

Egzergia wokół nas

JAN SZARGUT

Institut Technologii Ciepłej
Politechnika Śląska, Gliwice
Komitet Problemów Energetyki PAN
lucyna@itc.polsl.pl

Powszechnie uważa się, że wszystkie procesy w przyrodzie wiążą się ze stratami energii. Z logicznego punktu widzenia interpretacja taka nie jest słuszna. Nie można zniszczyć energii – obowiązuje prawo jej zachowania

Dokładniejsza analiza wykazuje, że w procesach rzeczywistych energia nie zostaje utracona, lecz raczej przekształcona do innej postaci, mniej nadającej się do podtrzymywania procesów. Pojawia się więc potrzeba wprowadzenia nowej wielkości fizycznej w celu scharakteryzowania rozpatrywanych przemian energii. W tym celu J.W. Gibbs, A. Stodola, G. Gouy, J.H. Keenan, F. Bosnjakovic i wielu innych badaczy zaproponowali badanie jakości energii – wielkości mierzącej zdolność do wykonywania pracy użytecznej w otoczeniu naturalnym. W 1956 roku Z. Rant zaproponował wprowadzenie pojęcia egzergii, i nazwa ta wkrótce została powszechnie przyjęta. Zapoczątkowało to badania nowej dziedziny termodynamiki, początkowo w Europie w latach 1950., a z czasem i na skalę światową. Badacze polscy, związani głównie z Politechniką Śląską, zaliczają się do pionierów w tej dziedzinie. Autor niniejszego artykułu początkowo sugerował nazwę „potencjał energetyczny”, a następnie zaakceptował sugestię Ranta. Wielu naukowców uważa, że pojęcie egzergii winno być wprowadzone do programu nauczania szkół średnich, jako że ułatwia ono właściwe rozumienie zasady zachowania energii.

Analiza egzergii opiera się na drugiej zasadzie termodynamiki. Zgodnie z tą zasadą, wszystkie procesy makroskopowe mają charakter nieodwracalny. Z każdym procesem nieodwracalnym wiążą się nieodzyskiwalne straty energii, które wyrazić można poprzez iloczyn temperatury i wytworzonej entropii (sumy wartości przyrostów entropii wszystkich ciał uczestniczących w procesie). Niektóre składniki tej sumy mogą być ujemne, ale ich suma jest zawsze dodatnia.

Przykładami podstawowych procesów nieodwracalnych prowadzących do wzrostu entropii są: tarcie mechaniczne lub hydrauliczne, przepływ ciepła przy skończonym gradientie temperatury, dyfuzja przy skończonym gradientie stężenia, mieszanie substancji o różnych parametrach i różnym składzie chemicznym. Spalanie jest również typowym

procesem nieodwracalnym, jest to złożony proces zawierający w sobie wszystkie uprzednio wymienione nieodwracalności podstawowe.

Każda strata egzergii powoduje zmniejszenie efektu użyteczności danego procesu, albo zwiększone zużycie elementów napędzających proces. W związku z tym Bosnjakovic wystąpił z apelem o badania zmierzające do ograniczenia tej nieodwracalności. Ograniczenie strat energii wymaga zazwyczaj znacznych wydatków inwestycyjnych. Tak więc należałoby uzupełnić apel Bosnjakovica: warto ograniczać nieodwracalność, ale w granicach opłacalności ekonomicznej.

Analiza strat egzergii pozwala określić możliwości udoskonalania procesów cieplnych i wybierać racjonalne systemy ich wykorzystania. Oczywiście jest nieuchronność strat związanych z tarciem. Natomiast potrzeba zmniejszenia strat związanych z nieodwracalnym przepływem ciepła nie zawsze jest oczywista, ponieważ niekiedy można to osiągnąć na drodze modyfikacji schematów stacji energetycznych. Na przykład w stacji energetycznej wyposażonej w kocioł węglowy i turbinę gazową, straty egzergii związane z przepływem ciepła w układzie odzyskiwania ciepła



W każdej elektrowni znaczący ułamek energii paliwa przekształca się w energię wody chłodzącej, która wydalaną jest do otoczenia z wież chłodniczych. Ta część energii cieplnej jest bezużyteczna, a jej emisja nie obniża wydajności energetycznej elektrowni. Głównym źródłem strat ciepła są kotły parowe

Doskonalenie procesów termicznych

turbiny gazowej można ograniczyć przesuwając przegrzewacz pary od kotła węglowego do kotła odzyskowego turbiny gazowej. Wtórny obieg zawsze wiąże się ze stratą egzergii wynikającą z mieszania produktów reakcji z jej surowcami, i zawsze powoduje wydłużenie łańcucha etapów procesu technologicznego.

Egzergia w rachunku ekonomicznym

Koszt wytworzenia użytecznej egzergii rośnie w miarę postępu przemian termodynamicznych. Wynika to z tego, że ilość egzergii użytecznej maleje z powodu niemożliwych do uniknięcia procesów nieodwracalnych, a na każdym szczeblu rozpatrywanego procesu pojawia się kolejny element kosztów, wynikający z konieczności dokonania niezbędnych dla danego szczebla inwestycji.

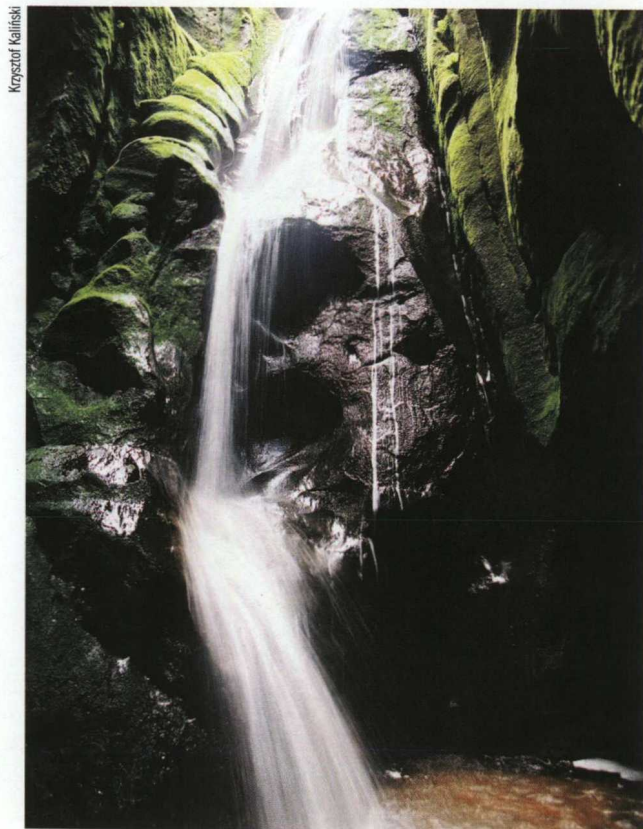
Rozważania na ten temat doprowadziły do sformułowania pewnych nowych koncepcji dotyczących ekonomicznych zastosowań egzergii. W ciągu ostatniego trzydziestolecia powstała nowa dziedzina analizy egzergii, zwana termoekonomią albo egzergonomią. W dziedzinie tej opublikowano już setki prac i liczne podręczniki. Jednakże w opinii autora, egzergia jest wielkością termodynamiczną, a nie ekonomiczną. Teorie egzergonomiczne opierają się za-

wsze na pewnych standardowych założeniach, nie zawsze do końca w pełni świadomie sformułowanych. Dla przykładu, pojawiły się sugestie, by wprowadzić egzergię do określenia podziału kosztów wytwarzania w procesach kogeneracji, czyli jednoczesnego wytwarzania dwóch lub więcej produktów. Sugestie te opierają się na założeniu, że specyficzny koszt produkcji (na jednostkę energii) jest identyczny dla wszystkich produktów w procesie kogeneracji. Założenie takie nie wynika jednakże z żadnych praw naukowych. Warto tu zaznaczyć, że metody optymalizacji i analizy ekonomicznej są już dostatecznie dobrze rozwinięte, i nie ma potrzeby zastępowania ich metodami egzergetycznymi. Ponadto, istnieje już czysto ekonomiczna zasada podziału kosztów w procesach kogeneracji; jest to tak zwana zasada unikania wydatków. Koszt produkcji użytecznego produktu ubocznego należy ocenić na podstawie kosztów możliwych do uniknięcia w całym procesie produkcji dzięki zastosowaniu tego produktu ubocznego w procesie kogeneracji. Wytworzenie tego produktu ubocznego zastępuje produkowanie go w wyspecjalizowanym procesie. Na przykład, wykorzystanie elektryczności z elektrociepłowni i stacji energetycznej zastępuje część energii elektrycznej produkowanej w elektrowniach.

Koszt termoeologiczny

Postępujące zubożenie nieodnawialnych zasobów naturalnych stanowi wielkie niebezpieczeństwo dla przyszłego rozwoju ludzkości. Jakość tych zasobów scharakteryzować możemy pod względem ich egzergii. Autor niniejszego artykułu wprowadził pojęcie kosztu termoeologicznego, który wyznaczony jest przez stosunek całkowitej konsumpcji nieodnawialnej energii do jednostki dowolnego użytkowego produktu. Koszt termoeologiczny powinien uwzględniać również energię nieodnawialną zużywaną dla ochrony środowiska czy też do skompensowania szkodliwych emisji w procesie wytwarzania danego produktu. Podstawowym pytaniem, jakie stoi przed termoeonomią, jest: jak zanalizować i zminimalizować koszt termoeologiczny? Problem ten nie polega na zastąpieniu czy uzupełnieniu klasycznej ekonomii - stojące przed termoeonomią zadanie jest inne. Koszt termoeologiczny mierzony jest nie pieniędzmi lecz jednostkami energii (egzergii).

Gdyby wprowadzono podatek proekologiczny, znaczenie praktyczne kosztu termoeologicznego okazałoby się bardzo duże. Badacze amerykańscy R. Repetto i M. Dover zwrócili uwagę, że podatek od dochodów osobistych obciąża obywateli za pozytywne efekty ich działalności (wydajność pracy, kreatywność). Zasugerowali oni wprowadzenie podatku proekologicznego, zależnego od skażenia środowiska spowodowanego działaniami obywateli. Podatek taki zachęcałby do bardziej racjonalnego użytkowania zasobów naturalnych i lepszej ochrony środowiska. Skażenie środowiska nie jest jednak jedynym ujemnym skutkiem działalności człowieka. Równie szkodliwe jest zubożenie nieodnawialnych zasobów



Energia a egzergia: Gdy woda spada z wodospadu, jej energia potencjalna zamienia się w kinetyczną i dalej w energię cieplną, przy czym całkowita energia zostaje zachowana. Zdajemy sobie jednak sprawę, że coś przy tym tracimy: zdolność do wykonania pracy użytecznej. Ta strata - to właśnie egzergia



Głównym źródłem energii odnawialnej jest promieniowanie Słońca. Warto zauważyć, że również wymiana energii promieniowania z bardzo zimną przestrzenią kosmiczną stanowi źródło egzergii dostarczanej na Ziemię

naturalnych, które określić można przy pomocy pojęcia kosztu termoeologicznego. Inny rodzaj podatku, czyli podatek od wartości dodanej, VAT, zależy od konsumpcji produktów rynkowych. Ograniczenie tej konsumpcji byłoby pożyteczne, ponieważ przyczyniłoby się do zmniejszenia zużycia zasobów naturalnych i skażenia środowiska. Jednakże wysokość podatku VAT wynika jedynie z arbitralnych decyzji administracyjnych, nie poddanych kryterium obiektywności.

Autor proponuje zastąpienie dwóch rodzajów omawianych podatków jednym podatkiem proekologicznym, proporcjonalnym do termoeologicznego kosztu danego produktu rynkowego. Współczynnik proporcjonalności powinien być wyznaczony przez rząd, w zależności od potrzeb danego państwa. Struktura i sposób płacenia takiego podatku mogłyby być takie jak dla VAT. Nowy podatek obciążałby wydobywanie surowców ze złóż naturalnych. Do tego niezbędne byłoby wyznaczenie ich kosztu termoeologicznego. Zawarta by w nim była egzergia surowca oraz składników powstających w procesie wydobywczym. Cena rynkowa każdego produktu (z włączeniem kosztów wydobytego surowca) winna zawierać wartość podatku opłaconego w poprzednich etapach procesu produkcji. W rezultacie każdy producent winien powiększyć cenę sprzedaży swego produktu zgodnie z powiększoną ceną zakupu surowców, nośników energii i narzędzi użytych przy produkcji. Wzrost ceny sprzedażnej wynikający z podatku zawartego w cenie zakupionych narzędzi produkcji powinien być wyznaczony przy pomocy rachunku dyskontowego, ponieważ zwrot tego elementu podatku może nastąpić dopiero po upływie czasu użyteczności narzędzi produkcji.

Autor, wraz ze swymi współpracownikami A. Ziębikiem i W. Stankiem, prowadzi rachunki dotyczące kosztu termoeologicznego i podatku proekologicznego. Bardzo interesujące okazało się porównanie kosztu termoeologicznego ropy naftowej i gazu pochodzących z importu oraz ze źródeł miejscowych. Środki dla sfinansowania importu pochodzą z eksportu. Kiedy produkty eksportowane mają niewielki koszt termoeologiczny (co występuje dla produktów rolnych, leśnych – ale także produktów „wysokiej technologii”), koszt termoeologiczny paliw importowanych może się okazać niższy niż dla paliw krajowych.

Przy wytwarzaniu elektryczności coraz częściej zaczyna się wykorzystywać odnawialne źródła energii. Jednakże taka „czysta” energia elektryczna jest również obciążona pewnymi kosztami termoeologicznymi, ponieważ do wytworzenia niezbędnej aparatury konieczne jest także zużywanie zasobów nieodnawialnych. Tego typu efekty badamy przy pomocy tzw. „life cycle assessment”, biorąc pod uwagę konsumpcję egzergii nieodnawialnej w ciągu całego czasu jaki upływa od wytworzenia do demontażu zużytej aparatury.

Rzut oka w przyszłość

W literaturze światowej wciąż pojawiają się nowe zastosowania analizy egzergii, ale nie wszystkie noszą znamiona racjonalności. Dla przykładu, zastosowania tej analizy w naukach społecznych nie wydają się rozsądne. Dziedzina, w której analiza egzergii może się okazać bardzo interesująca dla młodych badaczy – jest analiza organizmów żywych. Okazuje się, że wydajność egzergetyczna roślin jest bardzo niska. Warto zbadać, co się za tym kryje. Również w organizmie ludzkim mamy do czynienia ze znacznymi stratami egzergii. W dojrzałym organizmie całkowita egzergia pożywienia przekształcona zostaje w znacznie mniejszą egzergię produktów wydalania oraz ciepła uwalnianego do otoczenia. Zmniejszenie tych strat może być interesujące z punktu widzenia zdrowia i konsumpcji żywności. ■

Chcesz wiedzieć więcej?

- Szargut J., Morris D.R., Steward F.R. (1988). *Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes*. New York: Hemisphere Publ. Corp.
- Szargut J. (2003). Anthropogenic and natural exergy losses (exergy balance of the Earth's surface and atmosphere). *Energy, the Intern. Journal*, 28, 1047-1054.
- Szargut J. (1997). Depletion of the unrestoreable natural exergy resources. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences* 45, 241-250.
- Szargut J., Ziebig A., Stanek W. (2002). Depletion of the non-renewable natural exergy resources as a measure of the ecological cost. *Energy Conversion & Management* 42, 1149-1163.
- Szargut J. (2003). Application of exergy for the determination of the pro-ecological tax replacing the actual personal taxes. *Energy* 28, 591-592.
- Szargut J. (2005). *Exergy analysis: technical and ecological applications*. Southampton (UK): WITPress.