

JAN SZARGUT

Katedra Energetyki Ciepłej

KLASYFIKACJA POJĘĆ EGZERGII

Streszczenie: Autor proponuje zróżnicowanie nazw i oznaczeń dla różnych pojęć egzergii substancji i różnych składników tej egzergii. Ze względu na przewagę procesów przepływowych w przemyśle, za wielkość podstawową nazwaną krótko "egzergią substancji" przyjmuje autor egzergię strumienia substancji przecinającego nieruchomą osłonę bilansową. Wielkość tę dzieli autor na energię kinetyczną, potencjalną oraz na egzergię termiczną. Tę ostatnią wielkość dzieli autor na egzergię fizyczną i chemiczną.

1. Definicja egzergii

Egzergia została wprowadzona w termodynamice technicznej jako wspólny miernik praktycznej przydatności różnych postaci energii. Zróżnicowanie jakości różnych postaci energii wynika z II zasady termodynamiki. Jako najprostszy przykład tego zróżnicowania może służyć energia wewnętrzna źródła ciepła. Jakość (praktyczna przydatność) tej energii zależy od poziomu temperatury źródła ciepła. Jakość tę można oceniać na przykład za pomocą maksymalnej zdolności do wykonania pracy i taki właśnie wspólny miernik jakości przyjęto w termodynamice technicznej. Poziom zerowy tego miernika wynika z analizy udziału otaczającej przyrody w energetycznych procesach przemysłowych. Otaczająca przyroda jest dla tych procesów źródłem bezwartościowego (w sensie ekonomicznym) ciepła i bezwartościowych substancji (na przykład powietrze pobierane z otoczenia do procesów spalania ma wartość ekonomiczną równą zero). Stan równowagi termodynamicznej z powszechnymi składnikami otaczającej przyrody można więc przyjąć jako stan odniesienia (poziom zerowy) przy ocenie praktycznej przydatności energetycznej materii.

Pełne wykorzystanie praktycznej przydatności energetycznej materii nie mogłoby nastąpić bez współudziału otaczającej przyrody. Z reguły byłoby konieczne zaczerpnięcie z otoczenia pewnej ilości bezwartościowych substancji oraz wykorzystanie otoczenia jako źródła bezwartościowego ciepła. Na przykład dla pełnego wykorzystania praktycznej przydatności energetycznej dowolnego paliwa byłoby konieczne zaczerpnięcie z otoczenia pewnej ilości tlenu. Pełne wyko-

rzystanie sprężonego powietrza o temperaturze otoczenia byłoby możliwe w przemianie izotermicznej połączonej z pobieraniem ciepła z otoczenia.

Na podstawie przytoczonych tu rozważań można sformułować następującą definicję egzergii:

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

Egzergia jest więc funkcją stanu materii. Wartość tej funkcji zależy jednak również od parametrów stanu otoczenia. Egzergia materii powszechnie występującej w otoczeniu jest równa zeru.

Pojęcie egzergii jest w pewnej mierze oparte na przesłankach techniczno-ekonomicznych (ocena roli otaczającej przyrody). Z tego powodu stosowanie pojęcia egzergii jest celowe tylko przy analizie konkretnych przemysłowych procesów energetycznych, realizowanych w warunkach narzuconych przez otaczającą przyrodę.

Analiza egzergetyczna procesów cieplnych zdobywa w ostatnich latach coraz większe znaczenie. W ostatnich dziesięciu latach problemem egzergii poświęcono w literaturze światowej około 200 publikacji. Możliwości stosowania egzergii omówiono w publikacji [5]. Do najważniejszych zastosowań należy ocena doskonałości procesów cieplnych, wykrywanie przyczyn zmniejszenia tej doskonałości i wskazywanie możliwości ulepszeń. Do najnowszych zastosowań należą zastosowania ekonomiczne. Egzergia bowiem, jako miernik praktycznej przydatności energetycznej może niekiedy służyć do przybliżonej oceny wartości ekonomicznej czynnika termodynamicznego.

Przedmiotem dalszych rozważań niniejszej pracy jest wyłącznie egzergia materii substancjalnej.

2. Zróżnicowanie pojęć egzergii

Przy sporządzaniu bilansu energetycznego lub egzergetycznego dowolnego procesu cieplnego należy wyodrębnić badany układ za pomocą pomyślanej osłony bilansowej. Osłona ta może być nieruchoma lub może poruszać się względem otoczenia, jednak jej kształt nie powinien ulegać zmianie. Przy niezmiennym bowiem kształcie osłony bilansowej łatwiej jest sformułować ogólną postać równania bilansu energetycznego i egzergetycznego.

W technice cieplnej najczęściej spotyka się nieruchome urządzenia przepływowe. Dlatego najlepiej jest przyjąć egzergię strumienia substancji przecinającego nieruchomą osłonę bilansową, za wielkość podstawową. Nazwa tej wielkości nie wymaga więc żadnych dodatkowych określeń (spotyka się propozycje, by wielkość tę nazwać egzergią techniczną, co zdaniem autora nie jest celowe, gdyż wszy-

stkie pojęcia egzergii są pojęciami technicznymi). Egzergię oznaczono w publikacjach autora symbolem B (dla całej ilości substancji) lub b (właściwa egzergia).

Przy obliczaniu egzergii układu zawartego w obrębie osłony bilansowej występuje inne pojęcie egzergii. Egzergię jednorodnej części układu oznaczono w dalszych rozważaniach symbolem B_z , b_z . Zależność pomiędzy egzergią B strumienia przecinającego nieruchomą osłonę bilansową a egzergią B_z jednorodnej części układu została wyprowadzona w publikacji [3]:

$$B_z = B - V(p - p_0) \quad (1)$$

gdzie:

- V - objętość rozpatrywanej części układu,
- p, p_0 - ciśnienie w tym układzie i w otoczeniu.

Trzecie z kolei pojęcie egzergii należy wprowadzić przy rozpatrywaniu strumienia substancji przecinającego ruchomą osłonę bilansową. Wielkość ta występuje stosunkowo rzadko w zagadnieniach praktycznych. Oznaczono ją symbolem B_r , b_r . Równanie określające egzergię B_r zostało wyprowadzone w publikacji [3]:

$$B_r = B - V \frac{u}{w} (p - p_0) \quad (2)$$

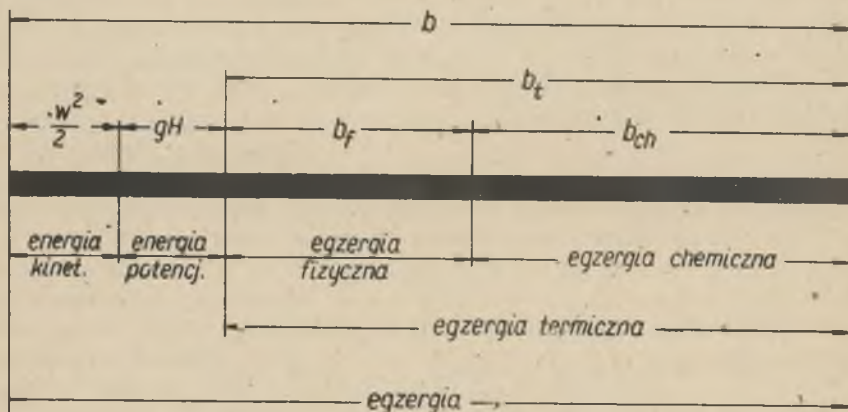
gdzie:

- V - objętość rozpatrywanej substancji,
- u, w - prędkość unoszenia osłony bilansowej i prędkość rozpatrywanego strumienia względem osłony bilansowej [znak algebraiczny w równaniu (2) obowiązuje, jeżeli prędkość względna w jest skierowana przeciwnie niż prędkość unoszenia u].

3. Składniki egzergii

Przedmiotem dalszych rozważań jest podstawowe pojęcie egzergii, tj. egzergia strumienia substancji przecinającego nieruchomą osłonę bilansową. Wielkość tę można podzielić na składniki podług schematu przedstawionego na rysunku 1. Tę część egzergii, która pozostaje po odliczeniu energii kinetycznej i potencjalnej rozpatrywanego strumienia, proponuje autor nazwać egzergią termiczną B_t , b_t . Egzergia termiczna jest funkcją termicznych parametrów stanu substancji. Wielkość ta bardzo często występuje w obliczeniach egzergii

getycznych, zwykle bowiem energia kinetyczna i potencjalna strumienia czynnika termodynamicznego ma stosunkowo małą wartość i może być pominięta.



Rys. 1. Schemat podziału egzergii na składniki

Wszelkie wykresy i tablice opracowane do wyznaczania egzergii czynnika termodynamicznego określają więc nie całkowitą egzergię, lecz tylko jej część nazwaną tu egzergią termiczną.

Spotyka się propozycje [1], by egzergię termiczną nazywać krótko egzergią, wielkość zaś bardziej ogólną nazywaną przez autora "egzergią" - nazywać "zdolnością do wykonania pracy". Propozycja ta nie jest zdaniem autora racjonalna. Nazwa "egzergia" powinna dotyczyć pojęcia najbardziej ogólnego, gdyż od tego pojęcia wywodzą się również ogólne pojęcia pochodne: bilans egzergetyczny, sprawność egzergetyczna. Przy sporządzaniu bilansu egzergetycznego i przy obliczaniu sprawności egzergetycznej uwzględnia się również energię kinetyczną i potencjalną. Gdyby więc wielkość obejmująca te dwie postacie energii nazwać nie egzergią lecz "zdolnością do wykonania pracy" - określenia "bilans egzergetyczny" i "sprawność egzergetyczna" nie byłyby uzasadnione.

Egzergię termiczną można z kolei podzielić na dalsze dwa składniki, które autor proponuje nazwać egzergia fizyczna b_f i egzergia chemiczna b_{ch} .

Wykorzystanie egzergii fizycznej polegałoby na sprowadzeniu czynnika termodynamicznego do stanu określonego ciśnieniem p_0 i temperaturą t_0 otoczenia. Substancja o parametrach termicznych p_0 , t_0 ma różną od zera egzergię chemiczną, której wartość wynika z różnicy składu chemicznego i koncentracji składników tej substancji w stosunku do pospolitych składników otoczenia.

Przy przyjętej definicji na przykład egzergia paliwa mającego parametry p_0 , t_0 nosiłaby nazwę egzergii chemicznej. Egzergia

chemiczna określa więc tę część egzergii, którą najczęściej wykorzystuje się praktycznie przez reakcje chemiczne. Określenie "egzergia chemiczna" miałoby jednak znacznie szersze zastosowanie, gdyż dotyczy ono dowolnej substancji o parametrach p_0 , t_0 . Na przykład tlen techniczny o parametrach p_0 , t_0 ma dodatnią egzergię, gdyż koncentracja jego składników jest różna od koncentracji składników powietrza atmosferycznego. Zgodnie z przyjętą nomenklaturą egzergię tlenu technicznego o parametrach p_0 , t_0 należałoby też uznać za egzergię chemiczną. Zasada ta może budzić zastrzeżenia, gdyż wykorzystanie egzergii tlenu technicznego o parametrach p_0 , t_0 mogłoby przebiegać w przemianie fizycznej przy wykorzystaniu przegród półprzepuszczalnych. Nie należy jednak zapominać, że w każdym przypadku byłoby w zasadzie możliwe wykorzystanie egzergii chemicznej w przemianach fizycznych przy wykorzystaniu przegród półprzepuszczalnych. Dla przykładu można wziąć pod uwagę tlenek węgla CO o parametrach p_0 , t_0 . Egzergię tej substancji można w pełni wykorzystać rozprężając ją izotermicznie do ciśnienia równego ciśnieniu składnikowemu CO w powietrzu atmosferycznym, (po rozprężeniu należałoby CO przez przegrodę półprzepuszczalną skierować do otoczenia). Ciśnienie składnikowe CO w powietrzu atmosferycznym jest wprawdzie znikomo małe, ma ono jednak określoną wartość wynikającą z praw równowagi chemicznej ze składnikami powietrza: tlenem i dwutlenkiem węgla.

Egzergia chemiczna określa więc przydatność danej substancji jako surowca chemicznego, praktyczne zaś wykorzystanie egzergii chemicznej nie musi polegać na realizowaniu reakcji chemicznych.

Metody obliczania egzergii chemicznej zostały wyjaśnione w pracach [4] i [7]. Przy obliczaniu tej egzergii dla każdego pierwiastka przyjmuje się substancję odniesienia. Jako substancję odniesienia powinno się przyjmować takie związki chemiczne, jakie powstają w otoczeniu po długim działaniu składników powietrza na związki rozpatrywanych pierwiastków. Stan substancji odniesienia w otoczeniu stanowi stan odniesienia (poziom zerowy) przy obliczaniu egzergii chemicznej. Czysta substancja odniesienia ma oczywiście dodatnią egzergię, gdyż w otoczeniu substancje odniesienia nie występują w postaci czystej, lecz w roztworach z innymi składnikami otoczenia. Również substancja będąca mieszaniną (roztworem) kilku substancji odniesienia ma dodatnią egzergię, jeżeli stężenie składników rozpatrywanej substancji jest inne niż stężenie składników odpowiedniej części otoczenia. Egzergię chemiczną substancji zawierającej w swym składzie wyłącznie substancje odniesienia proponuje autor nazwać resztkową egzergią chemiczną. Praktyczna przydatność takiej substancji wynika bowiem tylko z większej czystości w porównaniu z ciałami powszechnie występującymi w otoczeniu. Jako przykład można wymienić tlen techniczny, który w swym składzie zawiera wyłącznie substancje odniesienia. Egzergia chemiczna tlenu technicznego jest więc resztkową egzergią chemiczną.

Dla ułatwienia obliczania egzergii chemicznej wprowadził autor pojęcie normalnej egzergii chemicznej. Egzergia chemiczna ma wartość normalną, jeżeli temperatura otoczenia jest normalna oraz jeżeli koncentracja substancji odniesienia w otoczeniu ma umownie przyjętą wartość normalną (umowne normalne wartości koncentracji substancji odniesienia w otoczeniu ustala się podług przeciętnego składu pospolitych składników otoczenia). Wartości normalnej egzergii chemicznej jednorodnych związków chemicznych zostały stabelaryzowane [7]. Wzory do obliczania normalnej egzergii chemicznej paliw stałych zawiera publikacja [8]. W publikacji zaś [2] podano wykresy normalnej egzergii chemicznej gazów technicznych otrzymywanych z powietrza. Wreszcie publikacja [6] zawiera tablice i wykresy do wyznaczania normalnej egzergii chemicznej typowych surowców i produktów hutniczych. Sposób obliczania egzergii chemicznej za pomocą normalnej egzergii chemicznej został wyjaśniony w publikacji [7].

4. Ciepło w bilansie egzergetycznym

W technice cieplnej rozpatruje się niekiedy urządzenia wymieniające ciepło ze źródłem różnym od otoczenia i znajdującym się poza obrębem osłony bilansowej. Dla przykładu można tu wymienić ziębiarkę pobierającą ciepło z przestrzeni ziębionej, która zachowuje się jak źródło ciepła o stałej temperaturze. Wspomnianą tu wymianę ciepła uwzględnia w bilansie egzergetycznym wyrażenie, które autor nazywa przyrostem egzergii zewnętrznego źródła ciepła ΔB_{zr}

$$\Delta B_{zr} = - Q \frac{T - T_0}{T} \quad (3)$$

gdzie:

Q - ciepło oddane przez zewnętrzne źródło,

T, T_0 - temperatura bezwzględna zewnętrznego źródła ciepła i otoczenia.

Zdaniem P. Grassmanna nazwa "przyrost egzergii zewnętrznego źródła ciepła" nie jest właściwa, gdyż w bilansie egzergetycznym nie powinno się brać pod uwagę ciał znajdujących się poza obrębem układu (dla sporządzenia bilansu energetycznego lub egzergetycznego wystarczy znać stan początkowy i końcowy układu zawartego w obrębie osłony bilansowej oraz zjawiska przebiegające na granicach układu). P. Grassmann uważa więc, że bardziej odpowiednia byłaby nazwa ciepły strumień egzergii. Mogłoby też nasunąć się określenie "egzergia ciepła", nie byłoby ono jednak poprawne, gdyż egzergia jest funkcją stanu materii, ciepło zaś nie jest materią.

LITERATURA

- [1] H.D. BAEHR - Thermodynamik, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1962.
- [2] A. GUZIK - Egzergia gazów technicznych otrzymanywanych z powietrza, Energetyka Przemysłowa 10 (1962) nr 11, str. 384/87.
- [3] J. SZARGUT - Bilans potencjonalny procesów fizycznych wynikający z II zasady termodynamiki, Archiwum Budowy Maszyn 3 (1956) nr 3, str. 231/76.
- [4] J. SZARGUT - Die Exergiebilanz der Wärmeprozesse in der Hüttenindustrie, Freiburger Forschungshefte, 1962, nr B 68, str. 81/103.
- [5] J. SZARGUT - Pojęcie egzergii w odróżnieniu od energii i możliwości praktycznego stosowania egzergii, Energetyka Przemysłowa 10 (1962) nr 11, str. 374/78.
- [6] J. SZARGUT - Die Exergie der typischen Rohstoffe und Produkte in der Hüttenindustrie (w druku).
- [7] J. SZARGUT, A. ZIĘBIK - Egzergia związków metali nieżelaznych, Rudy i Metale Nieżelazne (w druku).
- [8] J. SZARGUT, T. STYRYLSKA - Die angenäherte Bestimmung der Exergie fester Brennstoffe, Brennstoff-Wärme-Kraft (w druku).

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОНЯТИЙ ЭКСЕРГИИ

Р е з ю м е

Автор предлагает названия для различных понятий эксергии и для слагаемых эксергии. В технической практике встречается, главным образом, проточные процессы. Поэтому эксергия потока вещества, пересекающего неподвижную балансную оболочку, принята как основная величина и названа просто эксергией. Эту величину подразделяет автор на кинетическую и потенциальную энергию и на термическую эксергию. Термическая эксергия подразделяется на физическую и химическую эксергию.

THE CLASSIFICATION OF EXERGY CONCEPTS

S u m m a r y

In the paper the proposal of differentiating of exergy concepts and their nomenclature is given. In the industrial practice the flow processes are of greatest importance. From this reason, as a basic concept the exergy of substance flow passing through the motionless balance boundary is accepted. This magnitude is called by the author simply as "exergy". The exergy is divided into the kinetic and potential energies and the thermal exergy. Further on, the thermal exergy consists from the physical and chemical exergy.