

Jan Szargut

Instytut Techniki Ciepłej Politechniki Śląskiej

ANALIZA EGZERGETYCZNA PROCESÓW CIEPLNYCH

W pracy omówiono pojęcie egzergii ze szczególnym uwzględnieniem warunków odniesienia dla egzergii chemicznej. Przedstawiono sposób tworzenia bilansów egzergetycznych. Przedyskutowano problemy związane ze skumulowanym zużyciem egzergii oraz omówiono problemy zastosowań ekonomicznych i ekologicznych egzergii.

WSTĘP

Analiza egzergetyczna rozwinęła się w wyniku zastosowania drugiej zasady termodynamiki do badania efektywności przemysłowych procesów cieplnych. Prekursorami analizy egzergetycznej byli G. Gouy (1889) i A. Stodola (1898), którzy sformułowali prawo określające stratę zdolności do wykonania pracy powstającą na skutek nieodwracalności termodynamicznej. Do prekursorów można też zaliczyć F. Bošnjakovića, który analizował możliwości zwalczania nieodwracalności (1938). Nazwę „egzergia” wprowadził Z. Rant (1956), którego prace zapoczątkowały burzliwy rozwój tej dziedziny termodynamiki technicznej. W latach 60. analiza egzergetyczna była rozwijana głównie w Europie. W latach 80. nastąpiło wyraźne zwiększenie zainteresowania tą dziedziną w USA, co zaowocowało ponownym przyrostem liczby publikacji dotyczących tego zagadnienia. Bibliografia analizy egzergetycznej liczy już kilka tysięcy pozycji. Wydano też liczne monografie książkowe poświęcone temu zagadnieniu. Autorami monografii byli m. in. Szargut i Petela (1965), Kotaś (1985), Fratzscher, Brodjanskij i Michalek (1986), Szargut, Morris i Steward (1988).

1. DEFINICJA I OBLICZANIE EGZERGII

Egzergia jest miarą jakości różnych postaci energii. Jakość tę określa się za pomocą maksymalnej zdolności do wykonania pracy w istniejącym naturalnym

otoczeniu. Przejrzystą definicję egzergii zaproponował Riekert (1974). Po uwzględnieniu cech realnego otoczenia, definicję tę można sformułować następująco:

Egzergia jest to minimalny nakład pracy niezbędny do wytworzenia rozpatrywanego materiału o wymaganych parametrach z powszechnie występujących składników otaczającej przyrody, w sposób odwracalny, z wykorzystaniem otoczenia jako jedyne go źródła ciepła.

Podobnie jak przy obliczaniu energii, również przy obliczaniu egzergii należy odróżnić egzergię strumienia przecinającego osłonę kontrolną od egzergii substancji zawartej wewnątrz osłony kontrolnej układu. Większe znaczenie praktyczne ma pierwsza z tych wielkości. Można ją podzielić na kilka składników, z których najważniejsze są: egzergia kinetyczna, egzergia potencjalna, egzergia fizyczna i egzergia chemiczna. Egzergię fizyczną oblicza się od stanu substancji przy temperaturze otoczenia i pod ciśnieniem otoczenia. Egzergia chemiczna dotyczy substancji mającej temperaturę i ciśnienie otoczenia. Egzergię fizyczną określa wzór:

$$b_f = i_f - T_{ot} s_f, \quad (1)$$

gdzie:

i_f , s_f oznaczają entalpię i entropię fizyczną liczoną od stanu w temperaturze otoczenia i pod ciśnieniem otoczenia.

Obliczanie egzergii chemicznej było przedmiotem ożywionej dyskusji dotyczącej przyjęcia stanu odniesienia tej wielkości. Opublikowano bardzo liczne propozycje metod obliczania egzergii chemicznej. Często są one błędne i nie zasługują na uwagę. Dwie propozycje wymagają omówienia. Według Ahrendtsa (1977) jako stan odniesienia należy przyjąć stan równowagowego otoczenia, zwany też stanem martwym. Cytowany autor przeprowadził obliczenia składu otoczenia równowagowego dla układu obejmującego atmosferę, wodę morską i powierzchniową warstwę skorupy ziemskiej. W obliczeniu tym nie można uniknąć założeń umownych. Wynik obliczenia zależy bowiem bardzo wyraźnie od przyjętej grubości zewnętrznej warstwy skorupy ziemskiej (Ahrendts przeprowadził obliczenia dla grubości 10 m, 100 m i 1000 m). Obliczony skład równowagowy różni się znacznie od rzeczywistego składu otaczającej przyrody. W atmosferze równowagowej bardzo małe jest stężenie tlenu, woda morska zaś zawiera dużo azotanów. Osiągnięcie stanu równowagi z równowagowym otoczeniem byłoby w warunkach realnego otoczenia niemożliwe, gdyż w realnym otoczeniu równowaga nie występuje. Dlatego Szargut zaproponował przyjęcie składu realnego otoczenia jako podstawy ustalenia stanów odniesienia egzergii chemicznej (1957, 1988, 1989). Ze względu jednak na brak równowagi, konieczne jest przyjęcie dla każdego pierwiastka odrębnej substancji odniesienia. Szargut zaproponował przyjęcie substancji odniesienia powszechnie występujących w otaczającej przyrodzie. Substancjami tymi mogą być składniki powietrza, składniki wody morskiej (jony lub substancje niezjonizowane) oraz stałe

składniki skorupy ziemskiej będące najbardziej prawdopodobnymi produktami reakcji związków rozpatrywanego pierwiastka ze składnikami atmosfery.

Dobór substancji odniesienia jest w pewnym stopniu umowy. Wartości egzergii chemicznej powinny być w miarę możliwości dodatnie. Wymaganie to może ułatwić dobór substancji odniesienia. Obliczenia wykazały np. że przyjęcie jonowych substancji odniesienia dla pierwiastków drugiej kolumny układu okresowego (np. Ca, Mg) prowadzi do ujemnej egzergii chemicznej niektórych związków stałych dość powszechnych w skorupie ziemskiej. Dlatego dla pierwiastków kolumny drugiej zaproponowano stałe substancje odniesienia. Nie zawsze jednak można uniknąć ujemnych wartości egzergii chemicznej. Mimo racjonalnego przyjęcia substancji odniesienia pierwiastków N, O, Na, K, Ca otrzymuje się ujemne wartości egzergii chemicznej azotanów NaNO_3 , KNO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Azotany te powinny więc samoczynnie tworzyć się na powierzchni Ziemi. Na szczęście ich tworzenie jest kinetycznie zablokowane, gdyż w przeciwnym razie stężenie wolnego tlenu w atmosferze uległoby znacznemu zmniejszeniu.

Jonowe substancje odniesienia pozwalają na dokładne obliczenie egzergii chemicznej, gdyż funkcje termodynamiczne jonów jedno- i dwuwartościowych można dość dokładnie wyznaczyć (Morris, Szargut 1986). Przy występowaniu stałych substancji odniesienia można dokładnie obliczyć pracę maksymalną reakcji odniesienia opisującej przejście od rozpatrywanego związku do substancji odniesienia, jednak przejście między stanem standardowym substancji odniesienia a stanem rozproszenia w skorupie ziemskiej nie da się dokładnie obliczyć. Część stężeniową egzergii chemicznej można tylko oszacować przyjmując, że stałe substancje odniesienia zachowują się w skorupie ziemskiej jak składniki doskonałego roztworu (Szargut 1987). Pominięcie części stężeniowej nie byłoby racjonalne, gdyż prowadziłyby np. do wniosku, że egzergia złota jest równa zero (substancją odniesienia złota jest wolny pierwiastek).

Do interesujących problemów obliczania egzergii należy zagadnienie egzergii promieniowania cieplnego rozwiązane przez Petelę (1964). Na uwagę zasługuje też problem obliczania egzergii paliw stałych i ciekłych zawierających bardzo dużo, przeważnie nieznanych związków chemicznych. Problem ten rozwiązano metodą statystyczną zakładając analogię do jednorodnych substancji chemicznych (Szargut, Styrylska 1964).

2. STRATY EGZERGII I BILANS EGZERGII

Egzergia w przeciwieństwie do energii nie podlega prawu zachowania. Każda nieodwracalność powoduje bezzwrotną stratę egzergii. Stratę tę określa prawo Gouya-Stodoli:

$$\delta B = T_{ot} \sum \Delta S, \quad (2)$$

gdzie:

T_{ot} – temperatura otoczenia,

$\sum \Delta B$ – suma przyrostów entropii ciał uczestniczących w zjawisku.

Straty egzergii można podzielić na wewnętrzne i zewnętrzne. Straty wewnętrzne są wywołane przez zjawiska nieodwracalne przebiegające wewnątrz osłony kontrolnej procesu. Straty zewnętrzne wynikają z odprowadzania do otoczenia produktów odpadowych mających dodatnią egzergię. Wzór (2) nie nadaje się do obliczania strat zewnętrznych. Straty te najlepiej jest wyrażać bezpośrednio za pomocą egzergii produktów odpadowych. Wynik obliczenia strat wewnętrznych nie zależy od poziomu odniesienia przyjętego przy obliczaniu strat zewnętrznych.

Określanie strat egzergii jest głównym zadaniem analizy egzergetycznej, każda bowiem strata egzergii wywołuje zmniejszenie efektów użytecznych procesu lub zwiększenie zużycia środków napędowych. Każda strata egzergii powinna jednak mieć uzasadnienie ekonomiczne. Dopuszczenie do wystąpienia strat egzergii jest konieczne w celu ograniczenia nakładów inwestycyjnych. Na przykład przepływ ciepła bez strat egzergii wymagałby zastosowania nieskończenie wielkiej powierzchni przepływu ciepła. Jeżeli jednak strata egzergii nie ma uzasadnienia ekonomicznego, to należy ją uznać za wynik błędu w sztuce inżynierskiej.

Analiza egzergetyczna wskazuje więc możliwości udoskonalenia procesu cieplnego, nie rozstrzyga jednak o celowości udoskonalenia. Celowość powinna być kontrolowana za pomocą analizy ekonomicznej.

Szargut i Sama (1995) sformułowali 20 praktycznych zasad zmniejszania niedoskonałości procesów cieplnych. Zasady te nie obowiązują w sposób bezwzględny, mogą być łamane jeżeli jest to uzasadnione możliwością dostatecznego zmniejszenia nakładów inwestycyjnych.

Wyniki analizy egzergetycznej dogodnie jest ująć w postaci bilansu egzergii. Ze względu jednak na niespełnianie prawa zachowania, bilans egzergii należy zamknąć wewnętrzną stratą egzergii

$$B_d = \Delta B_u + B_w + \sum \Delta B_{zr} + L + \delta B_w, \quad (3)$$

gdzie:

B_d, B_w – egzergia ciał doprowadzonych do układu i wyprowadzonych z niego,

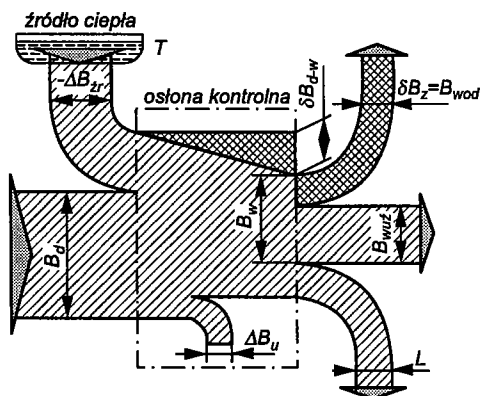
ΔB_u – przyrost egzergii układu,

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

L – praca wykonana przez układ,

δB_w – wewnętrzna strata egzergii.

Bilans egzergii można przedstawić na wykresie pasmowym (Grassmann 1959). Na rys. 1 przedstawiono wykres zmodyfikowany przez autora niniejszego opracowania. Taka postać wykresu jest obecnie powszechnie stosowana pod nazwą wykresu Grassmanna.



Rys. 1. Wykres pasmowy bilansu egzergii

Składniki bilansu egzergii mogą służyć do obliczenia sprawności egzergetycznej charakteryzującej odchylenie procesu od przebiegu odwracalnego. Sprawność tę definiuje się jako stosunek egzergetycznego efektu użytecznego do zużycia egzergii napędowej. Sprawność egzergetyczna jest zawsze mniejsza od jedności. Może ona być większa lub mniejsza od sprawności energetycznej. Np. sprawność egzergetyczna silnika Carnota jest większa od sprawności energetycznej. Na odwrót, sprawność egzergetyczna kotła jest mniejsza od energetycznej.

3. SKUMULOWANE ZUŻYCIE EGZERGII

Procesy produkcyjne są ze sobą wzajemnie powiązane dostawami półwyrobów i nośników energii, tworzą więc skomplikowaną sieć technologiczną. Zużycie egzergii, podobnie jak energii, obciążające dany wyrób występuje więc nie tylko w ostatnim ogniwie tej sieci lecz również w ogniwach poprzedzających. Zużycie egzergii bogactw naturalnych występujące w całej sieci technologicznej w związku z wytwarzaniem rozpatrywanego wyrobu, nazywamy wskaźnikiem skumulowanego zużycia egzergii. Wskaźnik ten można obliczać oddzielnie dla każdej postaci egzergii pierwotnej lub przetworzonej.

Do niedawna dyskutowano, czy wskaźnik skumulowanego zużycia egzergii (lub energii) powinien uwzględniać egzergochłonność (lub energochłonność) pracy ludzkiej. Szargut wykazał (1995), że uwzględnienie energochłonności

pracy ludzkiej oznacza podwójne liczenie i prowadzi do niezamykania się ogólnego bilansu zużycia energii (energii) pierwotnej.

Wskaźnik skumulowanego zużycia energii (lub energii) można obliczać metodą sekwencyjną lub metodą układu równań bilansowych. Metoda sekwencyjna jest przybliżona, ale pozwala prowadzić prawie niezależne obliczenia dla poszczególnych wyrobów. Metoda ta polega na kolejnym analizowaniu ogni w sieci technologicznej poczynając od ogniwa ostatniego, wytwarzającego rozpatrywany wyrób, poprzez ogniwa wytwarzające półwyroby i kończąc na ogniwach, w których surowce naturalne są czerpane z przyrody. Metoda układu równań bilansowych polega na sformułowaniu i rozwiązaniu układu równań dotyczących w zasadzie wszystkich wytworów gospodarki.

Metoda układu równań bilansowych wynika ze stwierdzenia, że skumulowane zużycie energii obciążające produkty użyteczne procesu wynika z sumowania wartości obciążających doprowadzone surowce i półwyroby, łącznie ze zużyciem maszyn i urządzeń. Stwierdzenie to prowadzi do układu równań liniowych zawierającego liczbę równań zgodną z liczbą niewiadomych.

Równanie bilansowe dotyczące j -tego ogniwa sieci technologicznej oraz k -tej postaci energii pierwotnej ma postać (Szargut i Morris 1987):

$$b_{kj}^* + \sum_i b_{ki}^* f_{ij} = \sum_i b_{ki}^* a_{ij} + \beta_{kj}, \quad (4)$$

gdzie:

- b_{kj}^* – wskaźnik skumulowanego zużycia k -tej postaci energii na jednostkę produktu głównego j -tego ogniwa sieci technologicznej,
- a_{ij} – współczynnik zużycia i -tego półwyrobu na jednostkę j -tego produktu głównego,
- f_{ij} – współczynnik ubocznego wytwarzania produktu użytecznego wyrażony w jednostkach i -tego produktu głównego zastąpionego przez rozpatrywany produkt uboczny,
- β_{kj} – zużycie k -tej postaci energii pierwotnej czerpanej bezpośrednio ze źródła, na jednostkę j -tego produktu głównego.

Równania bilansowe (4) powinny uwzględniać również półwyroby i surowce importowane. Dla pozyskania półwyrobów i surowców importowanych jest konieczne eksportowanie innych wyrobów obciążonych skumulowanym zużyciem energii. Dlatego zaproponowano, by półwyroby i surowce importowane obciążać skumulowanym zużyciem energii według ich wartości dewizowej, obliczając uprzednio obciążenie jednostki dewizowej eksportu skumulowanym zużyciem energii występującym w kraju (Szargut 1987).

Wskaźnik skumulowanej energochłonności może służyć do obliczania skumulowanego stopnia doskonałości wytwarzania rozpatrywanego materiału. Jest to stosunek energii tego materiału do wskaźnika skumulowanego zużycia energii obciążającego jego wytwarzanie. Jest celowe obliczanie tego wskaźnika tylko dla materiałów, nie zaś dla wyrobów złożonych, których przydatność wynika głównie z ich struktury, nie zaś z ich energii.

Analiza skumulowanej egzergochłonności ma tę wyższość nad analizą skumulowanej energochłonności, że pozwala dodatkowo wyznaczać straty egzergii występujące w poszczególnych ogniwach sieci technologicznej w związku z wytwarzaniem rozpatrywanego wyrobu. W ten sposób uzyskuje się systemową informację o możliwościach udoskonalenia sieci technologicznej zaangażowanej w wytwarzanie rozpatrywanego wyrobu. Udoskonalenie to może polegać na zmniejszeniu niedoskonałości termodynamicznej ogniów sieci, na zmianie doboru półwyrobów lub na zmianie technologii. Analizę skumulowanej egzergochłonności coraz powszechniej stosuje się do porównywania różnych technologii wytwarzania tego samego wyrobu (Morris 1994). Analiza cząstkowych strat egzergii występujących w poszczególnych ogniwach sieci technologicznej jest dość żmudna (Szargut 1992).

4. ZASTOSOWANIA EKONOMICZNE EGZERGII

Egzergia jest wielkością termodynamiczną, nie zaś ekonomiczną (Szargut 1967). W obliczeniach ekonomicznych egzergia może więc znaleźć tylko pomocnicze zastosowanie. Mimo tego zastrzeżenia rozwinęła się cała gałąź analizy egzergetycznej nazywana termoekonomią (Tribus, Evans 1962, Tsatsaronis, Pisa 1992, Valero i inni 1992). Punktem wyjścia analizy termoeconomicznej jest zazwyczaj określenie jednostkowej wartości ekonomicznej egzergii w poszczególnych punktach rozpatrywanego układu. Można sformułować następujące zastrzeżenia dotyczące metod termoeconomii:

1. Wynik optymalizacji termoeconomicznej nie powinien różnić się od wyniku uzyskanego metodą czysto ekonomiczną. W przeciwnym razie należałoby uznać jedną z tych metod za błędną.

2. Nie jest możliwe bez dodatkowych założeń obliczenie wartości ekonomicznej egzergii w poszczególnych punktach układu zawierającego obieg (pętlę), gdyż liczba równań bilansowych jest w tym przypadku mniejsza od liczby niewiadomych.

3. Dodatkowe założenia umożliwiające obliczenie wartości ekonomicznej egzergii w poszczególnych punktach układu zazwyczaj są przyjmowane milcząco, bez ich wyraźnego sformułowania. Zazwyczaj przyjmuje się, że produkty wytwarzane w skojarzeniu (np. ciepło i energia elektryczna w elektrociepłowni) mają jednakową jednostkową wartość ekonomiczną egzergii. Założenie to nie jest uzasadnione, gdyż wartość ekonomiczna jednostki egzergii zwiększa się w miarę postępu przemian. Np. wartość ekonomiczna jednostki energii elektrycznej jest większa niż wartość ekonomiczna jednostki egzergii pary w dowolnym punkcie elektrowni. Prawidłowa ocena wartości ekonomicznej produktu ubocznego może być wykonana tylko przez porównanie z procesem wyspecjali-

zowanym, którego produkt został zastąpiony przez rozpatrywany produkt uboczny (metoda kosztów unikniętych).

Jak wspomniano wyżej, egzergia może spełniać rolę pomocniczą w analizach ekonomicznych, np. może służyć do przybliżonego określenia wpływu parametrów na wartość ekonomiczną nośnika energii. Np. w elektrociepłowni wytwarzającej dwa strumienie pary grzejnej różniące się ciśnieniem, trudno jest rozdzielić koszty wytwarzania między te dwa strumienie za pomocą metody czysto ekonomicznej. Można to przeprowadzić w sposób przybliżony za pomocą egzergii. Ciepło tracone przez izolację rurociągu służącego do transportu gorącego nośnika energii ma wartość ekonomiczną większą od wartości średniej. Tę wartość lokalną można również ocenić w sposób przybliżony za pomocą egzergii.

5. ZASTOSOWANIA EKOLOGICZNE EGZERGII

Jednym z podstawowych zagadnień ekologii jest problem wyczerpywania zasobów nieodnawialnych bogactw naturalnych. Jako wspólny miernik jakości tych bogactw można przyjąć egzergię. Można więc zdefiniować wskaźnik kosztu ekologicznego za pomocą skumulowanego zużycia egzergii nieodnawialnych bogactw naturalnych (Szargut 1978). Wskaźniki kosztu ekologicznego można obliczyć za pomocą układu równań podobnego do (4) uwzględniając dodatkowo niekorzystne efekty odprowadzania do otoczenia agresywnych produktów odpadowych (Szargut 1995). Te niekorzystne efekty polegają na korozji wytworów pracy ludzkiej (maszyn, urządzeń, budynków), zmniejszeniu produkcji rolnej i leśnej oraz pogorszeniu stanu zdrowia ludności. Efekty niekorzystne można uwzględnić za pomocą dodatkowego zapotrzebowania na wytwory pracy ludzkiej.

Wspomniane równania nie uwzględniają jednak szkodliwego wpływu emisji CO_2 . Wpływ emisji CO_2 ma zupełnie inny charakter niż wpływ emisji agresywnych produktów odpadowych. Emisja CO_2 wywołuje zmianę stanu otoczenia, zmianę poziomu odniesienia egzergii. Efekt ten byłoby trudno przeliczyć na dodatkowe zapotrzebowanie wytworów pracy ludzkiej, obarczonych wskaźnikami kosztu ekologicznego.

UWAGI KOŃCOWE

W referacie przedstawiono podstawowe problemy obliczeniowe związane z analizą egzergetyczną oraz podstawowe możliwości jej stosowania. Pojawiają się

nowe propozycje stosowania egzergii, np. do ilustrowania zjawisk społecznych (Azzarone, Sciubba 1995, Wall 1995). Propozycje te nawiązują głównie do problemu wyczerpywania zasobów nieodnawialnych bogactw naturalnych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] F. Azzarone, E. Sciubba: *Energetic and Exergetic Sustainability of the Italian System: a Model Verification Study*. Proc. Workshop „Second Law Analysis of Energy Systems”. Roma 1995.
- [2] J. Ahrendts: *Die Exergie chemisch reaktionsfähiger Systeme*. VDI-Forschungsheft 579. VDI, Düsseldorf 1977.
- [3] F. Bošnjaković: *Kampf den Nichtumkehrbarkeiten*. Arch. Wärmewirtsch. 19 (1938) nr 1.
- [4] W. Fratzscher, V. Brodjanskij, K. Michalek: *Exergie; Theorie und Anwendung*. VEB 1986, Leipzig.
- [5] G. Gouy: *Sur l'énergie utilisable*. Journal de physique II, 8 (1889).
- [6] P. Grassmann: *Die Exergie und das Flußbild der technisch nutzbaren Leistung*. Allg. Wärmetechn, 9 (1959) nr 11.
- [7] T.J. Kotas: *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*. Butterworth 1985, London.
- [8] D.R. Morris, J. Szargut: *Standard Chemical Exergy of Some Elements and Their Compounds on the Planet Earth*. Energy (1986) nr 8.
- [9] D.R. Morris: *Technological Assessment of Alternative Processes: the Processing of Sulphide Minerals*. Canadian Metallurg. Quartely, 33 (1994) nr 4.
- [10] R. Petela: *Exergy of Heat Radiation*. J. Heat Transfer Ser. C, vol. 86, May 1964.
- [11] Z. Rant: *Exergie, ein neues Wort für „technische Arbeitsfähigkeit”*. Forsch. Ing.-Wes. 22 (1956) nr 1.
- [12] L. Riekert: *The Efficiency of Energy Utilization in Chemical Processes*. Chem. Eng. Sci. (1974) nr 29.
- [13] A. Stodola: *Die Kreisprozesse der Gasmachine*. Z. d. VDI 32 (1898) nr 38.
- [14] J. Szargut: *Straty pracy mechanicznej w energetycznych urządzeniach przemysłowych*. Gospodarka Ciepłota 2 (1954) nr 1.
- [15] J. Szargut: *Bilans potencjonalny procesów fizycznych wynikający z drugiej zasady termodynamiki*. Arch. Budowy Maszyn 3 (1956) nr 3.
- [16] J. Szargut: *Bilans potencjonalny procesów chemicznych*. Arch. Budowy Maszyn (1957) nr 11.
- [17] J. Szargut, T. Styrylska: *Angenäherte Bestimmung der Exergie von Brennstoffen*. Brennstoff-Wärme-Kraft 16 (1964) nr 12.
- [18] J. Szargut, R. Petela: *Egzergia*. PWN 1965, Warszawa.
- [19] J. Szargut: *Application of Exergy for the Calculation of Ecological Cost*. Bull. Pol. Acad. Sci. Techn. (1986) nr 7–8.
- [20] J. Szargut: *Grenzen für die Anwendungsmöglichkeiten des Exergiebegriffs*. Brennstoff-Wärme-Kraft 19 (1967) nr 7–8.
- [21] J. Szargut: *Standard Chemical Exergy of Some Elements and Their Compounds, Based upon the Concentration in Earth's Crust*. Bull. Pol. Acad. Techn. (1987) nr 1–2.

- [22] J. Szargut, D.R. Morris: *Cumulative Exergy Consumption and Cumulative Degree of Perfection of Chemical Processes*. Energy Research, (1987) nr 11.
- [23] J. Szargut: *Influence of the Imported Goods on the Cumulative Energy Indices*. Bull. Pol. Acad. Sci Techn. 35, (1987) nr 9–10.
- [24] J. Szargut: *Reference Level of Chemical Exergy*. Arch. Termodynamiki 9 (1988) nr 1–2.
- [25] J. Szargut: *Chemical Exergies of the Elements*. Applied Energy 32 (1989), 269–285.
- [26] J. Szargut: *Gross and Net Exergy Losses in the Technological Networks*. Bull. Pol. Acad. Techn. 40 (1992) nr 5.
- [27] J. Szargut, D.A. Sama: *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.
- [28] J. Szargut: *Exergy and Ecology*. Proc. of the Workshop „Second Law Analysis of Energy Systems”, Roma 1995.
- [29] M. Tribus, R. Evans: *Thermoeconomics*. UCLA Report No 52-63, 1962.
- [30] G. Tsatsaronis, J. Pisa: *Exergoeconomic Evaluation and Optimization of Energy Systems, Application to the CGAM Problem*. Proc. ECOS'92, Zaragoza 1992.
- [31] A. Valero, C. Torres, L. Serra: *A General Theory of Thermoeconomics. Part I, Structural Analysis*. Proc. ECOS'92, Zaragoza 1992.
- [32] A. Valero, M.A. Lozano: *A General Theory of Thermoeconomics. Part II, The Relative Free Energy Function*. Proc. ECOS'92, Zaragoza 1992.
- [33] G. Wall: *Exergy and Moral*. Proc. of the Workshop „Second Law Analysis of Energy Systems”, Roma 1995.

EXERGY ANALYSIS OF THERMAL PROCESSES

Summary

A notion of exergy was introduced and discussed in the paper. Special attention was given to the reference conditions for the chemical exergy. A method for making exergy balances was presented. Problems of cumulative consumption of exergy as well as problems of its economical and ecological applications were discussed.

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Краткое содержание

В работе представлено понятие эксергии с особым учетом условий отсчета для химической эксергии. Представлен способ составления эксергетических балансов. Обсуждались вопросы связанные с накопленным расходом эксергии, а также обсуждались вопросы экономических и экологических приложений эксергии.