ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1999
Seria: ENERGETYKA z. 131 Nr kol. 1427

Jan SZARGUT
Instytut Techniki Cieplnej Politechniki Śląskiej

ANALIZA EGZERGETYCZNA PROCESÓW I SYSTEMÓW CIEPLNYCH

Streszczenie. Podano definicję egzergii. Omówiono straty egzergii i bilans egzergii. Przedstawiono metody obliczania egzergii. Przedyskutowano metodę obliczania skumulowanego zużycia egzergii i cząstkowych strat egzergii występujących w systemach cieplnych. Zdefiniowano koszt ekologiczny za pomocą skumulowanego zużycia nieodnawialnych naturalnych zasobów egzergii.

EXERGY ANALYSIS OF THERMAL PROCESSES AND SYSTEMS

Summary. Exergy has been defined. Exergy losses and exergy balance have been discussed. Methods of exergy calculation have been presented. Cumulative exergy consumption and partial exergy losses appearing in thermal systems have been commented. Ecological cost has been defined by means of the cumulative consumption of unrestorable natural exergy resources.

1. Definicja egzergii i straty egzergii

Różne postaci energii charakteryzują się niejednakową jakością, co objawia się zróżnicowaną zdolnością do przemiany w inne postaci energii. Jako wspólny miernik jakości różnych postaci energii przyjęto maksymalną zdolność do wykonania pracy w warunkach narzuconych przez otaczającą przyrodę. Tak określoną wielkość nazwano **egzergią** według propozycji Z. Ranta [8]. Bardziej szczegółową definicję dogodnie jest sformułować wg Riekerta [9] za pomocą minimalnego zapotrzebowania na pracę napędową:

Egzergia jest to minimalny nakład pracy potrzebny do wyprodukowania żądanej substancji o żądanych parametrach z powszechnie występujących składników otaczającej przyrody, przy wykorzystaniu otoczenia jako jedynego źródła ciepła.

Egzergia w przeciwieństwie do energii nie podlega prawu zachowania. Każda nieodwracalność termodynamiczna wywołuje bezzwrotną stratę egzergii. Nie można więc uniknąć strat egzergii, gdyż wszystkie realne przemiany są nieodwracalne. Straty egzergii określa prawo Gouya-Stodoli [3],[12]:

$$\delta B = T_{ot} \sum \Delta S \tag{1}$$

gdzie:

δB – strata egzergii,

$\sum \Delta S$ – suma przyrostów entropii wszystkich ciał uczestniczących w procesie,

T_{ot} – bezwzględna temperatura otoczenia.

Głównymi przyczynami występowania strat egzergii są: tarcie mechaniczne lub hydrauliczne, nieodwracalny przepływ ciepła (przy skończonym gradiencie temperatury), nieodwracalna dyfuzja substancji (przy skończonym gradiencie stężenia), nieodwracalne reakcje chemiczne.

W procesach realizowanych w praktyce każda strata egzergii powinna mieć uzasadnienie ekonomiczne, tylko bowiem przez dopuszczenie do strat egzergii można ograniczyć nakłady inwestycyjne [10]. Np. nie jest potrzebne nieskończenie wielkie pole powierzchni przepływu ciepła w wymienniku ciepła, jeżeli w każdym jego przekroju występuje strata egzergii. Jeżeli strata egzergii nie ma uzasadnienia ekonomicznego, to należy uznać, że powstała ona na skutek błędu w sztuce inżynierskiej. Zadaniem inżyniera energetyka jest zwalczanie strat egzergii w granicach opłacalności ekonomicznej [2].

2. Bilans egzergii

Wyniki analizy egzergetycznej dogodnie jest przedstawić w postaci bilansu [13]. Ujęcie tego bilansu jest wzorowane na bardzo prostym i zarazem uniwersalnym sformułowaniu bilansu energii, stosowanym przez Prof. St. Ochęduszkę [6],[7]. Egzergia nie podlega prawu zachowania i dlatego jej bilans należy zamknąć *wewnętrzną stratą egzergii* wynikającą z przemian nieodwracalnych przebiegających wewnątrz osłony kontrolnej. Oprócz straty wewnętrznej występują w bilansie *straty zewnętrzne* określone wartością egzergii odpadowych produktów procesu. Egzergia tych produktów ulega zniszczeniu w otoczeniu. Równanie bilansu egzergii ma więc postać:

$$B_d = \Delta B_u + B_{w\,uż} + \delta B_z + L + \sum \Delta B_{zr} + \delta B_w \tag{2}$$

gdzie:

B_d – egzergia ciał doprowadzonych do układu,

ΔB_u – przyrost egzergii układu,

$B_{w\,uż}$ – egzergia odprowadzonych produktów użytecznych,

δB_w, δB_z – wewnętrzna i zewnętrzna strata egzergii,

L – praca wykonana przez układ,

ΔB_{zr} – przyrost egzergii zewnętrznego źródła ciepła działającego na osłonie kontrolnej.

Bilans egzergii można zilustrować wykresem pasmowym, podobnie jak bilans energii [4], [13]. Pasmo wewnętrznej straty egzergii należy jednak odróżnić od pasm egzergii.

Przyrost egzergii zewnętrznego źródła ciepła wynika ze wzoru Carnota:

$$\Delta B_{zr} = -Q\frac{T - T_{ot}}{T} \tag{3}$$

gdzie:

Q – ciepło oddane przez źródło do układu,

T – temperatura bezwzględna źródła ciepła zmierzona na osłonie kontrolnej.

Podobnie jak przy sporządzaniu bilansu energii, również w bilansie egzergii występuje różnica między egzergią substancji zawartej wewnątrz osłony kontrolnej a egzergią substancji przepływającej przez osłonę kontrolną. Jest ona podobna, jak różnica między energią wewnętrzną i entalpią.

Bilans egzergii może stanowić podstawę obliczenia *sprawności egzergetycznej*. Wyraża ona stosunek użytecznego efektu egzergetycznego $B_{uż}$ do egzergii napędowej B_N:

$$\eta_B = \frac{B_{uż}}{B_N} \tag{4}$$

Sprawność egzergetyczna jest zawsze mniejsza od jedności.

3. Obliczanie egzergii

Egzergię substancji przecinającej osłonę kontrolną układu można podzielić na składniki, podobnie jak energię. Najczęściej wystarczy uwzględnić egzergię kinetyczną, potencjalną, fizyczną i chemiczną. Egzergię kinetyczną wyraża energia kinetyczna obliczona za pomocą prędkości względem powierzchni Ziemi. Egzergię potencjalną określa energia potencjalna liczona od poziomu powierzchni Ziemi dominującego w otoczeniu rozpatrywanego procesu. Egzergię fizyczną oblicza się od poziomu określonego temperaturą i ciśnieniem otoczenia:

$$b_f = i_f - T_{ot} s_f \tag{5}$$

gdzie:

b_f – egzergia fizyczna właściwa,

i_f, s_f – fizyczna entalpia i entropia właściwa.

Egzergia chemiczna dotyczy substancji mającej temperaturę i ciśnienie otoczenia. Wynika ona z różnic składu chemicznego w porównaniu z powszechnie występującymi składnikami otoczenia. Egzergię chemiczną traktuje się więc jak składnik egzergii substancji. Ujęcie to jest wzorowane na wprowadzonym przez Prof. St.Ochęduszkę sposobie ujęcia energii chemicznej jako składnika entalpii substancji [6],[7]. Prof. Ochęduszko zaproponował wyrażanie entalpii chemicznej za pomocą entalpii tworzenia (nazywanej dawniej ciepłem tworzenia). Ujęcie takie bardzo ułatwia sporządzanie bilansów energii. Warto podkreślić, że do dziś wielu autorów łączy energię chemiczną z poszczególnymi reakcjami chemicznymi, co wymaga umownego ustalenia zespołu reakcji, obejmującego wszystkie składniki substratów i produktów procesu.

Dobór poziomów odniesienia egzergii chemicznej nie stwarzałby trudności, gdyby panowała równowaga chemiczna między składnikami otaczającej przyrody. Niestety, jak wykazał Ahrendts [1], składy chemiczne atmosfery, hydrosfery i litosfery są dalekie od wzajemnej równowagi chemicznej. Dlatego zaproponowano wprowadzenie dla każdego pierwiastka chemicznego odrębnej *substancji odniesienia* [14].

Dobór substancji odniesienia jest w pewnym stopniu umowny. Powinny one jednak dostatecznie często występować w przyrodzie i powinny reprezentować dostatecznie niski poziom egzergii, zapewniający dodatnią wartość egzergii chemicznej innych związków chemicznych. Dlatego zaproponowano jako substancje odniesienia główne składniki powietrza atmosferycznego, stałe składniki litosfery będące produktami wietrzenia skał oraz jonowe lub

drobinowe składniki wody morskiej. Wynik obliczenia egzergii chemicznej zależy nie tylko od rodzaju substancji odniesienia, lecz również od jej średniego stężenia w ziemskiej przyrodzie.

Składniki wody morskiej są o tyle dogodnymi substancjami odniesienia, że można dla nich dostatecznie dokładnie obliczyć funkcje termodynamiczne (dotyczy to drobin oraz jonów jedno- i dwuwartościowych) [5], [19]. Stałe substancje odniesienia stwarzają duże trudności obliczeniowe, gdyż wpływ ich średniego stężenia w zewnętrznej warstwie skorupy ziemskiej można tylko oszacować w przybliżony sposób. Mimo to było konieczne zrezygnowanie z niektórych jonowych substancji odniesienia na rzecz substancji stałych, gdyż np. w przypadku wapnia jonowa substancja odniesienia Ca^{++} prowadzi do ujemnej egzergii chemicznej tak pospolitego związku, jak $CaCO_3$ [23].

W przypadku niektórych azotanów (np. $NaNO_3$) przyjęty zespół substancji odniesienia prowadzi do ujemnych wartości egzergii chemicznej. Oznacza to, że wspomniane substancje powinny tworzyć się samoczynnie i obficie występować w przyrodzie. Na szczęście ich powstawanie jest kinetycznie blokowane (w przeciwnym razie nie byłoby wolnego tlenu w atmosferze).

Aby umożliwić stabelaryzowanie wartości egzergii chemicznej, wprowadzono pojęcie egzergii chemicznej normalnej [23]. Wynika ona ze średnich parametrów otoczenia i średniego stężenia substancji odniesienia w otaczającej przyrodzie. W tablicy 1 podano przykłady substancji odniesienia niektórych pierwiastków i wartości ich normalnej egzergii chemicznej.

4. Podstawowe zastosowania analizy egzergetycznej

Podstawowym zadaniem analizy egzergetycznej jest wykrywanie i ocena ilościowa przyczyn zwiększających niedoskonałość termodynamiczną procesów cieplnych. Analiza egzergetyczna dostarcza więc informacji o możliwościach udoskonalania procesów cieplnych, nie rozstrzyga jednak problemu opłacalności tych udoskonaleń. W powiązaniu z analizą egzergetyczną opracowano 20 praktycznych reguł zmniejszania niedoskonałości termodynamicznej procesów cieplnych [25],[29].

Podjęto liczne próby ekonomicznych zastosowań egzergii. Nie ma jednak podstaw, by przyjąć, że wartość ekonomiczna nośnika energii jest proporcjonalna do jego egzergii. Przy analizowaniu obiegów nie jest nawet możliwe obliczenie jednostkowej wartości ekonomicznej

egzergii w poszczególnych punktach, gdyż liczba służących do tego celu równań jest mniejsza od liczby niewiadomych. Egzergia jest wielkością termodynamiczną, nie zaś ekonomiczną [16]. Może ona jednak służyć jako przybliżone narzędzie pomocnicze przy rozwiązywaniu niektórych zagadnień ekonomicznych.

Tablica 1

Substancje odniesienia i normalna egzergia chemiczna niektórych pierwiastków

Pierwiastek chemiczny	Substancja odniesienia			Pierwiastek	
	wzór chemiczny	stan	normalna egzergia chemiczna kJ mol^{-1}	stan	normalna egzergia chemiczna kJ mol^{-1}
Ag	$AgCl_2^-$	aq	-	s	70,2
Al	Al_2SiO_5	s	15,3	s	888,20
Au	Au	s	50,2	s	50,2
C	CO_2	g	19,87	s,grafit	410,26
Ca	$CaCO_3$	s	16,3	s	72,1
Cl	Cl^-	aq	-	Cl_2,g	123,6
Cu	Cu^{++}	aq	-	s	134,2
Fe	Fe_2O_3	s	12,4	s	374,3
K	K^+	aq	-	s	366,6
Na	Na^+	aq	-	s	336,6
Pb	$PbCl_2$	aq	-	s	232,8
S	SO_4^{--}	aq	-	s, romb.	609,6
Si	SiO_2	s	2,2	s	854,9
Zn	Zn^{++}	aq	-	s	339,2

Na przykład, przy doborze grubości izolacji cieplnej rurociągu służącego do transportu gorącego nośnika energii powinno się uwzględnić fakt, że ciepło tracone do otoczenia ma wartość ekonomiczną większą od wartości średniej. Wartość tę można w przybliżeniu ocenić za pomocą wzoru (3):

$$k_c = k_m \frac{T - T_{ot}}{T} \frac{T_m}{T_m - T_{ot}} \tag{6}$$

gdzie:

k_c, k_m – lokalny i średni jednostkowy koszt ciepła,

T, T_m – rzeczywista i średnia termodynamiczna temperatura czynnika tracącego ciepło.

5. Skumulowane zużycie i cząstkowe straty egzergii

Metody obliczania egzergii i analizy egzergetycznej procesów cieplnych przedstawiono szczegółowo w monografiach [15] i [22]. Późniejsze opracowania dotyczyły głównie analizy egzergetycznej systemów cieplnych. Każdy proces jest bowiem ogniwem sieci wzajemnie powiązanych procesów, których znaczna część służy do wytwarzania półwyrobów i nośników energii dla pozostałych procesów. Z wytwarzaniem każdego produktu finalnego jest więc związane zużywanie podstawowych nośników egzergii i powstawanie strat egzergii nie tylko w procesie końcowym, lecz także w procesach poprzedzających.

Skumulowane zużycie egzergii jest to sumaryczne zużycie egzergii czerpanej z zasobów naturalnych, występujące we wszystkich ogniwach sieci energotechnologicznej w związku z wytwarzaniem rozpatrywanego produktu [20]. Różnica skumulowanego zużycia egzergii i wartości egzergii rozpatrywanego produktu określa *skumulowaną stratę egzergii*, którą można rozdzielić na *cząstkowe straty egzergii* występujące w poszczególnych ogniwach sieci energotechnologicznej [24]:

$$b^* - b = \delta b^* = \sum_k \overline{\delta b_k} \tag{7}$$

gdzie:

b^* – skumulowane zużycie egzergii obciążające rozpatrywany produkt,

δb^* – skumulowana strata egzergii związana z wytwarzaniem rozpatrywanego produktu,

$\overline{\delta b_k}$ – cząstkowa strata egzergii występująca w k-tym ogniwie sieci energotechnologicznej.

Skumulowane zużycie egzergii można obliczać w skali regionalnej (np. w skali kraju) lub w skali globalnej. Jeżeli obliczenie ma służyć do wyznaczania cząstkowych strat egzergii, to powinno obejmować wszystkie procesy powiązane z wytwarzaniem rozpatrywanego produktu, a więc w razie potrzeby powinno wykraczać poza skalę regionalną. Analiza cząstkowych strat egzergii pozwala wykryć wszystkie możliwe sposoby zmniejszenia niedoskonałości termodynamicznej wytwarzania rozpatrywanego produktu.

Do obliczenia skumulowanego zużycia egzergii nie należy włączać egzergochłonności pracy ludzkiej, gdyż - jak wykazano w [26] - prowadzi to do podwójnego liczenia. Suma wartości skumulowanego zużycia egzergii obciążającego wszystkie produkty finalne jest równa sumie

zużycia wyznaczonej od strony źródeł naturalnych, jeżeli do obliczeń nie wprowadzono egzergochłonności pracy ludzkiej.

Skumulowane zużycie egzergii można obliczać metodą sekwencyjną lub metodą układu równań bilansowych. Metoda równań bilansowych może prowadzić do bardzo rozległego układu równań. Metoda sekwencyjna pozwala analizować każdy z produktów oddzielnie. Polega ona na rozpatrywaniu kolejnych etapów procesu wytwarzania, poczynając od etapu końcowego i kończąc na etapach pozyskiwania egzergii ze źródeł naturalnych. W metodzie sekwencyjnej trudno jest uwzględnić sprzężenia zwrotne i dlatego można ją z powodzeniem stosować, jeżeli są już znane wartości skumulowanego zużycia egzergii obciążającego podstawowe półwyroby i nośniki energii. Nadogodniej jest więc połączyć obie metody. W pierwszym etapie należy zestawić i rozwiązać układ równań bilansowych obejmujący silnie ze sobą powiązane procesy wytwarzania podstawowych półwyrobów i nośników energii (np. procesy wydobycia węgla i gazu ziemnego, produkcji energii elektrycznej, koksu, surówki żelaza i stali). W etapie drugim można wykorzystać wskaźniki z etapu pierwszego do przeprowadzenia analizy sekwencyjnej dalszych procesów.

Metoda układu równań bilansowych opiera się na stwierdzeniu, że skumulowane zużycie obciążające użyteczne produkty procesu wynika ze wskaźników skumulowanego zużycia obciążających substraty procesu. Wskaźnik skumulowanego zużycia egzergii na jednostkę produktu głównego j-tego ogniwa sieci technologicznej można więc wyrazić wzorem:

$$b_j^* + \sum_u f_{uj} b_u^* = \sum_i a_{ij} b_i^* + \sum_u a_{uj} b_u^* + \beta_j \,, \tag{8}$$

gdzie:

a_{ij} – współczynnik zużywania i-tego półwyrobu krajowego na jednostkę j-tego produktu głównego,

f_{uj}, a_{uj} – współczynnik wytwarzania i zużywania u-tego produktu ubocznego na jednostkę j-tego produktu głównego,

β_j – wskaźnik bezpośredniego zużycia egzergii ze źródła naturalnego na jednostkę j-tego produktu głównego,

b_j^*, b_i^*, b_u^* – wskaźnik skumulowanego zużycia egzergii na jednostkę produktu j-tego, i-tego oraz u-tego.

Wykorzystując współczynniki zastępowania z_{iu} (w jednostach produktu zastąpionego na jednostkę produktu ubocznego), można z równania (8) wyeliminować wielkości b_u^*

$$f_{uj} = \frac{f_{ij}}{z_{iu}}, \quad a_{uj} = \frac{a_{ij}}{z_{iu}}, \quad b_u^* = b_i^* z_{iu} . \tag{9}$$

Wzór (8) po wprowadzeniu zależności (9) przyjmuje postać:

$$b_j^* - \sum_i (a_{ij} - f_{ij}) b_i^* = \beta_j , \tag{10}$$

Cząstkowe straty egzergii wynikają z równań bilansu egzergii zestawionych dla poszczególnych ogniw sieci technologicznej. Wyznaczenie tych strat nie sprawia trudności, jeżeli w rozpatrywanym zespole procesów nie występują procesy skojarzone. Bilans egzergii dotyczący każdego z procesów skojarzonych powinien odnosić się tylko do tego produktu, który jest przedmiotem analizy lub występuje we wcześniejszych etapach sieci wytwarzania. Dlatego do równań bilansów egzergii należy wprowadzić współczynniki netto zużywania półwyrobów i egzergii czerpanej bezpośrednio z przyrody. Współczynniki te wynikają z następujących układów równań:

$$A_{ij} = a_{ij} - \sum_p f_{pj} A_{ip} , \tag{11}$$

$$\beta_{Nj} = \beta_j - \sum_p f_{pj} \beta_{Np} , \tag{12}$$

gdzie:

A_{ij}, A_{ip} – współczynnik zużycia netto i-tego półwyrobu na jednostkę j-tego lub p-tego produktu,

a_{ij}, f_{pj} – współczynnik zużycia i produkcji ubocznej brutto i-tego oraz p-tego wyrobu odniesiony do jednostki j-tego wyrobu,

β_j – współczynnik bezpośredniego zużycia brutto egzergii zasobów naturalnych, odniesiony do jednostki j-tego wyrobu,

β_{Nj}, β_{Np} – współczynnik bezpośredniego zużycia netto zasobów naturalnych na jednostkę j-tego lub p-tego wyrobu, przy czym współczynniki produkcji ubocznej są przeliczone na zastąpione produkty główne za pomocą wzoru (9).

Lokalną stratę egzergii netto δb_{Nj} odnoszącą się do jednostki produktu głównego rozpatrywanego ogniwa można wyznaczyć za pomocą bilansu egzergii. Strata ta obejmuje sumę strat wewnętrznych i zewnętrznych:

$$\sum_i A_{ij} b_i + \beta_{Nj} = b_j + \delta b_{Nj} , \tag{13}$$

Cząstkowe straty egzergii netto wynikają ze skumulowanego zużycia poszczególnych produktów na jednostkę rozpatrywanego produktu:

$$\delta \bar{b}_{Nmj} = S_{Nmj} \delta b_{Nm} , \tag{14}$$

gdzie:

S_{Nmj} – skumulowane zużycie netto m-tego wyrobu na jednostkę j-tego wyrobu.

W zapisie macierzowym:

$$S_N = (E - A)^{-1} . \tag{15}$$

gdzie:

E – macierz jednostkowa diagonalna,

A – macierz współczynników równania (11).

W tablicy 2 przytoczono przykładowe wyniki obliczenia cząstkowych strat egzergii związanych z produkcją surówki żelaza [24].

6. Koszt ekologiczny

Wyczerpywanie zasobów nieodnawialnych bogactw naturalnych jest zagrożeniem dla przyszłego istnienia ludzkości. Jako wspólny miernik jakości nieodnawialnych bogactw naturalnych można przyjąć egzergię. Skumulowane zużycie egzergii bogactw nieodnawialnych obciążające rozpatrywany produkt nazwano kosztem ekologicznym. Jest on wyrażony nie w jednostkach pieniężnych, lecz w jednostkach egzergii [17], [18], [27]. Wielkość ta powinna uwzględniać nie tylko zużycie bezpośrednie, lecz także zużycie dodatkowe wynikające z potrzeby skompensowania szkód ekologicznych wywołanych przez odprowadzanie do otoczenia szkodliwych produktów odpadowych.

Koszt ekologiczny można wyznaczać w skali regionalnej (krajowej) lub w skali globalnej. Krajowy koszt ekologiczny powinien ponadto uwzględniać wpływ importu półproduktów i nośników energii. Przyjęto, że koszt ekologiczny odniesiony do jednostki monetarnej jest jednakowy dla produktów eksportowanych i importowanych, gdyż środki na import zdobywa się przez eksport.

Podobnie jak przy obliczaniu skumulowanego zużycia egzergii, również koszt ekologiczny można obliczać za pomocą układu równań bilansowych lub metodą sekwencyjną. Dogodnie jest sformułować układ równań tylko dla silnie ze sobą powiązanych gałęzi gospodarki, a do pozostałych gałęzi stosować metodę sekwencyjną. Występuje jednak trudność uwzględnienia półwyrobów importowanych. Metoda przedstawiona w [21] wymaga objęcia równaniami bilansowymi wszystkich gałęzi wytwarzających produkty eksportowane. Aby umożliwić przeprowadzenie obliczeń przybliżonych, przyjęto założenie, że koszt ekologiczny przypadający na jednostkę monetarną eksportu wynika z krajowego zużycia B egzergii bogactw nieodnawialnych i produktu krajowego brutto PKB [28]:

Tablica 2

Cząstkowe straty egzergii związane z produkcją ciekłej surówki żelaza
(w % skumulowanej egzergochłonności)

Materiał	Proces	Współczynnik zużycia			Cząstkowa strata egzergii netto %
		brutto $a_{ij}-f_{ij}$	netto A_{ij}	jednostka	
Surówka	kopalnia węgla	0,0152	0,0366	kg/kg	1,802
	kopalnia rudy żelaza				
	wydobycie gazu ziemnego	0,206	0,206	kg/kg	1,577
	koksownia	-0,00108	-0,0038	kmol/kg	0,077
	elektrownia	0,571	0,571	kg/kg	10,251
	spiekalnia	0,0568	0,0327	MJ/kg	6,684
	proces wielkopiec.	1,594	1,594	kg/kg	10,351
		-	-	-	34,315
	skumulowany stopień doskonałości	-	-	-	34,943

$$\rho_r = D_r \frac{B}{PKB} \tag{16}$$

gdzie:

ρ_r, D_r – koszt ekologiczny półwyrobu importowanego i jego wartość monetarna.

Niedokładność założenia (16) można korygować metodą iteracyjną.

Wpływ szkodliwych produktów odpadowych na koszt ekologiczny oceniono za pomocą monetarnych wskaźników szkodliwości [28]:

$$\xi = \frac{B\,\sigma_k}{PKB + \sum_k P_k\,\sigma_k} \tag{17}$$

gdzie:

σ_k – monetarny wskaźnik szkodliwości k-tego produktu odpadowego, np. w zł/kg,

P_k – roczna ilość wytworzonego k-tego produktu odpadowego.

Równania bilansowe określające wskaźniki kosztu ekologicznego mają postać podobną do wzoru (10):

$$\rho_j + \sum_i (f_{ij} - a_{ij})\rho_i - \sum_r a_{rj}\rho_r = \sum_s b_{sj} + \sum_k p_{kj}\xi_k \tag{18}$$

gdzie:

b_{sj} – egzergia s-tego nieodnawialnego bogactwa naturalnego zużywanego bezpośrednio w j-tym procesie na jednostkę produktu głównego,

p_{kj} – ilość k-tego produktu odpadowego na jednostkę j-tego produktu głównego.

Obliczenia wartości kosztu ekologicznego zostały wykonane po raz pierwszy przez W. Stanka [11]. Wykazały one m.in., że krajowy koszt ekologiczny importowanego gazu ziemnego jest około 10 razy mniejszy od jego egzergii [28].

LITERATURA

1. Ahrendts J.: Die Exergie chemisch reaktionsfähiger Systeme. VDI-Forschugsheft 579, VDI, Düsseldorf 1977.
2. Bošnjaković F.: Kampf den Nichtumkehrbarkeiten. Arch. Wärmewirtschaft, 19 (1938), No 1.
3. Gouy G.: Sur l'énergie utilisable. Journal de physique II, 8 (1889).
4. Grassmnann P.: Die Exergie und das Flußbild der technisch nutzbaren Leistung. Allg.Wärmetechn. 9 (1959) No 11.
5. Morris D.R., Szargut J.: Standard Chemical Exergy of Some Elements and Their Compounds on the Planet Earth. Energy 1986, No 8.

6. Ochęduszko St.: Teoria maszyn cieplnych. PWT, Warszawa 1955.
7. Ochęduszko St.: Termodynamika stosowana. WNT, Warszawa 1964.
8. Rant Z.: Exergie, ein neues Wort für "technische Arbeitsfähigkeit". Forsch. Ing.-Wes. 22 (1956) No 1.
9. Riekert L.: The Efficiency of Energy Utilization in Chemical Processes. Chem. Eng.Sci. 1974, No 29.
10. Sama D.: A Common Sense 2nd Law Approach to Heat Exchanger Network Design, Proc. ECOS'92, Zaragoza 1992.
11. Stanek W.: Analiza systemowa doboru parametrów termicznych dmuchu i dodatku paliw zastępczych w procesie wielkopiecowym. Rozprawa doktorska. Instytut Techniki Cieplnej, Politechnika Śląska, Gliwice 1998.
12. Stodola A.: Die Kreisprozesse der Gasmaschine. Z.d.VDI 32 (1898), No 38.
13. Szargut J.: Bilans potencjonalny procesów fizycznych wynikający z drugiej zasady termodynamiki. Arch. Budowy Maszyn 3 (1956), nr 3.
14. Szargut J.: Bilans potencjonalny procesów chemicznych. Arch. Budowy Maszyn 1957, nr 11.
15. Szargut J., Petela R.: Egzergia. PWN, Warszawa 1965.
16. Szargut J.: Grenzen für die Anwendungsmöglichkeiten des Exergiebegriffs. Brennstoff-Wärme-Kraft 19 (1967), No 6.
17. Szargut J.: Minimization of the Consumption of Natural Resources. Bull. Pol. Acad. Techn. Sci., 1978, No 6.
18. Szargut J.: Application of Exergy for the Calculation of Ecological Cost. Bull. Pol. Acad. Sci. Techn. 1986, No 7-8.
19. Szargut J., Morris D.R.: Calculation of the Standard Chemical Exergy of Some Elements and Their Compounds Based upon Sea Water as the Datum Level Substance. Bull. Pol. Acad. Techn. Sci. 1985, No 5-6.
20. Szargut J., Morris D.R.: Cumulative Exergy Consumption and Cumulative Degree of Perfection of Chemical Processes. Energy Research, 1987, No 11.
21. Szargut J.: Influence of the Imported Goods on the Cumulative Energy Indices. Bull. Pol. Acad. Sci. Techn. 35, (1987), No 9-10.
22. Szargut J., Morris D.R., Steward F.R.: Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Processes. Hemisphere Publ. Corp., 1988, New York.
23. Szargut J.: Chemical Exergies of the Elements. Applied Energy 32 (1989), 269-285.

24. Szargut J.: Gross and Net Exergy Losses in the Technological Networks. Bull. Pol. Acad. Techn. 40 (1992), No 5.
25. Szargut J., Sama D.A.: Practical Rules of the Reduction of Energy Losses Caused by the Thermodynamic Imperfection of Thermal Processes. Proc. The Second Intern. Thermal Energy Congress, Agadir 1995.
26. Szargut J.: Exergy and Ecology. Proc. of the Workshop "Second Law Analysis of Energy Systems", Roma 1995.
27. Szargut J.: Depletion of the Unrestorable Natural Exergy Resources, Bull. Pol. Acad. Techn. Sci. 45 (1997), No 2.
28. Szargut J., Stanek W.: Wpływ importu gazu ziemnego na wyczerpywanie krajowych zasobów nieodnawialnych bogactw naturalnych, Gospodarka Paliwami i Energią, 1998, nr 2.
29. Szargut J., Ziębik A.: Podstawy energetyki cieplnej. PWN, Warszawa 1998.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zygmunt Kolenda

Abstract

Main achievements of exergy analysis have been presented. The definition of exergy has been formulated according to Riekert. It has been stressed that the exergy loss (1) is unavoidable, but should be accepted only if it ensures a reasonable decrease of the investment expenditures. The formulation of exergy balance follows that of energy balance, applied by St. Ochęduszko. Also the concept of chemical exergy follows the introduction of chemical energy into the term of enthalpy, proposed by St.Ochęduszko. The reference states of chemical exergy have been discussed. Some examples are given in table 1.

The main task of exergy analysis is to detect and evaluate the causes increasing the thermodynamic imperfection of processes. Exergy is not any economic quantity, but sometimes can be used as an auxiliary tool for approximate solution of economic problems.

Analysis of cumulative consumption of exergy and of partial exergy losses makes it possible to determine the influence of the considered process on the exergy losses appearing in the previous processes delivering semi-finished products and energy carriers to the considered final

process. Cumulative consumption of exergy can be calculated by means of the set of Eqs (10). Partial exergy losses result from Eqs (14) and (13). Table 2 contains the results of calculation of partial exergy losses connected with the production of liquid pig iron.

Cumulative consumption of unrestorable natural exergy resources has been termed as the ecological cost. It can be calculated by means of the set of Eqs (18). The influence of the deleterious waste products on the ecological cost has been determined by means the monetary indices of harmfulness, Eq.(17). The domestic ecological cost of the imported natural gas is about 10 times smaller than its exergy.