

Jan SZARGUT

Instytut Techniki Ciepłej
Politechniki Śląskiej

WSKAŹNIKI SKUMULOWANEGO ZUŻYCIA ENERGII I EGZERGII

Streszczenie. Omówiono zastosowania wskaźników skumulowanego zużycia energii i egzergii. Sformułowano układ równań bilansowych określających te wskaźniki, z uwzględnieniem wpływu półwyrobów importowanych. Omówiono sekwencyjną metodę obliczania wskaźników oraz wynikające z niej wzory przybliżone. Przedstawiono analizę składowych i cząstkowych strat egzergii charakteryzujących wpływ poszczególnych ogniw na niedoskonałość termodynamiczną sieci technologicznej. Omówiono wskaźniki kosztu ekologicznego określające wpływ procesów technologicznych na zmniejszanie zasobów nieodnawialnych bogactw naturalnych.

1. WPROWADZENIE

Wszelkie produkty użyteczne wytwarza się we wzajemnie połączonych łańcuchach technologicznych tworzących sieć technologiczną, która prowadzi od bogactw naturalnych zaczerpniętych z przyrody do rozpatrywanych produktów. Zwiększenie produkcji dowolnego wyrobu wymaga zwiększenia zużycia surowców, półwyrobów i nośników energii we wszystkich ogniwach sieci wytwarzania rozpatrywanego wyrobu. W celu zbadania wpływu wytwarzania danego wyrobu na całość gospodarki surowcowo-energetycznej kraju należy wyznaczyć wskaźniki skumulowanego zużycia surowców i paliw we wszystkich ogniwach rozpatrywanych sieci technologicznych.

W pierwszej kolejności rozwinięło się wyznaczanie wskaźników skumulowanego zużycia energii, nazywane analizą kosztów energetycznych lub przemysłową analizą energetyczną [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Wskaźniki skumulowanego zużycia energii mogą znaleźć następujące zastosowania:

- planowanie niezbędnego zwiększenia produkcji paliw i energii w celu założonego zwiększenia produkcji danego wyrobu,
- porównanie energochłonności różnych technologii wytwarzania tego samego wyrobu i ocena możliwości oszczędzania energii przez zmianę technologii,
- ocena wpływu zmian cen nośników energii na koszty wytwarzania danego wyrobu,
- ocena skumulowanych efektów oszczędzania energii użytkowej,
- porównanie energochłonności dochodu narodowego uzyskanego w różnych gałęziach przemysłu.

Dalsze istotne informacje można uzyskać przez analizę wskaźników skumulowanego zużycia energii [10, 11, 13, 15]. Wskaźnik ten uwzględnia nie tylko zużycie paliw podstawowych, lecz także surowców nieenergetycznych. Przez analizę strat energii w poszczególnych ogniwach sieci technologicznej lub w łańcuchach składowych można badać wpływ nieodwracalności tych ogniw lub łańcuchów składowych na skumulowane zużycie energii [15, 16], co pozwala zorientować się w możliwościach udoskonalania sieci technologicznej. Jeżeli rozpatrywany produkt jest materiałem lub nośnikiem energii, to stosunek jego energii do wskaźnika skumulowanego zużycia energii określa stopień doskonałości termodynamicznej sieci technologicznej. Wskaźnik skumulowanego zużycia energii nieodnawialnych bogactw naturalnych charakteryzuje ponadto wyczerpywanie zasobów tych bogactw, określa więc tzw. koszt ekologiczny [12].

Oprócz wskaźników skumulowanego zużycia energii paliw podstawowych i skumulowanego zużycia energii bogactw naturalnych można w podobny sposób zdefiniować wskaźniki skumulowanego zużycia przetworzonych postaci energii (np. energii elektrycznej), skumulowanego wytwarzania szkodliwych produktów odpadowych i inne wskaźniki skumulowanego zużycia lub wytwarzania [1].

2. DEFINICJA WSKAŹNIKA SKUMULOWANEGO ZUŻYCIA ENERGII I ENERGII

Można wprowadzić średni i graniczny wskaźnik skumulowanego zużycia energii [9, 11]. Ponadto wskaźnik może wyrażać łączne skumulowane zużycie lub skumulowane zużycie dotyczące jednej postaci energii podstawowej. Wskaźnik średni skumulowanego zużycia k-tej energii podstawowej wyraża wzór:

$$w_{kj} = \frac{E_{kj}}{P_j}, \quad (1)$$

gdzie:

P_j - produkcja końcowa j-tego wyrobu, odprowadzona poza granice rozpatrywanego układu,

E_{kj} - zużycie k-tej energii podstawowej w rozpatrywanym układzie wynikające z produkcji j-tego wyrobu.

Bardzo istotne jest sprecyzowanie umowy określającej granice rozpatrywanego układu, gdyż umowa ta decyduje o wartości P_j . Zwykle obejmuje się rozważaniami tylko procesy produkcyjne bez osób zatrudnionych. Rozszerzenie granic układu w celu objęcia nimi również zatrudnionych osób wywołałoby znaczne zmniejszenie wartości P_j , a więc zwiększenie wskaźnika w_{kj} . Ograniczenie układu do zespołu procesów technologicznych ułatwia obliczenie wskaźnika i umożliwia porównywanie jego wartości w krajach różniących się wyraźnie poziomem konsumpcji.

Zwykle oblicza się tylko sumaryczny wskaźnik skumulowanego zużycia energii:

$$w_j = \sum_k w_{kj} \quad (2)$$

Wskaźnik średni może znaleźć zastosowanie np. przy rozwiązywaniu zagadnienia c) wymienionego w punkcie 1. Jednak np. przy rozwiązywaniu zagadnienia a) powinno się uwzględnić wprowadzenie nowych technologii wytwarzania. Można więc zdefiniować graniczny wskaźnik skumulowanego zużycia energii wynikający z przyrostu zużycia k-tej postaci energii na skutek przyrostu produkcji końcowej P_j przy optymalnym wariancie rozwoju gospodarki:

$$\bar{w}_{kj} = \left(\frac{\partial E_k}{\partial P_j} \right)_{\text{opt}} \quad (3)$$

Wskaźnik graniczny \bar{w}_{kj} nie był dotąd obliczany.

W podobny sposób można zdefiniować wskaźnik skumulowanego zużycia energii. Na przykład wskaźnik średni skumulowanego zużycia energii k-tego bogactwa naturalnego wynika ze wzoru:

$$r_{kj} = \frac{B_{kj}}{P_j} \quad (4)$$

gdzie:

B_{kj} - zużycie energii k-tego bogactwa naturalnego w rozpatrywanym układzie wynikające z wytwarzania j-tego wyrobu.

Przy rozpatrywaniu procesów przetwarzania energii można określić skumulowaną sprawność energetyczną jako stosunek energii przetworzonej do skumulowanego zużycia energii podstawowej:

$$\eta^* = \frac{1}{w} \quad (5)$$

gdzie wskaźnik w jest odniesiony do jednostki energii przetworzonej.

Wskaźnik skumulowanego zużycia energii może służyć do oceny skumulowanego stopnia doskonałości termodynamicznej (SSD) wytwarzania materiałów i nośników energii, wyrażonego przez stosunek energii właściwej b do wskaźnika skumulowanego zużycia energii r :

$$\eta_r = \frac{b}{r} \quad (6)$$

Wartość SSD jest tym mniejsza, im bardziej rozległa jest sieć technologiczna. Kilka przykładowych wartości SSD podano w tabelicy 1 [10, 11]. W wielu przypadkach wartość SSD jest bardzo mała, co świadczy o występowaniu znacznych strat energii w ogniwach sieci technologicznej.

Tablica 1

Wskaźnik skumulowanego zużycia energii
i skumulowany stopień doskonałości wytwarzania
niektórych materiałów i nośników energii [10]

Materiał lub nośnik energii	Wskaźnik skumulowanego zużycia energii	Skumulowany stopień doskonałości wytwarzania %
Węgiel kamienny	1,07 kJ/kJ	93,5
Koks metalurgiczny	1,27 kJ/kJ	78,5
Benzyna	1,24 kJ/kJ	80,8
Energia elektryczna	4,12 kJ/kJ	24,3
Tlen dla hutnictwa	2,37 kJ/kmol	1,4
Surówka ciekła	28,6 MJ/kg	30,6
Wyroby stalowe na gorąco	37,0 MJ/kg	19,6
Miedź elektrolityczna	147 MJ/kg	1,5
Kwas azotowy	19,7 MJ/kg	3,6
Metanol	73,0 MJ/kg	30,9
Szkło	34,3 MJ/kg	0,5

3. BILANSOWA METODA OBLICZANIA WSKAŹNIKÓW SKUMULOWANEGO ZUŻYCIA ENERGII I EGZERGII

Wskaźniki skumulowanego zużycia energii i egzergii można wyznaczać w sposób ściślejszy za pomocą układu równań bilansowych [8, 9] lub za pomocą teorii grafów [1, 2]. Obie metody są sobie równoważne. Równania bilansowe wynikają ze stwierdzenia, że skumulowane zużycie obciążające wszystkie produkty użyteczne j-tego procesu jest sumą skumulowanego zużycia obciążającego używane półwyroby oraz bezpośredniego zużycia w tym procesie.

Należy uwzględnić zróżnicowane technologie wytwarzania tych samych wyrobów (np. wytwarzanie energii elektrycznej w elektrowniach węglowych, jądrowych i wodnych). Należy też wyodrębnić półwyroby importowane [14]. W każdym procesie można wyróżnić produkt główny (determinujący lokalizację i wydajność procesu) oraz produkty uboczne, zastępujące produkty główne innych procesów. Jeżeli dwa lub więcej produktów użytecznych nie zastępuje produktów głównych innych procesów, należy je uznać za zespołowy produkt główny. Podział wskaźników skumulowanego zużycia między składniki zespołowego produktu głównego może być tylko umowny. Ostatecznie więc dla k-tej postaci energii podstawowej i l-tej technologii wytwarzania j-tego wyrobu głównego otrzymuje się następujące równanie bilansowe odniesione do jednostki wyrobu głównego:

$$w_{kj}^{(1)} = \sum_i (a_{ij}^{(1)} - f_{ij}^{(1)}) \sum_t x_{it} w_{ki}^{(t)} + \sum_r a_{rj}^{(1)} w_{kr} + \epsilon_{kj}^{(1)}, \quad (7)$$

gdzie:

- $a_{ij}^{(1)}, f_{ij}^{(1)}$ - współczynnik zużycia i-tego półwyrobu krajowego i wytwarzania i-tego produktu ubocznego na jednostkę j-tego wyrobu głównego wytwarzanego wg l-tej technologii¹⁾,
- $a_{rj}^{(1)}$ - współczynnik zużycia r-tego półwyrobu importowanego na jednostkę j-tego wyrobu głównego przy l-tej technologii wytwarzania¹⁾,
- x_{it} - udział t-tej technologii wytwarzania i-tego półwyrobu w gospodarce kraju,
- $\xi_{kj}^{(1)}$ - bezpośrednie zużycie k-tej energii na jednostkę j-tego wyrobu głównego przy l-tej technologii wytwarzania.

Dla każdej k-tej postaci energii otrzymuje się odrębny układ równań, których liczba jest zgodna z liczbą rozpatrywanych technologii. Układy te różnią się tylko wartościami $\xi_{kj}^{(1)}$. W razie obliczania wskaźników sumarycznych należy pominąć indeks "k" w równaniu (7).

Współczynnik wytwarzania produktu ubocznego należy wyrazić w jednostkach zastąpięnego produktu głównego za pomocą stosunku zastępowania:

$$f_{ij}^{(1)} = f_{uj}^{(1)} z_{iu} \quad (8)$$

gdzie:

- $f_{uj}^{(1)}$ - współczynnik wytwarzania u-tego rzeczywistego produktu ubocznego na jednostkę j-tego wyrobu głównego przy l-tej technologii,
- z_{iu} - stosunek zastępowania (liczba jednostek i-tego produktu głównego zastąpiona przez jednostkę u-tego rzeczywistego wyrobu ubocznego).

Po rozwiązaniu układu równań (7) można obliczyć wskaźnik skumulowanego zużycia energii na jednostkę rzeczywistego produktu ubocznego:

$$w_{ku}^{(t)} = w_{ki}^{(t)} z_{iu}. \quad (9)$$

W niektórych przypadkach rzeczywisty produkt uboczny można rozdzielić na dwie lub więcej części zastępujących różne produkty główne innych procesów. Na przykład część podstawowa produkcji gazu wielkopieczowego zastępuje gaz ziemny (zamykający bilans paliw gazowych), część zaś szczytowa zastępuje węgiel kamienny w kotłach dwupaliwowych. W takim przypadku należy przyjąć, że wytwarza się dwa (lub więcej) różne produkty uboczne, do których należy odrębnie zastosować równania (8) i (9).

¹⁾ W procesach skojarzonych współczynniki $a_{ij}^{(1)}, a_{rj}^{(1)}$ określają zużycie brutto na tę ilość wszystkich produktów użytecznych, która przypada na jednostkę produktu głównego.

Określenie wskaźników w_{kr} dotyczących półwyrobów importowanych opiera się na stwierdzeniu, że środki finansowe na import zdobywa się przez eksport wyrobów, które są również w mniejszym lub większym stopniu obciążone energochłonnością skumulowaną. Można więc przyjąć, że obciążenie energochłonnością skumulowaną jest jednakowe na jednostkę dewizową wartości towarów eksportowanych i importowanych [14]:

$$w_{kr} = w_k^{(d)} D_r = \frac{\sum_i S_i \sum_t z_{it} w_{ki}^{(t)}}{\sum_i S_i D_i} D_r = \sum_i \delta_{ir} \sum_t x_{it} w_{ki}^{(t)}, \quad (10)$$

gdzie:

- $w_k^{(d)}$ - obciążenie jednostki dewizowej wyrobów eksportowanych skumulowanym zużyciem k-tej postaci energii,
 D_r - wartość dewizowa jednostki r-tego półwyrobu importowanego,
 S_i, D_i - roczny eksport i-tego wyrobu i jego jednostkowa wartość dewizowa,

przy czym:

$$\delta_{ir} = \frac{S_i D_r}{\sum_i S_i D_i}. \quad (11)$$

Po podstawieniu (10) do (7) otrzymuje się:

$$w_{kj}^{(1)} = \sum_i (a_{ij}^{(1)} - f_{ij}^{(1)} + d_{ij}^{(1)}) \sum_t x_{it} w_{ki}^{(t)} + \varepsilon_{kj}^{(1)}, \quad (12)$$

gdzie:

$$d_{ij}^{(1)} = \sum_r \delta_{ir} a_{rj}^{(1)} = S_i \frac{\sum_r D_r a_{rj}^{(1)}}{\sum_i S_i D_i}. \quad (13)$$

Układ równań (12) obejmuje wszystkie półwyroby krajowe i wyroby gotowe eksportowane. Równania dotyczące wyrobów gotowych nie eksportowanych są niezależne od równań pozostałych i mogą być rozpatrywane po rozwiązaniu układu równań (12).

W niektórych przypadkach półwyrob jest częściowo importowany, częściowo zaś pozyskiwany lub wytwarzany w kraju (np. gaz ziemny). Wówczas należy założyć występowanie dwu różnych półwyrobów, współczynniki zaś zużycia rozdzielić proporcjonalnie do udziału importu i produkcji własnej.

Po rozwiązaniu układu równań (12) można obliczyć wskaźniki dotyczące półwyrobów importowanych za pomocą wzoru (10). Ten sam wzór może służyć do obliczenia wskaźników skumulowanego zużycia energii importowanych wyrobów gotowych, nie zużywanych w krajowych procesach produkcyjnych.

Dogodnie jest ująć układ równań (12) w zapisie macierzowym. W tym celu należy objąć jednolitą numeracją nie tylko wszystkie wyroby, lecz także wszystkie technologie (każdy wyrób miałby więc kilka numerów uwzględniających poszczególne technologie wytwarzania). Wówczas układ równań (12) przyjmie postać:

$$w_{km} = \sum_n (a_{nm} - f_{nm} + d_{nm})w_{kn} + \xi_{km}, \quad (14)$$

gdzie:

$$a_{nm} = x_{it} a_{ij}^{(l)}; \quad f_{nm} = x_{it} f_{ij}^{(l)}; \quad d_{nm} = x_{it} d_{ij}^{(l)}, \quad (15)$$

przy czym każdej wartości j odpowiada kilka wartości m uwzględniających różne technologie (1) oraz każdej wartości i odpowiada kilka wartości n uwzględniających różne technologie (t).

W zapisie macierzowym układ równań (14) ma postać:

$$w(E - A + F - D) = \xi, \quad (16)$$

skąd:

$$w = \xi(E - A + F - D)^{-1}, \quad (17)$$

gdzie:

- E - macierz diagonalna jednostkowa,
- A, F, D - macierze kwadratowe $m \times m$,
- w - macierz prostokątna $k \times m$.

Układ równań (14) jest bardzo rozległy. Dla uproszczenia obliczeń można wg [1] zaproponować metodę przybliżoną, podstawiając we wzorze (10):

$$w_k^{(d)} = \frac{E_k}{(DN)}, \quad (18)$$

gdzie:

- E_k - łączne zużycie k -tej postaci energii w kraju,
- (DN) - wartość dewizowa produktów gotowych zużytych w kraju, łącznie z produktami eksportowanymi.

Wzór (18) pozwala obliczyć a priori wartości w_{kr} ze wzoru (10). Dzięki temu wystarczy sformułować układ równań (12) lub (14) tylko dla półwyrobów krajowych. Równania dotyczące poszczególnych wyrobów gotowych, nie zużywanych w procesach produkcyjnych, są niezależne od pozostałych równań.

Niedokładność opisaney metody wynika stąd, że produkty eksportowane mogą być obciążone energochłonnością skumulowaną różną od średniej energochłonności produktów zużywanych w kraju (w odniesieniu do jednostki wartości dewizowej). Z tego powodu byłoby wskazane zastosowanie iteracyjnej metody obliczeń. Po wykorzystaniu wzorów (18) i (10) należałoby rozwiązać układ równań (12) lub (14), obliczyć wskaźniki energochłonności dla wyrobów gotowych eksportowanych i następnie ponowić obliczenia $w_k^{(d)}$ za pomocą wzoru:

$$\bar{w}_k^{(d)} = \frac{\sum_i S_i \sum_t x_{it} w_{ki}^{(t)}}{\sum_i S_i D_i}, \quad (19)$$

przy czym wartości $w_{ki}^{(t)}$ po prawej stronie wzoru wynikają z pierwszego etapu procedury iteracyjnej.

Obliczenie wskaźnika energochłonności skumulowanej $r_{kj}^{(1)}$ lub r_{km} przebiega w sposób podobny, z tym że do równań bilansowych zamiast bezpośredniego zużycia k-tej postaci energii należy wprowadzić bezpośrednie zużycie k-tej postaci energii $\beta_{kj}^{(t)}$ lub β_{km} . Wzór (17) przyjmuje postać:

$$r = \beta (E - A + F - D)^{-1}, \quad (20)$$

gdzie:

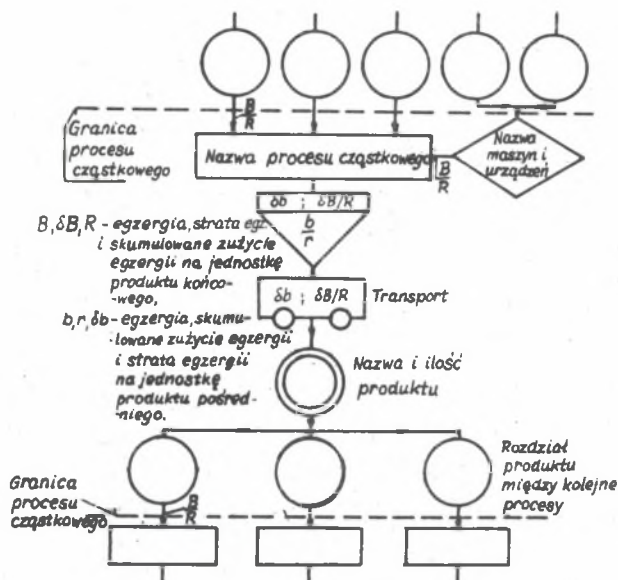
r, β - macierze prostokątne $k \times m$.

Ta sama macierz odwrotna $(E - A + F - D)^{-1}$ może służyć do obliczania dowolnych wskaźników skumulowanego zużycia lub skumulowanego wytwarzania.

4. METODA SEKWENCYJNA OBLICZANIA WSKAŹNIKÓW SKUMULOWANEGO ZUŻYCIA ENERGII LUB EGZERGII

Przybliżone wyniki obliczania wskaźników skumulowanego zużycia energii i egzergii można uzyskać za pomocą metody sekwencyjnej, która polega na analizowaniu kolejnych ogniw sieci technologicznej poczynając od ogniwa końcowego, kończąc zaś na ogniwach pozyskania surowców z przyrody [9]. W metodzie sekwencyjnej utrudnione jest uwzględnienie sprzężeń zwrotnych. Przykładem takiego sprzężenia zwrotnego jest zużywanie energii elektrycznej wytworzonej w elektrowni węglowej do wydobycia i transportu węgla.

Wyniki analizy sekwencyjnej dogodnie jest przedstawiać na schemacie graficznym, którego symbole wg [6] dla jednego ogniwa sieci technologicznej przedstawiono na rys. 1. Schemat ten dotyczy analizy skumulowanego zużycia egzergii. Podobny schemat można sporządzić do analizy skumulowanego zużycia energii.

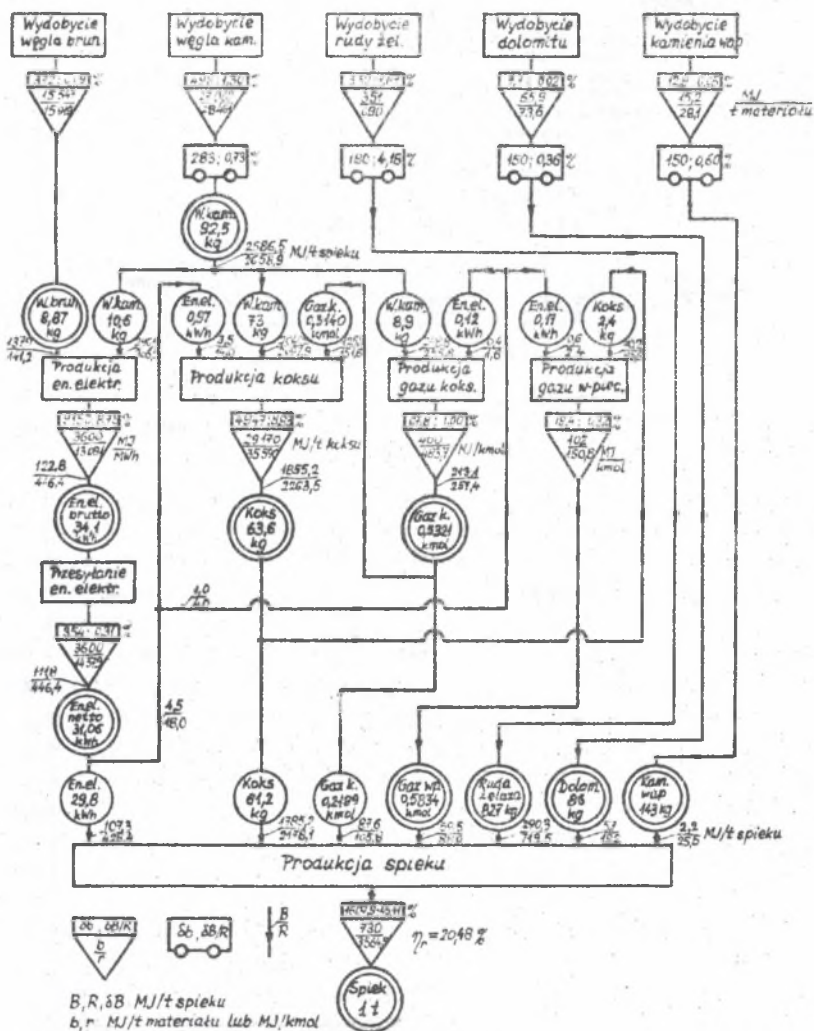


Rys. 1. Schemat sekwencyjny analizy skumulowanego zużycia energii
 Fig. 1. Scheme of the sequence analysis of cumulative exergy consumption

Nazwę rozpatrywanego procesu cząstkowego podaje się w dużym prostokącie. Nazwę oraz ilość doprowadzonych surowców i półwyrobów wpisuje się w okręgach poprzedzających duży prostokąt. W razie potrzeby można uwzględnić również zużycie surowców i półwyrobów na wytworzenie maszyn i urządzeń dla rozpatrywanego procesu cząstkowego. Do dużego prostokąta dołączony jest trójkąt z małym prostokątem. W trójkącie podaje się energię i skumulowane zużycie energii na jednostkę produktu procesu cząstkowego, w małym prostokącie straty energii w procesie cząstkowym również na jednostkę jego produktu. Dodatkowo można podać względne straty energii oraz skumulowany stopień doskonałości wytwarzania produktu pośredniego. Prostokąt z dwoma kółkami zawiera informację o stracie energii na transport rozpatrywanego produktu pośredniego. W podwójnym kole podaje się nazwę i ilość produktu pośredniego na jednostkę produktu końcowego całej analizowanej sieci technologicznej. Rozdział tego produktu pomiędzy kolejne ogniwa sieci podaje się w pojedynczych okręgach. Przy pionowych kreskach podaje się energię i skumulowane zużycie energii na jednostkę produktu końcowego całej sieci.

Na rys. 2 podano przykład analizy sekwencyjnej dotyczący wytwarzania spieku żelazodajnego. Na początku całego schematu występują procesy wydobycia surowców z przyrody. Uwzględniono wytwarzanie energii elektrycznej częściowo z węgla kamiennego, częściowo zaś z węgla brunatnego.

Za pomocą analizy sekwencyjnej można w najprostszych przykładach sformułować przybliżone wzory na skumulowane zużycie energii lub energii.



Rys. 2. Analiza sekwencyjna skumulowanego zużycia egzergii przy produkcji spieku żelazodajnego

Fig. 2. Sequence analysis of the cumulative exergy consumption at the production of iron-ore sinter

Na przykład dla produkcji energii elektrycznej w elektrowniach węglowych wskaźnik skumulowanego zużycia energii paliwa na jednostkę energii elektrycznej można w przybliżeniu wyrazić wzorem:

$$w_{el} = \frac{1}{\eta_{dp}^* \eta_{Eel} \eta_{tp}}, \quad (21)$$

- gdzie:
- η_{dp}^* - skumulowana sprawność energetyczna dostawy paliwa do elektrowni, uwzględniająca zużycie energii przy wydobyciu i transporcie paliwa,
 - η_{Eel} - sprawność energetyczna elektrowni,
 - η_{tp} - sprawność transformacji i przesyłania energii elektrycznej do odbiorców.

Wskaźnik skumulowanego zużycia energii na dostawę ciepła z elektrociepłowni można wg [17] określić w przybliżeniu wzorem:

$$w_g = \frac{1}{\eta_{dp}^* \eta_{Ek} \eta_{pc}} \left[1 - \frac{N_{elb}}{\dot{Q}_{gb}} \left(\frac{\eta_{Ek}}{\eta_{Eel}} - \frac{1}{\eta_{me}} \right) \right], \quad (22)$$

- gdzie:
- η_{Ek} - sprawność energetyczna kotła elektrociepłowni,
 - η_{pc} - sprawność przesyłania ciepła z elektrociepłowni,
 - N_{elb}, \dot{Q}_{gb} - moc elektryczna brutto oddawana z elektrociepłowni i strumień oddawanego ciepła grzejnego brutto,
 - η_{Eel} - sprawność energetyczna elektrowni kondensacyjnej zastąpionej przez elektrociepłownię,
 - η_{me} - sprawność elektromechaniczna turboszespołu elektrociepłowni.

Wzór (22) wynika ze stwierdzenia, że energia elektryczna dostarczana z elektrociepłowni zastępuje częściowo energię elektryczną z elektrowni kondensacyjnych.

5. ANALIZA SKUMULOWANYCH STRAT EGZERGII W SIECIACH TECHNOLOGICZNYCH WYTWARZAJĄCYCH MATERIAŁY I NOŚNIKI ENERGII

Różnica wskaźnika skumulowanego zużycia egzergii i egzergii właściwej produktu wyraża skumulowaną stratę egzergii w całej sieci technologicznej

$$\delta b_{kum} = r - b. \quad (23)$$

W celu uzyskania informacji o możliwościach udoskonalenia sieci technologicznej powinno się przeprowadzić głębszą analizę wpływu poszczególnych ogniw i łańcuchów składowych na SSD całej sieci technologicznej [15, 16].

Różnica $(r - b)$ charakteryzująca poszczególne półwyroby dostarczone do ostatniego ogniwa sieci technologicznej określa składowe straty egzergii wynikające z niedoskonałości składowych sieci technologicznych poprzedzających rozpatrywane ogniwo końcowe.

W procesach skojarzonych część surowców i półwyrobów dopływających do ostatniego ogniwa służy do wytwarzania produktów ubocznych. Powinno się więc wyznaczyć współczynniki A_{nm} zużycia netto surowców i półwyrobów na jednostkę m -tego wyrobu głównego¹⁾

$$A_{nm} = a_{nm} - \sum_u f_{um} A_{nu} = a_{nm} - \sum_p f_{um} z_{pu} A_{np}, \quad (24)$$

gdzie:

p - kolejny numer produktu głównego zastąpionego przez n -ty produkt uboczny,

z_{pu} - stosunek zastępowania p -tego produktu przez u -ty produkt uboczny.

Układ równań (24) pozwala obliczyć współczynniki zużycia netto, przy czym niektóre z nich mogą być ujemne. Współczynniki A_{nm} służą do obliczania składowych strat egzergii:

$$\delta b_{nm} = A_{nm}(r_n - b_n), \quad n \neq m \quad (25)$$

Niektóre z tych strat mogą być ujemne, co wynika stąd, że użytkowanie produktu ubocznego eliminuje straty egzergii w procesie zastąpionym.

Lokalna strata egzergii w końcowym ogniwie sieci technologicznej, wynikająca z jego nieodwracalności, obciąża częściowo produkt główny, częściowo zaś produkty uboczne.

Lokalna strata egzergii obciążająca jednostkę produktu ubocznego wynika nie tylko z lokalnej straty egzergii w procesie zastąpionym, lecz także stąd, że egzergia produktu ubocznego jest różna od egzergii produktu zastąpionego. Można to uwzględnić za pomocą sprawności egzergetycznej zastępowania:

$$\eta_{z_{pu}} = \frac{b_p z_{pu}}{b_u} \quad (26)$$

Stratę lokalną obciążającą jednostkę produktu ubocznego wyraża więc wzór:

$$\delta b_u = z_{pu} \delta b_p - (b_u - z_{pu} b_p) = z_{pu} \delta b_p - (1 - \eta_{z_{pu}}) b_u \quad (27)$$

¹⁾ Zastosowano zapis analogiczny do wzoru (14), przy czym numeracja m, n obejmuje wszystkie półwyroby, łącznie z importowanymi.

Lokalna strata egzergii netto obciążająca jednostkę m-tego produktu głównego wynika z równania:

$$\delta b_m = \delta \beta_m - \sum_u f_{um} \delta b_u = \delta \beta_m - \sum_p f_{um} z_{pu} \delta b_p + \sum_u f_{um} (1 - \eta_{z_{pu}}) b_u, \quad (28)$$

gdzie:

$\delta \beta_m$ - lokalna strata egzergii brutto, wynikająca z bilansu egzergii, odniesiona do tej ilości produktów użytecznych, która przypada na jednostkę m-tego produktu głównego.

Poprawność wzoru (28) można skontrolować rozpatrując przypadek skrajny $\eta_z = 0$, $z = 0$. Wówczas wg (27):

$$\delta b_u = -b_u$$

oraz wg (28):

$$\delta b_m = \delta \beta_m + \sum_u f_{um} b_u \quad (29)$$

W tym przypadku egzergia nie wykorzystanych produktów ubocznych stanowi dodatkową zewnętrzną stratę egzergii w m-tym ogniwie sieci technologicznej.

Cząstkowa strata egzergii $\overline{\delta b_{nm}}$ wyraża lokalną stratę egzergii w n-tym ogniwie sieci technologicznej, wynikającą z wytwarzania jednostki m-tego produktu końcowego. Stratę tę można obliczyć sumując straty cząstkowe związane z dostarczonymi półwyrobami ze stratą lokalną (jeżeli numer kolejny straty lokalnej zgadza się z numerem rozpatrywanego ogniwa). Można więc sformułować układ równań bilansowych, stosując numerację taką, jak w równaniu (24):

$$\overline{\delta b_{nm}} = \sum_p A_{pm} \overline{\delta b_{np}} + \delta_{nm} \delta b_m \quad (30)$$

przy czym:

$$\delta_{nm} = 0 \quad \text{gdy} \quad n \neq m, \quad \delta_{nm} = 1 \quad \text{gdy} \quad n = m.$$

Przykładowe wyniki analizy cząstkowych i składowych strat egzergii podano wg [16] w tablicy 2. Współczynnik ubocznego wytwarzania gazu wielkopięcowego przeliczono na węgiel zastąpiony przez ten gaz. Podobnie przy rozpatrywaniu produkcji koksu przyjęto, że gaz koksowniczy zastępuje gaz ziemny.

Na rys. 2. podano cząstkowe straty egzergii wyznaczone metodą sekwencyjną dla produkcji spieku żelazodajnego.

Analiza składowych i cząstkowych strat egzergii dostarcza informacji o możliwościach poprawy SSD rozpatrywanej sieci technologicznej. Mogą one być następujące:

- 1) zmiana rodzaju półwyrobów (jeżeli składowa strata energii obciążająca dany półwyrob jest szczególnie duża),
- 2) zmiana technologii wytwarzania półwyrobu (jak wyżej),
- 3) zmniejszenie nieodwracalności ogniwa sieci (jeżeli strata cząstkowa obciążająca dane ogniwo jest szczególnie duża).

Tablica 2

Cząstkowe i składowe straty energii przy produkcji ciekłej surówki [16]

$$b = 8750 \text{ MJ/t}, \quad r = 25870 \text{ MJ/t}, \quad \eta_r = 33,8\%$$

Nazwa procesu	Cząstkowa strata energii		Składowa strata energii	
	MJ/t	% ¹⁾	MJ/t	% ¹⁾
Wydobycie i transport węgla ²⁾	789	3,1	-216	-0,8
Wydobycie i transport surowców technologicznych	746	2,9	98	0,4
Produkcja i transmisja energii elektrycznej	806	3,1	26	0,1
Produkcja koksu ³⁾	3418	13,2	3845	14,8
Produkcja gazu koksowniczego ⁴⁾	54	0,2	19	0,1
Produkcja gazu wielkopieczowego	64	0,2	-	-
Wydobycie i transport gazu ziemnego	68	0,3	68	0,3
Produkcja pary technologicznej	1029	4,0	-	-
Produkcja i sprężanie tlenu	181	0,7	539	2,1
Sprężanie dmuchu	112	0,4	1009	8,9
Produkcja spieku	2539	9,8	4417	17,0
Produkcja surówki	7318	28,3	7318	28,3

¹⁾ Ułamek procentowy skumulowanego zużycia energii.

²⁾ Ocenione sumarycznie bez podziału na rodzaje zużytej energii.

³⁾ Razem z produkcją paliw gazowych dla procesu koksowniczego.

⁴⁾ Dotyczy gazu używanego przy produkcji surówki.

6. WSKAŹNIKI KOSZTU EKOLOGICZNEGO

Sumaryczny wskaźnik skumulowanego zużycia energii obejmujący nieodnawialne bogactwa naturalne charakteryzuje zmniejszanie zasobów tych bogactw wynikające z realizowania procesów wytwarzania. Oprócz bezpośredniego czerpania bogactw naturalnych z przyrody do zmniejszenia ich zasobów przyczynia się również oddziaływanie szkodliwych produktów odpadowych, które mogą przyspieszać destrukcję wytworów pracy ludzkiej, zmniejszać produkcję rolno-leśną, niekorzystnie oddziaływać na zasoby bogactw naturalnych i niekorzystnie

wpływać na zdrowie ludzkie. Wskaźniki skumulowanego zużycia nieodnawialnych bogactw naturalnych uwzględniający wpływ odpadowych produktów szkodliwych nazwano wskaźnikiem kosztu ekologicznego [12].

Wskaźnik φ_m kosztu ekologicznego można obliczać za pomocą układu równań bilansowych wynikających z uzupełnienia równań (14):

$$\varphi_m = \sum_n (a_{nm} - \bar{f}_{nm} + d_{nm} + \sum_k B_{km} x_{nk}) \varphi_n + \sum_k B_{km} (\sum_s y_{sk} + z_k) + \sum_s B_{sm} \quad (31)$$

gdzie:

- B_{sm} - bezpośrednie zużycie brutto energii s-tego nieodnawialnego bogactwa naturalnego na jednostkę m-tego produktu głównego,
- B_{km} - energia k-tego szkodliwego produktu odpadowego na jednostkę m-tego produktu głównego,
- x_{nk} - współczynnik destrukcji n-tego produktu użytecznego na jednostkę energii k-tego szkodliwego produktu odpadowego,
- y_{sk} - współczynnik destrukcji s-tego bogactwa naturalnego na jednostkę energii k-tego szkodliwego produktu odpadowego,
- z_k - mnożnik nakładów energetycznych na usunięcie skutków pogarszania zdrowia ludzi.

Współczynniki destrukcji można zdefiniować następująco:

$$x_{nk} = \frac{\delta_{n,k}}{B_k}; \quad y_{sk} = \frac{\delta_{s,k}}{B_k} \quad (32)$$

gdzie:

- $\delta_{n,k}$ - liczba jednostek zniszczonego n-tego produktu użytecznego,
- $\delta_{s,k}$ - energia zniszczonego s-tego bogactwa naturalnego.

Współczynnik x_{nk} może uwzględniać również zmniejszenie produkcji rolno-leśnej. Mnożnik z_k wyraża skumulowane nakłady energetyczne na usunięcie skutków pogorszenia zdrowia ludzi, w odniesieniu do jednostki energii k-tego szkodliwego produktu odpadowego.

Wskaźniki kosztu ekologicznego mogą służyć do optymalizacji procesów wytwarzania w celu zminimalizowania wyczerpywania zasobów nieodnawialnych bogactw naturalnych. Stopień szkodliwości dla tych zasobów można wyrazić za pomocą sprawności ekologicznej:

$$\eta_{\varphi} = \frac{b}{\varphi}. \quad (33)$$

Wskaźnik ten można obliczać tylko dla wytwarzania materiałów i nośników energii.

7. WNIOSKI

7.1. Analizę skumulowanego zużycia energii i egzergii można przeprowadzać podobnymi metodami, za pomocą układu równań bilansowych lub w sposób przybliżony za pomocą analizy sekwencyjnej. Ta sama macierz występująca w równaniu (17) może służyć do obliczania wskaźników skumulowanego zużycia energii, egzergii i wielu innych wskaźników skumulowanych (np. wskaźników wytwarzania szkodliwych produktów ubocznych).

7.2. Wskaźniki skumulowanego zużycia energii dostarczają informacji o wpływie wytwarzania poszczególnych wyrobów na całość gospodarki energetycznej kraju.

7.3. Wskaźniki skumulowanego zużycia egzergii mogą służyć do tych samych celów co wskaźniki skumulowanego zużycia energii, a ponadto informują o stopniu doskonałości termodynamicznej wytwarzania materiałów i nośników energii i dają podstawę do analizowania skumulowanych strat egzergii.

7.4. Analiza składowych i cząstkowych strat egzergii dostarcza informacji o możliwościach udoskonalania sieci technologicznych prowadzących od surowców zaczerpniętych z przyrody do produktów końcowych.

7.5. Analizę wskaźników skumulowanego zużycia egzergii można uzupełnić analizą szkodliwego oddziaływania produktów odpadowych, dochodząc w ten sposób do wskaźników kosztu ekologicznego, które charakteryzują wpływ procesów wytwarzania na zmniejszanie zasobów nieodnawialnych bogactw naturalnych.

LITERATURA

- [1] Baładynowicz H.: Model strukturalny systemu paliwowo-energetycznego i badania skumulowanej transformacji czynników wejściowych na wyjściowe. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Energetyczny 1987.
- [2] Bibrowski Z. (red.): Energochłonność skumulowana. PWN, Warszawa 1983.
- [3] Boustead I., Hancock G.H.: Handbook of Industrial Energy Analysis. Ellis Harwood, Chichester 1979.
- [4] Chapman P.F.: Energy costs: a review of methods. Energy Policy, 2 (1974) nr 2, s. 91-103.
- [5] Chapman P.F., Leach G., Slessor M.: The energy cost of fuels, Energy Policy 2 (1974) nr 3, s. 231-243.
- [6] Guidelines of Energy Analysis. International Federation of Institutes of Advanced Study, Stockholm 1974.
- [7] Leach G.: Energy and Food Production. IPC Science and Technology Press for the International Institute of Environment and Development, Guildford 1976.
- [8] Szargut J.: Problemy obliczania i stosowania wskaźników ciągnionego zużycia energii. Arch. Energetyki, 1979, nr 4, s. 167-180.
- [9] Szargut J.: Analiza termodynamiczna i ekonomiczna w energetyce przemysłowej. WNT, Warszawa 1983.

- [10] Szargut J.: Doskonałość termodynamiczna wytwarzania materiałów i energii użytkowej. Energetyka XXXIX (1985), nr 12, s. 485-488.
- [11] Szargut J., Morris D.R.: Cumulative exergy consumption and cumulative degree of perfection of chemical processes. Energy Research 11 (1987), s. 245-261.
- [12] Szargut J.: Application of exergy for the calculation of ecological cost. Bull. Pol. Acad.: Techn, 34 (1986), nr 7-8, s. 475-480.
- [13] Szargut J.: Analiza egzergochłonności skumulowanej. Arch. Energetyki XVI, (1987), nr 3, s. 227-236.
- [14] Szargut J.: Influence of the imported goods on the cumulative energy indices. Bull. Pol. Acad.: Techn. 35 (1987), nr 9-10, s. 591-595.
- [15] Szargut J.: Analysis of the cumulative exergy losses in the chains of technological processes. Bull. Pol. Acad.: Techn. 36(1988), nr 9-10, s. 117-125.
- [16] Szargut J., Majza E.: Thermodynamic imperfection and exergy losses at the production of pig-iron and steel. Arch. Hutnictwa 1989, nr 2, s. 197-216.
- [17] Szargut J.: Skumulowane wskaźniki energetyczne charakteryzujące dostawę ciepła z elektrociepłowni, Energetyka 1989, nr 3, s. 77-80.

ПОКАЗАТЕЛИ КУМУЛИРОВАННОГО РАСХОДА ЭНЕРГИИ И ЭКСЕРГИИ

Р е з ю м е

В работе представлено применение показателей кумулированного расхода энергии и эксергии. Сформулирована система балансных уравнений, определяющих эти показатели с учетом влияния импортных полупродуктов. Обсужден последовательный метод расчёта показателей и вытекающие из него приближенные формулы. Представлен анализ составных и парциальных потерь эксергии, характеризующих влияние отдельных звеньев технологической сети на степень её термодинамического несовершенства. Обсуждены показатели экологической стоимости, определяющие влияние технологических процессов на истощение ресурсов естественных богатств.

INDICES OF THE CUMULATIVE CONSUMPTION
OF ENERGY AND EXERGY

S u m m a r y

The applications of the indices of cumulative energy- and exergy consumption have been presented. The set of balance equations determining these indices, has been formulated, taking into account the influence of the imported semi-finished products. The sequence method of calculation and the approximate formulae resulting from this method have been discussed. The constituent and partial exergy losses, characterizing the influence of particular links of the technological grid on its thermodynamic imperfection, have been analysed. The indices of ecological cost determining the influence of technological processes on the exhaustion of natural resources have been discussed.