

JAN SZARGUT

Katedra Energetyki Ciepłej

KONCENTRACJA EGZERGII

Streszczenie. Możliwość praktycznego wykorzystania egzergii substancji zależy nie tylko od ilości egzergii lecz także od stosunku egzergii do objętości. Tę ostatnią wielkość nazywa autor koncentracją egzergii. Niejednokrotnie dąży się w technice do uzyskania zwiększonej koncentracji egzergii, nawet jeżeli można to uzyskać tylko kosztem strat ilości egzergii.

Egzergię stosuje się niekiedy jako podstawę przybliżonej oceny wartości ekonomicznej czynnika termodynamicznego. Dokładność tej oceny można zwiększyć przez uwzględnienie koncentracji egzergii.

1. Definicja koncentracji egzergii

Egzergia wyraża maksymalną zdolność materii do wykonania pracy, ustaloną względem otoczenia, w którym przebiega badany energetyczny proces przemysłowy. Egzergia stanowi wspólny miernik praktycznej przydatności energetycznej dla różnych postaci energii charakteryzujących się niejednakową jakością [3], [4].

Łączna ilość egzergii nie określa jednak możliwości praktycznego wykorzystania energii związanej z rozpatrywaną postacią materii. W szczególności przy rozpatrywaniu materii substancjalnej możliwości te zależą od stosunku egzergii substancji do jej objętości. Jeżeli stosunek ten jest zbyt mały, wykorzystanie egzergii może być nieopłacalne ze względu na konieczność zastosowania dużych wymiarów rurociągów, wymienników ciepła, maszyn itp. Jeżeli natomiast rozważany stosunek ma zbyt dużą wartość, mogą powstać trudności technicznego opanowania procesu energetycznego (zbyt wysokie temperatury lub zbyt duże ciśnienie).

Z przytoczonych rozważań wynika, że do charakteryzowania możliwości praktycznego wykorzystania egzergii substancji można zastosować wielkość wyrażającą stosunek egzergii do objętości. Wielkość ta została nazwana przez autora koncentracją egzergii. Najdogodniej jest obliczać ją za pomocą wielkości właściwych:

$$k_b = \frac{b}{v} \quad (1)$$

gdzie:

b - właściwa egzergia rozpatrywanej substancji,

v - objętość właściwa tej substancji.

Zwiększenie koncentracji egzergii sprzyja w zasadzie zmniejszeniu kosztów inwestycyjnych przy realizacji procesów służących do wykorzystania przydatności energetycznej danej substancji.

2. Koncentracja egzergii pary i wody

W tabelicy 1 przytoczono wartości koncentracji egzergii wody w punkcie pęcherzyków oraz pary nasyconej suchej. Wartości te wyznaczono przy założeniu, że temperatura otoczenia ma wartość $t_0 = 10^\circ\text{C}$ oraz wilgotność powietrza w otoczeniu wynosi $\varphi_0 = 70\%$. Ponadto podano wartość stosunku k'_b/k''_b koncentracji egzergii wody i pary nasyconej suchej. Jak widać koncentracja egzergii wody i pary nasyconej suchej zwiększa się z temperaturą, przy czym wartość stosunku k'_b/k''_b zmniejsza się osiągając jedność w punkcie krytycznym. Przy temperaturze zmierzającej do temperatury otoczenia wartość stosunku k'_b/k''_b zmierza do v''/v' . Badanie jednak wartości tego stosunku w pobliżu temperatury otoczenia nie ma praktycznego znaczenia.

Tabelica 1

Koncentracja egzergii wody ciekłej i pary wodnej
przy $t_0 = 10^\circ\text{C}$ $\varphi_0 = 70\%$

t $^\circ\text{C}$	k'_b ($x = 0$) kJ/m^3	k''_b ($x = 1$) kJ/m^3	k'_b/k''_b
20	46 680	2,255	20 698
30	48 730	6,355	7 668
40	51 880	14,47	3 586
50	56 220	29,22	1 924
100	91 800	382,6	240
150	144 400	2 183	66
200	206 900	8 007	26
250	272 900	22 540	12,1
300	334 900	54 550	6,1
350	372 400	129 000	2,9
374,15	273 700	273 700	1,0

Wartości podane w tablicy 1 wskazują, że w zakresie temperatur, który dotyczy czynników grzewczych koncentracja egzergii wody jest znacznie większa od koncentracji egzergii pary. Woda jest więc na ogół dogodniejszym czynnikiem grzewczym niż para. Dlatego w elektrociepłowniach przeważająca część pary upustowej i przeciwprężnej zostaje skierowana do wymienników ciepła, w których produkuje się gorącą wodę. Proces ten jest oczywiście nieodwracalny, a więc połączony ze stratami egzergii. Na przykładzie tym widać, że może być celowa transformacja czynnika grzewczego na czynnik o mniejszej egzergii lecz o zwiększonej koncentracji egzergii.

3. Koncentracja egzergii wodoru atmosferycznego

Powietrze atmosferyczne zawiera wolny wodór, którego udział mowy w powietrzu suchym wynosi 0,0000005. Udział ten jest znacznie większy od wartości jaka wynikałaby z równowagi chemicznej z parą wodną zawartą w powietrzu atmosferycznym. Tak duży udział wodoru wynika prawdopodobnie z działania promieniowania jonizującego na parę wodną zawartą w powietrzu atmosferycznym.

Wodór zawarty w powietrzu atmosferycznym ma więc dodatnią egzergię. Egzergię tę najłatwiej można obliczyć za pomocą normalnej egzergii chemicznej ustalonej dla czystego wodoru o parametrach p_n , t_n [5]. Dla uproszczenia można założyć, że powietrze atmosferyczne ma temperaturę normalną oraz że ciśnienie składnikowe pary w powietrzu ma umowną wartość normalną [5]. Wówczas właściwą egzergię wodoru wyraża wzór:

$$b_{ch} = b_{ch n} - T_n R \ln \frac{p_n}{p_{H_2}} \quad (2)$$

gdzie:

- $b_{ch n}$ - normalna egzergia chemiczna której wartości są podane w publikacji [5],
- R - stała gazowa,
- p_n - normalne ciśnienie przyjęte w tablicach normalnej egzergii chemicznej,
- p_{H_2} - ciśnienie składnikowe wodoru w powietrzu atmosferycznym.

Przyjmując według [2] $p_{H_2} = 0,0000005$ bar otrzymuje się za pomocą wzoru (2):

$$\begin{aligned} b_{ch} &= 238\,350 - 298,15 \cdot 8,315 \cdot \ln \frac{1,0132}{0,0000005} = 238\,350 - 36\,000 = \\ &= 202\,350 \text{ kJ/kmol.} \end{aligned}$$

Egzergia wodoru zawartego w powietrzu atmosferycznym jest więc tylko o około 15% mniejsza od egzergii czystego wodoru pod ciśnieniem normalnym. Mimo to jednak możliwości wykorzystania tej egzergii są znikome ze względu na bardzo małą jej koncentrację:

$$k_b = \frac{b_{ch}}{v} = \frac{202\ 350}{49\ 600\ 000} = 0,00408 \text{ kJ/m}^3.$$

Obliczona koncentracja egzergii jest około 20 000 000 razy mniejsza niż koncentracja egzergii gorącej wody grzewczej.

Przeliczony tu przykład wskazuje, że nie istnieją w otaczającej przyrodzie substancje o egzergii równej zero, gdyż nie występuje nigdy idealna równowaga termodynamiczna pomiędzy składnikami tych substancji. Nawet powietrze atmosferyczne uważane za wzorzec substancji o zerowej egzergii ma w rzeczywistości egzergię większą od zera.

4. Uwzględnienie koncentracji egzergii przy zastosowaniach ekonomicznych egzergii

Egzergia, jako miernik praktycznej przydatności energii może niekiedy służyć jako podstawa oceny wartości ekonomicznej nośnika energii, szczególnie w takich przypadkach, gdy brak jest czysto ekonomicznych kryteriów dla takiej oceny.

Jedno z pierwszych zastosowań ekonomicznych egzergii zostało wprowadzone przez Z. Ranta, który zaproponował, by podział kosztów wytwarzania w elektrociepłowni pomiędzy czynnik grzewczy i energię elektryczną przeprowadzać przy użyciu pojęcia egzergii [1]. Egzergetyczna metoda podziału kosztów jest niewątpliwie znacznie bardziej racjonalna od metody "fizycznej" posługującej się pojęciem energii bez uwzględnienia niejednakowej jakości różnych postaci energii. W szczególności metoda egzergetyczna nie prowadzi do absurdu w przypadkach skrajnych, kiedy ciśnienie pary grzewczej maleje i zmierza do ciśnienia panującego w skraplaczach turbin kondensacyjnych [7]. Metodę egzergetyczną można więc zaliczyć do racjonalnych metod podziału kosztów, mimo to jednak nie można tej metody uznać za ścisłą, gdyż pojęcie egzergii nie jest pojęciem ekonomicznym.

Przy rozpatrywaniu elektrociepłowni współpracującej z systemem elektroenergetycznym nie jest w chwili obecnej konieczne stosowanie przybliżonej egzergetycznej metody podziału kosztów wytwarzania, gdyż istnieje metoda Wagnera oparta na przesłankach czysto ekonomicznych i wynikająca z rozważenia warunków współdziałania elektrociepłowni z systemem elektroenergetycznym [7]. Istnieje jednak wiele cieplnych procesów skojarzonych, w których ustalenie czysto ekonomicznych kryteriów podziału kosztów wytwarzania byłoby

bardzo trudne lub niemożliwe. Wystarczy wziąć pod uwagę elektrociepłownię nie współpracującą z systemem elektroenergetycznym lub elektrociepłownię wytwarzającą parę grzewczą o dwu lub więcej poziomach ciśnienia. Można by też wymienić proces rozdzielania powietrza na składniki lub wszelkie procesy energotechnologiczne. We wszystkich takich procesach skojarzonych ustalanie kosztów własnych wytwarzania poszczególnych produktów może być przeprowadzone przez zastosowanie egzergetycznej metody podziału sumarycznych kosztów wytwarzania, przy czym metoda ta jest na pewno bardziej poprawna od innych metod opartych na teoretyczno-technicznych przesłankach, gdyż egzergia pozwala w sposób właściwy ocenić jakość energii.

Kilka dalszych możliwości ekonomicznych zastosowań egzergii wskazano w pracy [3]. Można by tu wymienić np. zagadnienie ekonomicznej grubości izolacji. Ciepło tracone do otoczenia przez gorący nośnik energii lub ciepło pobierane z otoczenia przez nośnik zimna charakteryzuje się jakością znacznie wyższą od przeciętnej jakości dotyczącej danego czynnika termodynamicznego. Ocena strat ekonomicznych spowodowanych przez niedoskonałą izolację za pomocą średniej wartości jednostki energii prowadzi więc do wyników zbyt niskich. Błąd ten można skorygować przez ocenę strat za pomocą egzergii. Również jednak w tym przypadku metoda egzergetyczna nie zapewnia pełnej ścisłości i dokładności.

Dokładność egzergetycznej oceny wartości ekonomicznej nośnika energii można by zwiększyć przez uwzględnienie koncentracji egzergii. W świetle przeprowadzonych wyżej rozważań wartość ekonomiczna jednostki egzergii nie jest stała, zależy od koncentracji egzergii. Charakter tej zależności można orientacyjnie ustalić przez rozpatrzenie przypadków skrajnych. Przy koncentracji egzergii zmierzającej do zera wartość ekonomiczna jednostki egzergii maleje oczywiście także do zera. Widać to choćby na przykładzie wodoru atmosferycznego, który ma małą wartość koncentracji egzergii i któremu z drugiej strony należy przypisać wartość ekonomiczną równą zeru.

Jako drugi przykład skrajny można przytoczyć energię elektryczną, której można przypisać bardzo dużą koncentrację egzergii, przy czym równocześnie jednostce energii elektrycznej odpowiada jednostka egzergii. Mimo to wartość ekonomiczna jednostki energii elektrycznej nie jest nieskończenie wysoka.

Wartość ekonomiczną jednostki egzergii mogłaby więc charakteryzować funkcja, której wartość powinna wynosić zero przy $k_b = 0$. Funkcja ta powinna zmierzać asymptotycznie do wartości stałej przy $k_b \rightarrow \infty$. Dokładniejsze ustalenie postaci tej funkcji wymaga dalszych badań naukowych.

5. Egzergetyczna taryfa opłat za czynnik grzewczy

Problem uwzględnienia koncentracji egzergii przy ekonomicznych zastosowaniach tej funkcji występuje bardzo wyraźnie przy ustalaniu egzergetycznej taryfy opłat za parę i gorącą wodę.

W publikacji [6] wykazano, że obowiązująca obecnie w Polsce taryfa opłat za parę i gorącą wodę nie jest poprawna. Stawki tej taryfy odniesione są do jednostki ciepła (lub entalpii). Założenie takie prowadzi do absurdu w razie zastosowania go do pary lub wody o temperaturze zbliżonej do temperatury otoczenia. (Z obowiązującej taryfy można by na przykład wyciągnąć wnioski, że para, która opuściła turbinę kondensacyjną i płynie do skraplacza ma jeszcze bardzo dużą wartość ekonomiczną).

Wady obowiązującej taryfy można usunąć odnosząc stawki racjonalnej taryfy do jednostki egzergii pary i wody. Zaproponowane przez autora orientacyjne stawki egzergetycznej taryfy opłat za parę podano w tablicy 2. Przy próbach stworzenia egzergetycznej taryfy opłat za gorącą wodę napotyka się jednak na trudności w związku z tym, że gorąca woda ma mniejszą egzergię niż para użyta do produkcji wody. Trudności te wyjaśnia wprowadzone tu pojęcie koncentracji egzergii. Gorąca woda ma znacznie większą koncentrację egzergii niż para. Stawka za jednostkę egzergii gorącej wody powinna być więc wyższa niż stawka za jednostkę egzergii pary.

Tablica 2

Przykładowe stawki egzergetycznej taryfy opłat za parę produkowaną w elektrociepłowniach

Rodzaj poboru i pomiaru	Roczna opłata stała zł/rok za zamówioną wydajność		Opłata zmienna	
	1 GJ egzergii/h	1 Gcal egzergii/h	zł GJ egzergii	zł Gcal egzergii
loco elektrownia	54 200	227 000	27,9	117
franco odbiorca	70 000	293 000	30,8	129

Przy tworzeniu racjonalnej egzergetycznej taryfy opłat za czynnik grzewczy powinno się więc uzależnić stawkę taryfową od koncentracji egzergii ustalonej dla rozpatrywanego czynnika. Wprowadzenie tej zasady mogłoby jednak utrudnić wdrożenie taryfy egzergetycznej do praktyki. Taryfa opłat za czynniki grzewcze powinna mieć możliwie prostą budowę. Przypuszczalnie zwalczenie obowiązującej obecnie błędnej taryfy będzie dość trudne, należy więc na razie starać się oprzeć taryfę racjonalną na jak najprostszycy zasadach.

Aby spełnić to wymaganie zaproponował autor w publikacji [6], by ceny gorącej wody ustalać nie na podstawie egzergii wody, lecz na podstawie egzergii pary zużytej do produkcji gorącej wody.

Egzergia pary zużytej do produkcji gorącej wody została nazwana "egzergią taryfową gorącej wody". Wartości egzergii taryfowej zostały stabelaryzowane po przyjęciu ustalonych założeń. Po wprowadzeniu pojęcia egzergii taryfowej było możliwe wprowadzenie jednolitej stawki taryfowej za jednostkę egzergii czynnika grzewczego.. Za pomocą pojęcia egzergii taryfowej uwzględniono więc w sposób pośredni wpływ koncentracji egzergii na wartość ekonomiczną jednostki egzergii czynnika grzewczego.

LITERATURA

- [1] Z. RANT - Bewertung und praktische Verrechnung von Energien, Allg. Wärmetechn. 8 (1957) nr 2, str. 25/32.
- [2] R.B. SCOTT - Technika niskich temperatur, Warszawa 1963.
- [3] J. SZARGUT - Pojęcie egzergii w odróżnieniu od energii i możliwości praktycznego stosowania egzergii, Energetyka Przemysłowa 10 (1962) nr 11, str. 374/78.
- [4] J. SZARGUT - Bilans eksergetyczny procesów cieplnych, Energetyka Przemysłowa 9 (1961) nr 3, str. 73/79.
- [5] J. SZARGUT, A. ZJĘBIK - Egzergia związków metali nieżelaznych, Rudy i Metale Nieżelazne. (w druku).
- [6] J. SZARGUT - Zagadnienie racjonalnej taryfy opłat za parę i gorącą wodę, Gospodarka Paliwami i Energią 11 (1963) nr 4, str. 132/35.
- [7] J. SZARGUT - Uwagi do artykułu "Zastosowanie egzergii do obliczania kosztów własnych pary i energii elektrycznej w gospodarce skojarzonej", Gospodarka Paliwami i Energią 11 (1963) nr 10, str. 371/372.

КОНЦЕНТРАЦИЯ ЭКСЕРГИИ

Р е з ю м е

Эксергия определяет практическую энергетическую пригодность вещества. Однако возможность практического использования эксергии зависит не только от общего количества эксергии но также от соотношения эксергии к объему. Это соотношение названо автором концентрацией эксергии. В промышленной практике имеются процессы, назначением которых является увеличение концентрации эксергии за счет потери (уменьшения общего количества) эксергии.

Эксергия применяется некогда для приближенного определения экономической стоимости термодинамического вещества. Точность этого определения можно увеличить, учитывая концентрацию эксергии. При нулевой концентрации эксергии экономическая стоимость единицы эксергии равна нулю. При концентрации эксергии стремящейся к бесконечности, стоимость единицы эксергии должна стремиться к конечной величине.

THE CONCENTRATION OF EXERGY

S u m m a r y

The exergy describes the practical energetical value of substance. The possibility of practical utilisation of exergy depends not only on the amount of exergy but also on the exergy to volume ratio. This ratio is called by the author as the "concentration of exergy". In the industrial practice there exists some processes in which the increase of exergy concentration is considered as a main purpose of this particular process. This will be done even in the case when certain amount of exergy is lost.

The exergy concept is sometimes used in determining the economical value of the substance. The increase of accuracy of this determination can be performed by taking the exergy concentration into consideration. In the case when the exergy concentration is zero, the economical value of the exergy unit is equal to zero too. But, if the exergy concentration would be infinitely large, the economical value of the exergy unit tends to be the finite one.