ciepła determinuje temperatura płomienia zależna od stosowanego paliwa. Aby opłacać możliwie całkowicie spadek entalpii (pomiędzy temperaturą źródła energii i otoczenia), należy:

1. w procesach użytkujących średniotemperaturowe ciepło stosować obieg podwyższający, opanowujący niewykorzystywany spadek entalpii w zakresie wysokich temperatur,
2. w procesach użytkujących wysokotemperaturowe ciepło stosować cykl obniżający, opanowujący niewykorzystywany spadek entalpii w zakresie średnich temperatur.

Tablica 3.1 Zakresy temperatur użytkowania ciepła w procesach technologicznych wybranych produktów.

Produkt	Zakres temperatur °C
szkło	1540 - 980
cement	1500 - 620
wapno	900
etylen	850 - 750
chlurek winylu	620 - 500
papier	540 - 260

W gospodarce komunalno-bytowej, znanym układem skojarzonym jest elektrociepłownia. Poniżej, w sposób uproszczony zilustrujemy korzyści stosowania tego układu jako układu skojarzonego. Rys. 3.6 przedstawia porównanie wykorzystywania entalpii w elektrowni konwencjonalnej i elektrociepłowni. W elektrowni konwencjonalnej tylko spadek entalpii pomiędzy punktami A i C jest wykorzystywany. Pozostały spadek entalpii traci się w postaci ciepła na rzecz otoczenia. W układzie skojarzonym spadek entalpii pomiędzy punktami A i B jest opanowywany w turbinie parowej. Spadek entalpii pomiędzy punktami B i D wykorzystuje się w postaci ciepła przemysłowego lub grzewczego. Gdyby tę samą ilość energii elektrycznej i ciepła przemysłowego lub grzewczego wytwarzano w oddzielnych układach, to należałoby zużyć od 10 % do 30 % energii pierwotnej więcej w porównaniu z układem skojarzonym.

Elektrociepłownia jest jednym z możliwych układów skojarzonych, w którym:

1. turbina parowa upustowa stanowi cykl podwyższający,
2. pary upust z turbiny wykorzystuje się jako parę grzewczą lub przemysłową.

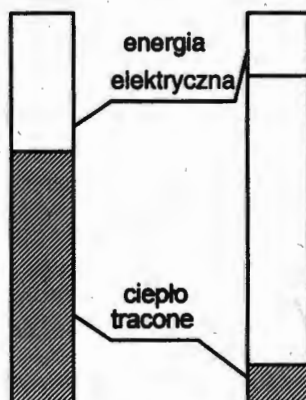
ELEKTROWNIA ELEKTROCIEPŁOWNIA

A. wlot do turbiny

B. upust pary

C. punkt wrzenia pary

D. punkt wrzenia wody



Rys. 3.6 Porównanie wykorzystywania entalpii w elektrowni konwencjonalnej i elektrociepłowni.

Poniżej wyszczególnia się inne możliwe układy skojarzone.

Turbina gazowa - wymiennik ciepła

Obieg podwyższający - układ turbiny gazowej i generatora wytwarza energię elektryczną.

Obieg obniżający - ciepło gazów wylotowych z turbiny gazowej wykorzystuje się poprzez wymiennik ciepła do produkcji pary przemysłowej.

Silnik diesla - wymiennik ciepła

Obieg podwyższający - układ silnika diesla i generatora wytwarza energię elektryczną.

Obieg obniżający - ciepło gazów wylotowych poprzez wymiennik ciepła wykorzystuje się do produkcji pary.

Turbina gazowa i turbina parowa upustowa

Obieg podwyższający - układ turbiny gazowej i generatora wytwarza energię elektryczną.

Obieg obniżający - ciepło gazów wylotowych z turbiny gazowej poprzez wymiennik ciepła wykorzystuje się do produkcji pary. Para zasila turbinę upustową, wytwarzającą energię elektryczną. Turbina ta z upustem pary, jest dostosowana do zmiennych warunków pracy, powodowanych zmiennym zapotrzebowaniem na ciepło i energię elektryczną. Upust pary z turbiny wykorzystuje się jako parę grzewczą lub przemysłową.

Proces przemysłowy - turbina parowa

Obieg podwyższający - proces przemysłowy wykorzystuje ciepło wysokotemperaturowe.

Obieg obniżający - ciepło odpadowe procesu przemysłowego wykorzystuje się poprzez wymiennik ciepła w turbinie parowej do wytwarzania energii elektrycznej.

Przedstawione układy skojarzone mogą znaleźć zastosowanie w tych procesach produkcyjnych, w których użytkowuje się znaczne ilości energii elektrycznej i ciepła. Potencjalne możliwości występują w przemyśle spożywczym, tekstylnym, chemicznym, papierniczym, rafineryjnym, ceramicznym i stalowniczym. Układy skojarzone nie stanowią nowości. Poza turbinami organicznymi wszystkie ich elementy były i są opanowane przemysłowo i na przykład elektrociepłownie są stosowane od szeregu lat w Polsce. Istnieją projekty wykorzystywania układów skojarzonych w wielu krajach uprzemysłowionych. Obok poszanowania energii w sensie zmniejszenia strat na rzecz otoczenia, istnieją możliwości jednostkowego zmniejszenia zużycia energii w wielu gałęziach przemysłu w wyniku modernizacji procesów technologicznych.

3.4 Uwagi końcowe

W rozdziale przypomniano niektóre wiadomości z termodynamiki, pomocne przy zrozumieniu istoty poszanowania energii w gospodarce narodowej i technologii prowadzących do tego poszanowania. Przez poszanowanie energii rozumie się lepsze wykorzystywanie pracy pożytecznej, a więc zachowanie możliwie najwięcej energii pierwotnej równoważnej wartości kalorycznej paliwa w czasie przekazywania jej na drodze od źródła do użytkownika. Odzyskanie traconej energii na rzecz otoczenia jest możliwe tylko w wyniku odpowiednich zmian w układzie termodynamicznym. Jest to równoważne ze stosowaniem odpowiednich technologii pozwalających:

- w przypadku elektrowni węglowych obniżyć temperaturę spalania poprzez stosowanie spalania fluidalnego lub niskokalorycznego zgazowywania węgla,
- stosować obok podstawowego obiegu parowego Rankine'a tak zwanego obiegu podwyższającego i obniżającego,
- opanować możliwie całkowicie spadek entalpii, pomiędzy temperaturą źródła energii i otoczenia, zmniejszając w ten sposób straty energii na rzecz otoczenia.

O technologiach pozwalających poszanowywać energię, a także zmniejszać zanieczyszczenie środowiska, będzie między innymi tematem następnych rozdziałów. W których będzie się omawiać:

- technologie nieodnawialnych źródeł energii,
 - technologie odnawialnych źródeł energii,
- jako technologie producentów energii.

Literatura

- 3.1 Huber M., T., Mechanika ogólna i techniczna, CZYTELNIK, Warszawa 1951.
- 3.2 Staniszewski B., Termodynamika, PWN, Warszawa 1969.
- 3.3 Werle J., Termodynamika fenomenologiczna, PWN, 1957.
- 3.4 Szargut J., Petela R., Egzergia, WNT, 1965.
- 3.5 Herman S.W., Cannon I. S., Energy futures, Ballinger Publishing Comp., 1977.
- 3.6 Meacher J. S., Organic Rankine cycle systems for waste heat recovery in refineries and chemical process plants, Modern Power Systems, Vol.1, No 8, 1981.
- 3.7 Lacey D., Prasad A., Five organic Rankine cycle systems installed at field test sites, Modern Power Systems, Vol.1, No 8, 1981.
- 3.8 Madejski J., Teoria wymiany ciepła, PWN, 1963.

IBS

43297

ISBN 83-85847-06-5

**W celu uzyskania bliższych informacji i zakupu dodatkowych egzemplarzy
prosimy o kontakt z Instytutem Badań Systemowych PAN
ul. Newelska 6, 01-447 Warszawa
tel. 36-19-01 w. 241 e-mail: kotuszew@ibspan.waw.pl**