

Określanie zużycia energii pierwotnej dla wyrobów i nośników energii

1. Potrzeba określania zużycia energii pierwotnej

W analizach z zakresu zużycia nośników energii końcowej trzeba mieć na uwadze nie tylko procesy ich końcowego wykorzystania, lecz również wszystkie procesy wcześniejsze, które były niezbędne, aby dany nośnik znalazł się w odpowiedniej ilości i o odpowiedniej jakości do zapewnienia przebiegu procesów (spełnienia funkcji) u określonego użytkownika. Na pozyskanie oraz na przetworzenie i dostarczenie do odbiorców nośniki energii wymagają poniesienia pewnych nakładów energetycznych, czasami znacznych (jak w przypadku energii elektrycznej). Znajomość tych informacji jest niezbędna do określania zużycia energii pierwotnej, co może mieć wpływ na dokonanie wyboru odpowiednich nośników energii do spełnienia potrzebnych funkcji oraz wcześniej do dokonania doboru wyposażenia technicznego zużywającego energię i parametrów jego funkcjonowania. Podczas projektowania i eksploatacji ta znajomość może się również okazać użyteczna do zapewnienia nie tylko odpowiedniego przebiegu prowadzonych procesów i niskich wydatków na energię, lecz również minimalizacji oddziaływania na środowisko.

Podobnie, każda działalność gospodarcza prowadzona w celu wytwarzania wyrobów wymaga poniesienia znacznych nakładów energetycznych niezbędnych na pozyskanie surowców, ich wstępne przetwarzanie, transport do zakładu produkującego półprodukty lub produkty końcowe (wyroby), wprowadzenie wyrobów za pośrednictwem środków transportu do systemu dystrybucji, skąd trafiają do nabywców i przyszłych użytkowników. We wszystkich procesach produkcyjnych są zużywane nośniki energii, które w sumie tworzą pewien nakład energetyczny wnoszony wraz z wyrobami w postaci energii pierwotnej. Również wytwarzanie usług zużywających nośniki energii w podobny sposób wnosi określony nakład energetyczny wymagający uwzględnienia.

Ten nakład energetyczny jest w praktyce obliczeniowej określany za pomocą wskaźników skumulowanego zużycia energii: na wytworzenie wyrobów, na wytworzenie nośników energii, na jednostkę pracy transportowej. Wskaźniki skumulowanego zużycia energii pozwalają w prosty sposób uwzględnić funkcjonowanie systemu gospodarczego, odpowiednio: energetycznego, przemysłowego i transportu. Wskaźniki skumulowanego zużycia energii na pozyskanie odpowiednich nośników energii końcowej określa się zarówno w przypadku energii nieodnawialnej, jak i odnawialnej.

2. Skumulowane zużycie energii

Działalność gospodarcza jest prowadzona w wielu gałęziach wzajemnie współdziałających przez sieci powiązań technologicznych i energetycznych. Energia jest zużywana w procesie bezpośredniego wytwarzania danego wyrobu (także nośnika energii), jak również w procesach wcześniejszych oraz przebiegających równolegle i powiązanych z wytwarzaniem tego wyrobu. Surowce niezbędne do wytworzenia danego produktu

użytecznego oraz materiały, półprodukty i nośniki energii powstają bowiem również w procesach zużywających nośniki energii. Odbywa się to w procesach [4]:

- pozyskania surowców energetycznych i nieenergetycznych,
- wytwarzania materiałów i półwyrobów,
- przetwarzania surowców energetycznych,
- transportu surowców, materiałów, półwyrobów i nośników energii,
- budowy obiektów i urządzeń, w których jest wytwarzany dany wyrób oraz są zużywane materiały i półwyroby,
- podczas przygotowania i realizacji dystrybucji wyrobów.

W efekcie zużycie energii charakteryzujące dany materiał lub wyrób powstaje nie tylko w bezpośrednim procesie wytwórczym, lecz również w wielu procesach wcześniejszych, stanowiących ogniwa sieci technologicznej prowadzące do wytworzenia danego wyrobu. Sumaryczne zużycie energii powstające we wszystkich etapach procesów wytwórczych i transportowych prowadzących do wytworzenia rozpatrywanego wyrobu nazywa się *skumulowanym zużyciem energii*.

Skumulowane zużycie energii charakteryzujące wyroby przemysłowe określa się za pomocą odpowiednich wskaźników zużycia energii. *Wskaźnik skumulowanego zużycia energii* na jednostkę k -tego wyrobu można zdefiniować wzorem

$$e_k = \frac{E}{G_k} \quad (1)$$

gdzie: E – skumulowane zużycie energii na wytworzenie k -tego wyrobu, G_k – produkcja netto k -tego wyrobu (z odliczeniem zużycia na potrzeby własne).

W tabeli 1 zamieszczono wskaźniki skumulowanego zużycia energii dla wybranych wyrobów budowlanych według [95].

Tabela 1. Wskaźniki skumulowanego zużycia energii na wytworzenie wybranych wyrobów budowlanych [95]

Wyrób	Wskaźnik e_k MJ/kg
Blacha stalowa	60,000
Błoczek gazobetonowy	0,794
Cegła silikatowa	7,500
Cement portlandzki	6,300
Dachówka ceramiczna	3,650
Drewno budowlane	0,500
Farba	29,500
Papa	7,500
Płyty dachowe (Protan FP)	23,040
Porotherm	3,616
Stal zbrojeniowa	45,000
Styropian	82,000
Szkoło budowlane	38,930
Wełna mineralna	20,750
Zaprawa murarska	1,220
Żwir budowlany	0,034

Na podstawie wzoru (8.1) i wskaźników podanych w tab. 8.1 można określić skumulowane zużycie energii, które było wykorzystane do wytworzenia danego wyrobu. Gdy wyrobem jest k -ty nośnik energii, wówczas wskaźnik skumulowanego zużycia energii e_k na jego wytworzenie można przedstawić wzorem

$$e_k = \frac{E}{E_k} \quad (2)$$

gdzie: E – sumaryczne zużycie energii w sieci procesów wytwórczych i transportowych związane z wytworzeniem k -tego nośnika energii, E_k – ilość wytworzonego k -tego nośnika energii.

Skumulowaną sprawność energetyczną pozyskania, przetworzenia i dostarczenia nośnika k do miejsca wykorzystania (przemiana, procesy użytkowe) określa wzór

$$\eta_k^* = \frac{E_k}{E} = \frac{1}{e_k} \quad (3)$$

gdzie: η_k^* – skumulowana sprawność energetyczna pozyskania, przetworzenia i dostarczenia k -tego nośnika do miejsca wykorzystania.

W tabeli 2 zamieszczono wartości skumulowanych, uśrednionych w skali kraju sprawności η_k^* pozyskania i dostarczenia do miejsca przemiany dla najczęściej występujących nośników energii (wartości zebrane w [38]).

Tabela 2. Wskaźniki skumulowanego zużycia energii e_k na pozyskanie i dostarczanie nośników energii do miejsca wykorzystania lub miejsca przemiany [38]

Paliwo	Wskaźnik e_k MJ/MJ	Skumulowana sprawność η_k^*
Gaz ziemny	1,02	0,980
Węgiel brunatny	1,083	0,923
Węgiel kamienny	1,064	0,940
Koks	1,310	0,760
Gaz koksowniczy	1,020	0,760
Energia elektryczna	3,360	0,2976
Ropa naftowa	1,018	0,9823
Olej opałowy	1,188	0,8418
Energia elektryczna (odbiorca)	3,830	0,2610
Energia elektryczna (elektrownia)	3,360	0,2976
Ciepło (elektrociepłownia)	1,230	0,8130
Ciepło (ciepłownia)	1,570	0,6370
Gaz ciekły	1,241	0,8058
Benzyna	1,238	0,8078
Drewno* (wierzba z upraw energetycznych)	1,036	0,9650

* Według danych autora opracowanych na podstawie [12] dla wierzby z upraw energetycznych.

Pojęcie wskaźnika zużycia energii stosowane w analizach energetycznych jest ściśle związane z funkcją użytkową nośników energii. Wskaźnik zużycia energii jest określany jako ilość energii niezbędnej do realizacji danej funkcji, na przykład: energia zużyta do ogrzewania 1 m² powierzchni użytkowej (MJ)/(m²·rok), ilość energii zużytej do wytworzenia 1 Mg lub 1 kg cementu, stali, szkła (MJ/kg), czy ilość energii pierwotnej

niezbędna do wytworzenia jednostki energii (MJ/MJ, kWh/MJ). Funkcją użytkową energii jest w pierwszym przypadku ogrzewanie budynku według odpowiednich wymagań, w pozostałych wytworzenie jednostki ilości wyrobu.

Dla gałęzi gospodarczych wytwarzających produkty finalne wskaźnik skumulowanego zużycia energii jest miernikiem efektywności energetycznej wytwarzania tych produktów. Jest wykorzystywany jako miara energochłonności produkcji poszczególnych wyrobów lub całych gałęzi przemysłu. Inaczej, wyraża efektywność energetyczną na poziomie gospodarki krajowej w odniesieniu do danego wyrobu.

3. Skumulowane obciążenie środowiska

Podobnie jak w przypadku zużycia energii obciążenie środowiska generowane w procesie bezpośredniego wytwarzania danego nośnika energii odbywa się także w procesach wcześniejszych oraz przebiegających równolegle i powiązanych z wytwarzaniem tego wyrobu. Surowce niezbędne do wytworzenia danego produktu użytecznego oraz materiały, półprodukty i nośniki energii powstawały bowiem również w procesach, w których generowane były określone obciążenia środowiska.

W efekcie obciążenie środowiska charakteryzujące dany materiał lub wyrób powstaje nie tylko w bezpośrednim procesie wytwórczym, lecz również w wielu do wytworzenia danego wyrobu. Sumaryczne obciążenie środowiska danego rodzaju powstające we wszystkich etapach procesów wytwórczych i transportowych prowadzących do wytworzenia rozpatrywanego wyrobu nazywa się *skumulowanym obciążeniem środowiska*.

Skumulowane obciążenie środowiska charakteryzujące wyroby przemysłowe określa się za pomocą odpowiednich wskaźników obciążenia. *Wskaźnik i -tego skumulowanego obciążenia środowiska na jednostkę k -tego wyrobu* można zdefiniować wzorem

$$\beta_{ik} = \frac{O_i}{G_k} \quad (4)$$

gdzie: O_i – sumaryczne i -te obciążenie środowiska powstające w sieci procesów wytwórczych i transportowych związane z wytworzeniem k -tego wyrobu w rozpatrywanym okresie, G_k – ilość masy k -tego wyrobu, β_{ik} – wskaźnik skumulowanego obciążenia środowiska określający ilość zanieczyszczenia danego rodzaju na jednostkę wyrobu, kg substancji zanieczyszczającej/kg wyrobu.

Jeżeli wyrobem jest nośnik energii, to zamiast G_k podstawiamy ilość k -tego nośnika energii, a wskaźnik skumulowanego obciążenia środowiska ma postać

$$\beta_{ik} = \frac{O_i}{E_k} \quad (5)$$

gdzie E_k – ilość k -tego nośnika energii.

Podobnie jak wskaźniki skumulowanego zużycia energii dostępne są wskaźniki skumulowanej emisji zanieczyszczeń β_{ik} , których wartości dla podstawowych nośników energii podano w tab. 8.3.

Wskaźniki skumulowanego zużycia energii e_k , skumulowanej sprawności energetycznej η_k^* oraz skumulowanej emisji zanieczyszczeń β_k są niezbędne do oceny obciążenia środowiska wynikającego z prowadzenia działalności gospodarczej.

4. Nakład nieodnawialnej energii pierwotnej na wytworzenie i dostarczenie nośnika energii do miejsca wykorzystania

W rozporządzeniu [R11] Ministra Infrastruktury z 6 listopada 2008 r. w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku i lokalu mieszkalnego lub części budynku stanowiącej samodzielną całość techniczno-użytkową oraz sposobu sporządzania i wzorów świadectw i ich charakterystyki energetycznej do obliczania zużycia energii pierwotnej zamiast skumulowanej sprawności energetycznej wprowadzono wielkość nazwaną współczynnikiem nakładu w_i nieodnawialnej energii pierwotnej na wytworzenie i dostarczenie nośnika energii (lub energii) końcowej do ocenianego budynku, który określa dostawca energii.

Gdy znane jest roczne zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i wentylacji oraz łącznie na napędy elektryczne, wówczas nakład nieodnawialnej energii pierwotnej oblicza się według wzoru

$$Q_{P,H} = w_H Q_{K,H} + w_{el} E_{el,H} \quad (6)$$

gdzie: $Q_{K,H}$ – roczne zapotrzebowanie na energię końcową przez system grzewczy i wentylacyjny do ogrzewania i wentylacji, kWh/rok, $E_{el,H}$ – roczne zapotrzebowanie na energię elektryczną końcową do napędu urządzeń pomocniczych systemu ogrzewania i wentylacji, kWh/rok, w_H – współczynnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej na wytworzenie i dostarczenie nośnika energii (lub energii) końcowej do ocenianego budynku do ogrzewania i wentylacji, w_{el} – współczynnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej na wytworzenie i dostarczenie energii elektrycznej na napęd urządzeń w systemie ogrzewania i wentylacji.

Wskaźnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej na wytworzenie i dostarczenie k -tego nośnika energii bezpośrednio do miejsca wykorzystania można zdefiniować następująco

$$w_k = \frac{E_{P,N}}{E_k} \quad (7)$$

gdzie: $E_{P,N}$ – nakład nieodnawialnej energii pierwotnej na wytworzenie i dostarczenie energii do miejsca wykorzystania, E_k – ilość k -tego nośnika energii.

W tabeli 4 zamieszczono (wg [R9]) współczynniki nakładu w_i nieodnawialnej energii pierwotnej na wytworzenie i dostarczenie nośników energii występujących w obiektach budowlanych do miejsca użytkowania.

Do obliczenia wskaźników zużycia energii pierwotnej EP i końcowej EK niezbędna jest znajomość wielkości zapotrzebowania na energię określanych zwykle przy rozpatrywaniu charakterystyki energetycznej budynku, są to:

- zapotrzebowanie na energię użytkową Q_h [kWh/rok] do ogrzewania, wentylacji – wielkość zależna głównie od wymiarów, kształtu i jakości energetycznej przegród zewnętrznych budynku,
- zapotrzebowanie na energię końcową Q_K [kWh/rok] do ogrzewania, wentylacji i przygotowania ciepłej wody, wielkość zależna głównie od wielkości Q_h oraz od zastosowanych w budynku technik instalacyjnych i jakości ich wykonania,
- zapotrzebowanie na energię pierwotną Q_P [kWh/rok], wielkość zależna głównie od wielkości Q_K oraz od techniki

Tabela 3. Wskaźniki skumulowanych emisji zanieczyszczeń przy spalaniu paliw [37]

Skumulowane wskaźniki emisji zanieczyszczeń przy spalaniu paliw β_{ik} , g/MJ								
Paliwo	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	NO _x	CO	NM VOC	SO ₂	PM ₁₀
Olej opałowy	75,83	0,021	0,00060	0,076	0,0099	0,0702	0,059	0,0018
Olej napędowy	76,70	0,021	0,00059	0,091	0,0117	0,0702	0,107	0,0070
Olej opałowy ciężki	81,08	0,023	0,00060	0,192	0,0182	0,0712	1,051	0,0257
Węgiel kamienny	85,17	0,2610	0,00747	0,164	0,1440	0,0181	0,791	0,0875
Węgiel brunatny	97,88	0,0010	0,00800	0,060	0,0300	0,0024	0,360	0,0257
Koks	117,25	0,3360	0,00005	0,176	0,1485	0,0319	0,717	0,0105
Drewno i torf*	97,99	0,0006	0,00200	0,112	0,0180	0,0250	0,220	-
LPG	67,81	0,0190	0,00009	0,092	0,0069	0,0656	0,014	0,0030
Gaz ziemny	53,38	0,1120	0,00010	0,093	0,0027	0,0090	0,002	0,0011
Biogaz	0,00	0,6150	0,00000	0,897	0,1649	0,0473	0,000	0,0058
Benzyna	73,23	0,0210	0,00003	0,088	0,0116	0,0702	0,048	0,0058
Olej odpadowy	78,74	0,0010	0,00000	0,535	0,0843	0,0031	0,590	0,0000
Olej napędowy (kolej)	76,70	0,0240	0,02623	0,780	0,4279	0,3544	0,107	0,0070
Żegluga przybrzeżna	76,70	0,0230	0,00439	1,544	0,2248	0,2408	0,469	0,0249
Transport wodny kontenerowy	76,70	0,0270	0,00439	1,260	0,1681	0,1144	0,469	0,0249
Gaz koksowniczy	69,03	0,3340	0,00005	0,086	0,0049	0,0305	0,431	0,0016
Transport drogowy	76,70	0,0270	0,02063	1,003	0,5633	0,2802	0,107	0,0954

Tablica 4. Współczynnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej na wytworzenie i dostarczenie nośnika energii do budynku, wg [R9]

Nośnik energii końcowej		Współczynnik nakładu w_i
Paliwo/źródło energii	olej opałowy	1,1
	gaz ziemny	1,1
	gaz płynny	1,1
	węgiel kamienny	1,1
	węgiel brunatny	1,1
	biomasa	0,2
	kolektor słoneczny termiczny	0,0
Ciepło z kogeneracji ¹⁾	węgiel kamienny, gaz ziemny ³⁾	0,8
	energia odnawialna (biogaz, biomasa)	0,15
Systemy ciepłownicze lokalne	ciepło z ciepłowni węglowej	1,3
	ciepło z ciepłowni gazowej/olejowej	1,2
	ciepło z ciepłowni na biomasę	0,2
Energia elektryczna	produkcja mieszana ²⁾	3,0
	systemy PV ⁴⁾	0,70

¹⁾ skojarzona produkcja energii elektrycznej i ciepła, ²⁾ dotyczy zasilania z sieci elektroenergetycznej systemowej, ³⁾ w przypadku braku informacji o parametrach energetycznych ciepła sieciowego z elektrociepłowni (kogeneracja) przyjmuje się $w_H = 1,2$, ⁴⁾ ogniwa fotowoltaiczne (produkcja energii elektrycznej z energii słonecznej); kolektor słoneczny termiczny: $w_x = 0,0$.

wytwarzania i dostarczania nośników energii końcowej, zwykle ciepła i energii elektrycznej.

Istnieje zasadnicza różnica między wskaźnikiem nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej w_k a wskaźnikiem skumulowanego zużycia energii e_k . Ten ostatni wyraża pełny nakład energii pierwotnej na wytworzenie i dostarczenie energii do miejsca wykorzystania, bez różnicowania, z jakiego źródła ta energia pochodzi. Wskaźnik skumulowanego zużycia energii e_k jest zawsze większy od jedności (tab. 2), podczas gdy zalecana wartość wskaźnika nakładu na przykład dla biomasy wynosi $w_i = 0,2$ kJ/kJ (patrz tab. 4). W tym przypadku wartość liczbowa w_i można interpretować jako nakład nieodnawialnej energii pierwotnej niezbędny do wytworzenia 1 kJ energii określanej według wartości opałowej drewna.

W określeniu zużycia nieodnawialnej energii według rozporządzenia [R10] zawarta jest decyzja administracyjna uwzględniająca jakość energii zużywanej w obiekcie, ponieważ ma on służyć polityce energetycznej ukierunkowanej na potrzebę zwiększenia zużycia energii odnawialnej.

5. Skumulowana sprawność energetyczna pozyskania i dostarczenia nośnika energii do miejsca wykorzystania

Nośniki energii dostarczane do bezpośredniego wykorzystania u odbiorców na drodze od miejsca pozyskania surowców do miejsca wykorzystania są poddawane wielu procesom przetwarzania. Przykładowy przebieg przemian energii od pozyskania surowców energetycznych do uzyskania ciepła użytecznego

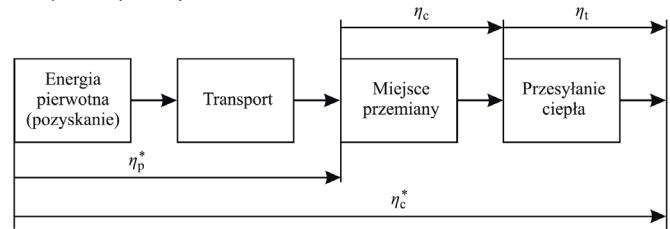
wykorzystanego w budynku do ogrzewania może być następujący: energia pierwotna (np. węgiel kamienny w złożu), wydobywanie, wstępna przeróbka, transport do miejsca przemiany w ciepło, wytwarzanie ciepła (przemiana podstawowa), przesyłanie ciepła siecią do budynku, przetwarzanie na ciepło w wodzie instalacyjnej, dystrybucja do pomieszczeń, przemiana końcowa w ciepło użytkowe spełniające funkcję ogrzewania.

Podobnie długi i złożony jest łańcuch procesów dostarczenia energii elektrycznej do miejsca wykorzystania w obiektach odbiorcy: energia pierwotna (np. węgiel kamienny w złożu), wydobywanie, wstępna przeróbka, transport do miejsca przemiany w energię elektryczną i proces przemiany, transformacja energii elektrycznej na wysokie napięcie, przesyłanie energii elektrycznej do stacji średniego napięcia, transformacja na średnie napięcie i przesyłanie, transformacja na niskie napięcie, transport sieciowy na niskim napięciu do budynku, rozdział do lokali i pomieszczeń budynku, przetwarzanie na energię użytkową (oświetlenie, napęd urządzeń, wytwarzanie chłodu, wytwarzanie ciepła).

Dlatego określenie rzeczywistego zużycia energii pierwotnej na realizację danej funkcji użytkowej nośnika energii w obiektach odbiorców końcowych wymaga wyrażenia jej ilością energii pierwotnej, czyli paliwa znajdującego się w złożu zasobów nieodnawialnych lub w miejscu pozyskiwania zasobów odnawialnych. Tylko określenie zużycia energii pierwotnej prowadzi do uzyskania rzeczywistych wskaźników zużycia energii w budynkach oraz daje pogląd co do całkowitego zużycia

nośnika energii z punktu widzenia uszczuplenia jego zasobów oraz odpowiednich emisji zanieczyszczeń.

Na rys. 1 zaznaczono przemiany, dla których zwykle określa się sprawności służące do obliczania skumulowanej sprawności energetycznej η_c^* pozyskania i dostarczenia nośnika energii do miejsca wykorzystania.



Rys. 1. Przemiany energii pierwotnej w ciepło dostarczane do miejsca wykorzystania w obiektach odbiorców

W praktyce określania zużycia energii pierwotnej w miejscu wykorzystania danego nośnika energii końcowej posługujemy się dostępnymi w materiałach źródłowych wartościami skumulowanej sprawności pozyskania, transportu i procesów przemian energetycznych oraz odpowiednimi wskaźnikami skumulowanego zużycia energii. W dalszych przemianach po dostarczeniu nośnika energii do miejsca podstawowej przemiany wytwarzania ciepła lub energii elektrycznej posługujemy się już wartościami sprawności dla określonych konkretnych przemian, mających zastosowanie w rozpatrywanych procesach.

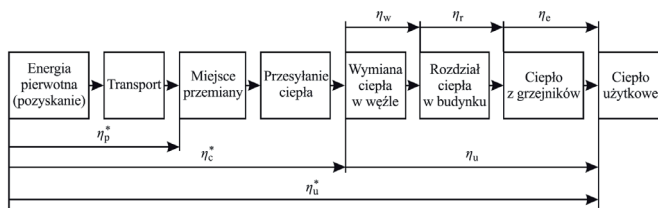
Określanie skumulowanej sprawności energetycznej

pozyskania i dostarczenia nośnika energii bezpośredniej (końcowej), w tym wypadku ciepła do budynku, można zapisać w postaci relacji

$$\eta^*_c = \eta^*_p \eta_c \eta_t \quad (8)$$

gdzie: η^*_p – skumulowana sprawność energetyczna pozyskania i dostarczenia nośnika energii pierwotnej do miejsca przemiany podstawowej, η_c – sprawność wytwarzania ciepła w ciepłowni, elektrociepłowni lub w urządzeniach wytwórczych ciepła w obiektach odbiorców końcowych, η_t – sprawność przesyłania ciepła do miejsca wykorzystania w obiektach odbiorcy.

Na rys. 2 przedstawiono ilustrację łańcucha przemian energii począwszy od pozyskania energii pierwotnej do przetworzenia jej na energię użytkową w pomieszczeniu, przekazaną przez grzejniki do podgrzania powietrza wewnątrz w pomieszczeniach, czyli do spełnienia jej funkcji użytkowej, którą jest ogrzewanie pomieszczeń. Na rysunku 2 pokazano również, jakie przemiany obejmuje skumulowana sprawność energetyczna pozyskiwania i dostarczania ciepła do miejsca podstawowej przemiany, do miejsca użytkowania (np. budynek) nośnika energii bezpośredniej η^*_c oraz sprawność charakteryzującą przemiany realizowane w celu uzyskania ciepła użytkowego w pomieszczeniach budynku, czyli skumulowaną sprawność użytkową η^*_u .



Rys. 2. Łańcuch przemian energii pierwotnej w ciepło użytkowe ogrzewania pomieszczeń

Do określenia skumulowanej użytkowej sprawności energetycznej pozyskania i dostarczenia ciepła użytkowego do pomieszczeń budynku (skumulowana użytkowa sprawność energetyczna η^*_u danego nośnika) można wykorzystać relację

$$\eta^*_u = \eta^*_p \eta_c \eta_t \eta_w \eta_r \eta_e \quad (9)$$

lub

$$\eta^*_u = \eta^*_p \eta_c \eta_t \eta_u \quad (9a)$$

gdzie: η_w – sprawność przekazywania ciepła w przyłączy wymiennikowym, η_r – sprawność rozdziału i regulacji ciepła w budynku, η_e – sprawność emisji grzejników w ogrzewanych pomieszczeniach budynku, wartości sprawności η_w , η_r , η_e są dostępne w publikacjach z zakresu ogrzewnictwa.

Sprawność przetwarzania energii końcowej w budynku na ciepło użytkowe

$$\eta_u = \frac{E_U}{E_K} = \eta_r \eta_w \eta_e \quad (10)$$

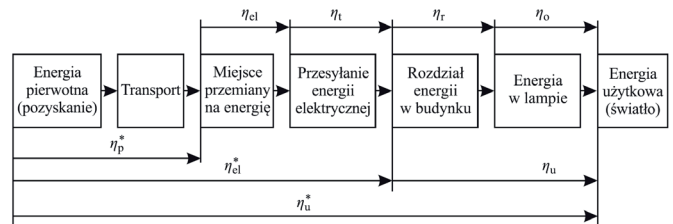
gdzie: E_K – energia końcowa dostarczana do budynku, E_U – energia użytkowa, η_u – sprawność przetwarzania energii końcowej w budynku na energię użytkową.

Przy dostarczaniu ciepła do wykorzystania w obiektach odbiorców może występować wiele różnych ciągów przemian,

zależnie od rodzaju nośnika energii pierwotnej i budowy systemu ogrzewania.

Łańcuch przemian nośnika energii pierwotnej paliw w energię elektryczną jest dłuższy i bardziej skomplikowany niż ciepła użytkowego, głównie dlatego że sama przemiana w energię elektryczną η^*_{el} wymaga znacznie głębszego przetworzenia nośnika energii pierwotnej.

Na rys. 3 zaznaczono również przemiany, dla których określa się sprawności η_{el} , η_t , η_r , η_o służące do obliczania skumulowanych sprawności energetycznych η^*_{el} i η^*_u .



Rys. 3. Łańcuch przemian energii pierwotnej w energię końcową i użytkową

Skumulowaną sprawność energetyczną pozyskania i dostarczenia energii elektrycznej do obiektu jako nośnika energii końcowej można zapisać w postaci relacji

$$\eta^*_{el} = \eta^*_p \eta_{el} \eta_t \quad (11)$$

gdzie: η_{el} – sprawność wytwarzania energii elektrycznej w elektrowni, η_t – sprawność przesyłania energii elektrycznej do miejsca wykorzystania w budynku, η^*_p – skumulowana sprawność energetyczna pozyskania i dostarczenia nośnika energii pierwotnej do miejsca przemiany podstawowej, w tym przypadku przemiany w energię elektryczną, jest identyczna jak we wzorze (8).

Skumulowaną sprawność energetyczną użytkową pozyskania i dostarczenia energii użytkowej (świetlnej) do pomieszczeń obiektów odbiorców można zapisać w postaci relacji

$$\eta^*_u = \eta^*_{el} \eta_r \eta_o = \eta^*_{el} \eta_u \quad (12)$$

gdzie: η_r – sprawność systemu rozdziału energii elektrycznej w obiektach odbiorcy, η_o – sprawność przemiany energii elektrycznej w obiektach odbiorcy w energię użyteczną, na przykład energię świetlną w pomieszczeniach obiektów budowlanych.

6. Przykład określania sprawności użytkowej energii wykorzystywanej w budynku

W systemach grzewczych funkcją użytkową pomieszczeń jest temperatura w pomieszczeniach rozumiana jako temperatura powietrza albo jako funkcja złożona określająca wskaźnik komfortu cieplnego, na przykład temperatura odczuwalna. Zarówno ludzie, jak i procesy przemysłowe są bardzo wrażliwe na zmiany temperatury, dlatego ten parametr jest zwykle podstawowy. Oszczędna z punktu widzenia zużycia energii eksploatacja obiektów wymaga ścisłego dostosowania przebiegu temperatury w pomieszczeniach do sposobu użytkowania danego rodzaju pomieszczeń. Funkcje użytkowe pomieszczeń są inne dla obiektów mieszkalnych, hotelowych, biurowych, przemysłowych, szkół, obiektów wypoczynku, zakładów leczenia. Różne są również odpowiednie przebiegi temperatury w pomieszczeniach tych obiektów.

Ocena efektywności różnych sposobów i systemów służących do utrzymania komfortu cieplnego w obiektach budowlanych może być dokonana przez określenie sprawności użytkowej (ruchowej) tych systemów [120]. Sprawność użytkowa systemu η_{u}^* wyznaczona dla całego okresu użytkowania urządzeń (np. dla sezonu grzewczego) jest miarą efektywności wykorzystania energii pierwotnej dostarczonej do systemu. Przykładowy przebieg temperatury dla pomieszczeń hotelowych pokazano na rys. 4. Przebiegi temperatury w ciągu doby i w ciągu sezonu grzewczego stanowią punkt wyjścia do obliczenia zużycia energii i są podstawą do oceny jakości realizowanych funkcji oraz mogą być wykorzystane do określenia sprawności użytkowej [120].

Ciepło na ogrzewanie i wentylację w formie użytkowej (końcowej) Q_{co} jest dostarczane w sezonie grzewczym przez odpowiednio sterowany system ogrzewania obiektu. Dlatego bieżąca moc cieplna \dot{Q}_{co} zasilania obiektu w ciepło na ogrzewanie i wentylację odbywa się nierównomiernie, stosownie do wymaganego przebiegu temperatury w pomieszczeniach.

Energia bezpośrednia dostarczana do obiektu na jego ogrzewanie i wentylację może być określona wzorem

$$E_{co} = \frac{Q_{co}}{\eta_{u,co}} = \frac{\int_0^{\tau_{co}} \dot{Q}_{co}(\tau) d\tau}{\eta_{u,co}} \quad (13)$$

gdzie: Q_{co} – sezonowe zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania i wentylacji pomieszczeń obiektu, $\dot{Q}_{co}(\tau)$ – moc zasilania pomieszczeń obiektu w ciepło na ogrzewanie i wentylację jako funkcja czasu, τ_{co} – czas użytkowania systemu ogrzewania i wentylacji w ciągu roku, $\eta_{u,co}$ – sprawność energetyczna użytkowa systemu dostarczania ciepła do pomieszczeń obiektu odniesiona do energii bezpośredniej E_{co} dostarczanej do obiektu w ciągu roku

$$\eta_{u,co} = \frac{Q_{co}}{E_{co}} \quad (14)$$

można ją określić znając budowę systemu regulacji funkcji użytkowej pomieszczeń [120].

Całka w liczniku wzoru (8.13) wyraża zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania i wentylacji pomieszczeń obiektu w sezonie grzewczym. Dla projektowanego obiektu zapotrzebowanie na ciepło Q_{co} można wyznaczyć na podstawie obliczeń wykonanych z uwzględnieniem istniejących regulacji prawnych i przewidywanego przebiegu temperatury t_i w czasie, jak na przykład w [112].

Ponieważ zużycie energii E_{co} jest to energia bezpośrednia dostarczona do budynku na ogrzewanie, sprawność użytkową ogrzewania $\eta_{u,co}$ można wyrazić za pomocą sprawności η_w , η_b , η_e omawianych wcześniej i uwidoczniionych na rys. 5

$$\eta_{u,co} = \eta_w \eta_b \eta_e \quad (15)$$

Istnieje związek między sprawnością użytkową energii bezpośredniej dostarczanej do budynku $\eta_{u,co}$ a skumulowaną sprawnością użytkową $\eta_{u,co}^*$ ciepła końcowego wykorzystanego w budynku do utrzymania warunków komfortu cieplnego w pomieszczeniach budynku

$$\eta_{u,co}^* = \eta^* c \eta_{u,co} \quad (15a)$$

gdzie $\eta^* c$ wyraża się wzorem (8).

Podobną zależność można podać do powiązania skumulowanej sprawności użytkowej innych nośników energii pierwotnej wykorzystywanych w budynkach.

8.7. Zasady obliczania zużycia energii pierwotnej w miejscu wykorzystania

Zużycie energii pierwotnej stanowi podstawę do określenia wykorzystania (zużycia) zasobów energii oraz stopnia uszczuplenia tych zasobów. Na potrzeby Głównego Urzędu Statystycznego w [26] ustalono zasady określania energii pierwotnej pochodzącej z różnych źródeł. W podobny sposób zasady te zostały zdefiniowane w pracy [46].

W przypadku paliw kopalnych i biopaliw do określenia zużycia energii pierwotnej (energii chemicznej) z danego surowca energetycznego niezbędna jest ilość wydobytego surowca i jego wartość opałowa. Według niektórych publikacji [46] właściwszą w tym celu wielkością jest ciepło spalania zamiast wartości opałowej, ponieważ reprezentuje maksymalną wartość technicznie możliwej do uzyskania energii z danego surowca energetycznego.

Dla naturalnych źródeł energii, jak promieniowanie słoneczne, energia wodna, energia wiatru, do obliczania dostarczanej energii pierwotnej pozyskiwanej z tych źródeł stosuje się energię dostarczoną przez urządzenia wytwórcze. W przypadku energii słonecznej jest to ciepło uzyskiwane w kolektorach słonecznych lub energia elektryczna z modułów fotowoltaicznych. Podobnie, ilość energii elektrycznej wytworzonej w elektrowniach

reklama

wodnych i wiatrowych uznaje się za energię pierwotną.

Do określenia energii pierwotnej pochodzącej z elektrowni jądrowych w obliczeniach wykorzystuje się sprawność cieplną turbogeneratorsa gazowego wynoszącą 33%. Jest to wartość stosowana w krajach OECD do celów statystycznych.

W określaniu energii pierwotnej zużywanej przez obiekt niezbędna jest znajomość nie tylko ilości dostarczanych nośników energii bezpośredniej, lecz również wartości skumulowanej sprawności, jaka charakteryzuje ich pozyskiwanie i dostarczanie.

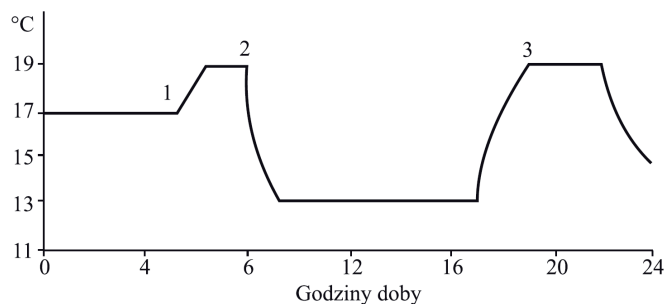
Podstawowymi nośnikami energii bezpośredniej dostarczonymi do obiektu są zwykle: węgiel kamienny, koks, biopaliwa stałe, paliwa ciekłe (olej opałowy, olej napędowy), gaz ziemny, gaz ciekły, energia elektryczna, ciepło sieciowe, dla których skumulowane sprawności podano w tab. 2.

W przypadku każdego obiektu, gdy są dostarczane paliwa, niezbędna jest znajomość techniki dalszego przetwarzania (spalania) i dostarczania ciepła końcowego do pomieszczeń oraz odpowiednich sprawności. Przy dostarczaniu ciepła do ogrzewania niezbędna jest znajomość przemiany w przyłączeniu, rozdziale ciepła do pomieszczeń i sposobu wykorzystania w pomieszczeniach. Podobnie jest, gdy do obiektu jest dostarczane ciepło do przygotowania ciepłej wody użytkowej; niezbędna jest wówczas znajomość sposobu i sprawności poszczególnych ogniw systemu przygotowania ciepłej wody i sposobu dostarczania do miejsca wykorzystania. Gdy uwzględniane jest zużycie wody, wówczas niezbędna jest znajomość energochłonności jej pozyskiwania, przygotowania i dostarczania wraz energochłonnością odprowadzania i ewentualnego uzdatniania ścieków, jak również znajomość skumulowanej sprawności pozyskania i dostarczania wody do miejsca wykorzystania.

Przy rozpatrywaniu obiektów technicznych podstawę do określenia zużycia energii pierwotnej stanowią ilości dostarczanych nośników energii bezpośredniej. Ponieważ są one przedmiotem zakupu, są więc dostarczane w znanych ilościach (paliwa stałe i ciekłe) lub mierzone za pomocą odpowiednich mierników bezpośrednio u odbiorców (ciepło, energia, elektryczna, gaz ziemny, olej opałowy, woda). Przy znanym rocznym zużyciu nośników energii bezpośredniej zużycie energii pierwotnej w miejscu jej wykorzystania (np. w budynku) określa zależność [37]

$$E_{ch} = \frac{E_c}{\eta_c^*} + \frac{E_{el}}{\eta_{el}^*} + \sum_{p=1}^n \frac{E_p}{\eta_p^*} + e_w G_w \quad (16)$$

gdzie: E_{ch} – zużycie energii pierwotnej (energii chemicznej paliw), GJ/rok, E_c – roczne zużycie ciepła, GJ/rok, E_{el} – roczne zużycie energii elektrycznej, GJ/rok, E_p – roczne zużycie p -tego nośnika energii w przemianie energetycznej odbywającej się w budynku, GJ/rok, G_w – roczne zużycie wody w miejscu wykorzystania, GJ/rok, e_w – wskaźnik skumulowanej energochłonności dostarczanej wody, GJ/Mg, η_c^* – skumulowana sprawność energetyczna pozyskania i dostarczania ciepła do miejsca wykorzystania, η_{el}^* – skumulowana sprawność energetyczna pozyskania i dostarczania energii elektrycznej do miejsca wykorzystania, η_p^* – skumulowana sprawność energetyczna pozyskania i dostarczania p -tego nośnika energii do miejsca wykorzystania, n – liczba wykorzystywanych nośników energii



Rys. 4. Przebieg temperatury t , powietrza w ciągu doby w pokojach hotelowych [120]: 1 – oślabienie nocne, 2 – wyjazd gości, 3 – przyjazd gości

przetwarzanych na miejscu wykorzystania.

Wykorzystując pojęcie wskaźnika skumulowanego zużycia energii, zużycie energii pierwotnej w fazie użytkowania obiektu technicznego przy założeniu niezmiennej charakterystyki energetycznej obiektu można wyrazić wzorem

$$E_{ch} = e_c E_c + e_k E_k + e_{el} E_{el} + e_w G_w \quad (17)$$

gdzie: e_c – wskaźnik nakładu energii pierwotnej na wytworzenie i dostarczenie ciepła, e_k – wskaźnik nakładu energii pierwotnej na wytworzenie i dostarczenie k -tego nośnika energii końcowej, E_k – roczne zużycie k -tego nośnika energii końcowej, e_{el} – wskaźnik nakładu energii pierwotnej na wytworzenie i dostarczenie energii elektrycznej.

Zależność (17) wyraża roczne zużycie energii pierwotnej w miejscu wykorzystania (w obiekcie technicznym) w przypadku zużycia kilku różnych nośników energii bezpośredniej. Zużycie energii pierwotnej zależy od poziomu zużycia poszczególnych nośników energii bezpośredniej oraz od sprawności przemian energetycznych odbywających się w systemie energetycznym, wyrażanych wartościami skumulowanych sprawności energetycznych pozyskania i dostarczenia wszystkich nośników zużywanych w miejscu wykorzystania. Poziom zużycia poszczególnych nośników energii bezpośredniej zależy od parametrów technicznych charakteryzujących obiekt oraz od sprawności użytkowej η_u wykorzystania każdego z nich.

Projektant obiektu budowlanego ma możliwość wpływu zarówno na zużycie poszczególnych nośników energii, jak i na sprawność użytkową wykorzystania każdego dostarczonego nośnika energii bezpośredniej. Uzyskuje się to przez dobór odpowiednich urządzeń, instalacji czy budynku, oddziałując na wielkość rocznego zużycia nośników energii i ich sprawność użytkową. Natomiast projektant obiektu nie ma wpływu na skumulowane sprawności energetyczne pozyskiwania i dostarczania tych nośników energii do miejsca wykorzystania. Sprawności te zależą od rodzaju wykorzystywanych w systemie energetycznym nośników energii pierwotnej oraz od poziomu technicznego wszystkich ogniw systemu energetycznego, a więc od jakości przemian energetycznych, systemów przesyłania energii, poprawności funkcjonowania ich systemów eksploatacji.

8. Analiza energetyczna i energetyczno-ekologiczna

Analiza energetyczna w pełnym cyklu istnienia (analiza skumulowanego zużycia energii) rozwinęła się już w 70. latach XX wieku w celu określenia zużycia energii pierwotnej na wytworzenie nośnika energii o odpowiednich wymaganiach

jakościowych. W analizach energetycznych wyrobów interesuje nas również problem, ile energii pierwotnej jest niezbędne do wytworzenia rozpatrywanego wyrobu, określane jako skumulowane zużycie energii.

Analiza energetyczna prowadzona w celu racjonalizacji wykorzystania energii poszukuje możliwości zmniejszenia jej zużycia do spełnienia danej funkcji. Gdy celem jest racjonalizacja proekologiczna, wówczas poszukuje się zmniejszenia obciążenia środowiska, którego jednym z obciążeń jest zużycie zasobów energetycznych. Natomiast narzędziem oceny oddziaływania na środowisko przy rozpatrywaniu racjonalizacji działalności gospodarczej i społecznej jest analiza energetyczno-ekologiczna w pełnym cyklu istnienia (metodologia oceny cyklu życia, ang. *Life Cycle Assessment, LCA*).

Bowiem wprowadzenie koncepcji zrównoważonego rozwoju wykreowało inne spojrzenie na obiekt, poprzez pewien zespół obciążeń pierwotnych wprowadzanych do środowiska, które należy rozpatrywać i oceniać w pełnym cyklu istnienia. To spostrzeżenie spowodowało, że rozwinęły się metody oceny oddziaływania wyrobów i obiektów budowlanych na środowisko, oparte na metodologii pełnego cyklu istnienia (LCA), które przez określenie zbioru wielkości uznanych jako kategorie oddziaływania na środowisko umożliwiają ocenę postępu w proekologicznej działalności w danej dziedzinie.

W sumie, metodologia LCA opiera się na obserwacji, że we wszystkich fazach istnienia obiektu (wyrobu) generowane są obciążenia wprowadzane następnie do środowiska, które powinny być analizowane, kwantyfikowane i uwzględnione w końcowej ocenie. Takie podejście zapewnia jednoznaczność oceny oddziaływania obiektu na środowisko i możliwość uwzględnienia wszystkich obciążeń, których obiekt może być przyczyną w cyklu istnienia. Czyli, według metodologii LCA, obiekt jest oceniany na podstawie zmian, jakie wprowadza do środowiska w pełnym cyklu istnienia. Efektem analizy energetyczno-ekologicznej nośnika energii jest jego charakterystyka energetyczno-ekologiczna określająca oddziaływania na środowisko wnoszone wraz z nośnikiem energii do innego systemu, w którym nośnik ten jest stosowany.

W celu sformułowania zakresu analizy niezbędne jest zdefiniowanie jednostki funkcyjnej, która służy jako podstawa odniesienia dla uzyskiwanych efektów użytkowych. Według definicji przedstawionej w [46] *jednostka funkcyjna* jest to kwantyfikowana usługa dostarczana przez rozpatrywany system wyrobu do stosowania jako podstawa odniesienia w analizie energetyczno-ekologicznej. Niezbędny opis systemu wyrobu, z uwagi na wykonywanie analizy energetyczno-ekologicznej w pełnym cyklu istnienia, polega na ustaleniu wszystkich procesów cząstkowych związanych z wyrobem (pozyskania surowców, wytwarzania materiałów, transportu, użytkowania i poużytkowego przetwarzania) w pełnym cyklu istnienia oraz identyfikacji wszystkich wielkości wejścia i wyjścia [37, 38].

Na analizę energetyczno-ekologiczną wyrobu obejmującą pełny cykl istnienia wyrobu składają się następujące działania:

- obserwacja pełnego cyklu istnienia wyrobu – od pozyskania surowców, przez ich przetwarzanie, produkcję wyrobu, jego użytkowanie do recyklingu i gospodarki odpadami,
- określenie wszystkich oddziaływań na środowisko w pełnym cyklu istnienia: zużycie surowców, nośników energii, gruntów,

emisje do atmosfery, wody i na ląd oraz powstawanie odpadów i ich zagospodarowanie,

- agregacja i ocena tych oddziaływań z punktu widzenia potencjalnych efektów w środowisku.

W ujęciu czasowym analiza cyklu istnienia wyrobu może być użytecznym narzędziem do stosowania [37, 38]:

- w fazie powstawania koncepcji i projektu wyrobu (zwanej obecnie projektowaniem proekologicznym), w której projektuje się wyrób o uniwersalnej funkcji użytkowej i o minimalnym oddziaływaniu na środowisko,
- w fazie wytwarzania wyrobu, w której poszukuje się możliwości zmniejszenia negatywnego oddziaływania na środowisko przez zmianę nośnika energii, racjonalizację gospodarki wodnej, wydłużenie czasu użytkowania itd.,
- w fazie planowania produkcji, w której, w odniesieniu do cyklu inwestycyjnego przez dobór odpowiednich materiałów, technologii lub ich wymianę, dąży się do zmniejszenia negatywnego oddziaływania na środowisko.

System wyrobu rozpatruje się w pełnym cyklu obejmującym fazy istnienia wyrobu, z których każda ma ściśle określone granice czasowe. Przy rozpatrywaniu systemu wyrobu pomija się fazę projektowania ze względu na jej niewielki ilościowy udział w obciążeniu środowiska. W porządku chronologicznym rozpatruje się następujące fazy:

- faza wytwarzania (lub faza wznoszenia w przypadku obiektu budowlanego) – od rozpoczęcia projektowania do zakończenia odbioru gotowego wyrobu, urządzenia lub obiektu,

reklama

- faza użytkowania – od rozpoczęcia użytkowania do podjęcia decyzji o likwidacji,
- faza likwidacji i poużytkowego przetwarzania – od rozpoczęcia demontażu lub rozbiórki do przekazania powstałych odpadów do innego systemu lub ich składowania.

Cykl istnienia wyrobu są to kolejne i powiązane ze sobą fazy systemu wyrobu od pozyskania surowców z zasobów naturalnych aż do likwidacji po utracie cech użytkowych wyrobu lub ogólniej: od chwili zaistnienia potrzeby społecznej do chwili unieszkodliwienia zbędnego już wyrobu po utracie jego funkcji użytkowej. Od przedmiotu i przewidywanego sposobu wykorzystania analizy zależy jej zakres, granice rozpatrywanego systemu oraz poziom szczegółowości badań. Głębokość i rozległość rozpatrywania danego problemu może się znacznie różnić w zależności od przeznaczenia analizy.

Zgodnie z ogólną metodologią [37, 38] analiza uwzględniająca pełny cykl istnienia wyrobu jest wykonywana w czterech następujących etapach:

1. Zdefiniowanie celów i określenie zakresu pracy – ustala się przeznaczenie analizy i jej zakres oraz granice systemu wyrobu lub obiektu poddawanego analizie, a także granice ewentualnych podsystemów.
2. Inwentaryzacja, gromadzenie danych i analiza zbioru – przygotowuje się model cyklu istnienia wyrobu z uwzględnieniem wszystkich środowiskowych wejść i wyjść oraz ustaleniem ich wartości. Odbywa się identyfikacja i kwantyfikacja danych począwszy od pozyskania surowców energetycznych i nieenergetycznych, strumieni zanieczyszczeń (gazowych, ciekłych i stałych) i innych obciążeń odprowadzanych do środowiska w pełnym cyklu istnienia wyrobu. Następnie prowadzi się analizę zbioru informacji w celu określenia ich kompletności, wiarygodności i dokładności z punktu widzenia założonego celu analizy. Ten etap jest nazywany inwentaryzacją w pełnym cyklu istnienia (ang. *Life Cycle Inventory*, LCI).
3. Ocena oddziaływania na środowisko (ang. *Life Cycle Impact Assessment*, LCIA) – odbywa się przez kwantyfikację tego oddziaływania z uwzględnieniem wszystkich ustalonych w poprzednim etapie wartości wejścia i wyjścia, czyli z jednej strony wykorzystanie zasobów naturalnych, a z drugiej – odprowadzanie do środowiska zanieczyszczeń.
4. Interpretacja przebiegu i wyników analizy – jest dokonywana w zasadzie podczas całego przebiegu analizy. W końcowej części analizy uwzględnia się rozpatrzenie wielu możliwych rozwiązań, które mogłyby wpłynąć na zmniejszenie uciążliwości środowiskowej rozpatrywanego wyrobu.

Na rys. 5 pokazano wzajemne powiązanie poszczególnych etapów wykonywania analizy LCA, z którego wynika wymaganie ciągłego śledzenia bieżących wyników analizy i kontrola poprawności jej realizacji oraz uwzględnianie aktualnych wyników w przebiegu dalszych etapów.

Do oceny energetyczno-ekologicznej wyrobów stosuje się zbiór określonych wielkości, które charakteryzują oddziaływanie tych wyrobów na środowisko, nazwane w tej pracy charakterystyką energetyczno-ekologiczną wyrobu. Wielkościami stosowanymi jako kryteria oceny są skumulowane równoważne obciążenia środowiska Ω_j .

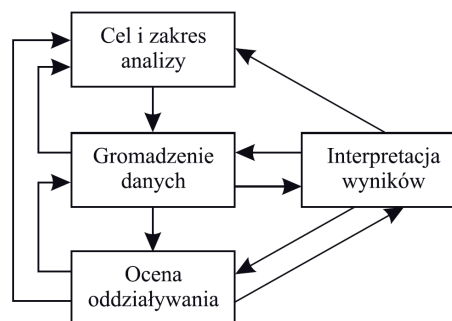
Wielokryterialną energetyczno-ekologiczną ocenę danego

wyrobu prowadzi się na podstawie zbioru wielkości, który może być zapisany w postaci kwymiarowego wektora skumulowanych równoważnych obciążeń Ω o elementach charakteryzujących w sposób ilościowy określone oddziaływania na środowisko. Wektor Ω może być zapisany w postaci [37, 38]:

$$\Omega = \{\Omega_E, \Omega_M, \Omega_W, \Omega_{GWP}, \Omega_{ODP}, \Omega_{POCP}, \Omega_{AP}, \Omega_{EP}, \Omega_{HTP}, \Omega_S\}^T \quad (18)$$

gdzie poszczególne elementy n -wymiarowego wektora kategorii oddziaływania na środowisko oznaczone w indeksach dolnych są następujące:

- E – zużycie zasobów energii nieodnawialnej,
- M – zużycie zasobów surowców nieenergetycznych,
- W – zużycie zasobów wody,
- GWP (ang. *Global Warming Potential*) – emisja gazów cieplarnianych,
- ODP (ang. *Ozone Depletion Potential*) – emisja substancji niszczących stratosferyczną warstwę ozonową,
- POCP (ang. *Photochemical Ozone Creation Potential*) – emisja substancji wpływających na fotochemiczne powstawanie ozonu,
- AP (ang. *Acidification Potential*) – emisja substancji zakwaszających środowisko,
- EP (ang. *Eutrophication Potential*) – emisja substancji powodujących eutrofizację środowiska,
- HTP (ang. *Human Toxicity Potential*) – potencjał toksycznego oddziaływania na ludzi,
- S – ilość powstających odpadów.



Rys. 5. Wzajemne powiązanie etapów wykonywania analizy LCA

Liczba obciążeń n uwzględnianych w danej ocenie oddziaływania na środowisko jest miarą wektora Ω .

W obszarze j -tego zagrożenia środowiskowego pochodzącego ze wszystkich m obciążeń potencjalne oddziaływanie na środowisko określa wielkość Ω_j , która wyraża skumulowane równoważne oddziaływanie na środowisko

$$\Omega_j = \sum_i^m b_{j,i} O_i \quad (19)$$

gdzie: O_i – obciążenie środowiska mierzone ilością emisji i -tej substancji, $b_{j,i}$ – równoważnik emisji i -tej substancji względem j -tej kategorii oddziaływania na środowisko, m – liczba obciążeń w obszarze j -tej kategorii oddziaływania.

Obciążenie środowiska O_i charakteryzujące dany materiał i będące efektem emisji określonej i -tej substancji (np. ilość jednego z gazów cieplarnianych) można wyznaczyć na podstawie wzoru (19) przekształconego do postaci

$$O_i = \beta_{ik} G_k \quad (20)$$

gdzie: β_{ik} – wskaźnik skumulowanego obciążenia środowiska i -tą substancją pochodzącą z wytworzenia k -tego wyrobu, kg subst./kg materiału, G_k – masa k -tego materiału, kg.

Do przeprowadzenia analizy LCA niezbędna jest baza danych obejmująca wartości równoważników Ω_j dla bardzo wielu substancji wprowadzanych do środowiska.

Równoważnik obciążenia wyraża potencjalne oddziaływanie na środowisko danej substancji (obciążenie) mierzone ilością substancji odniesienia w obszarze danego zagrożenia środowiskowego.

Dla każdej kategorii oddziaływania na środowisko wybrano określoną substancję odniesienia, której ilość jest miarą wielkości oddziaływania w obszarze danego zagrożenia środowiskowego. Na przykład:

- dla zagrożenia efektem cieplarnianym jako substancję odniesienia wybrano dwutlenek węgla CO_2 ,
- dla zagrożenia degradacją warstwy ozonowej: CFC-11,
- dla zagrożenia zakwaszeniem: SO_2 ,
- dla zagrożenia smogiem fotochemicznym: C_2H_4 .

Przykład określania skumulowanego równoważnego obciążenia środowiska

Przy określaniu kategorii oddziaływania charakteryzującego potencjał cieplarniany Ω_{GWP} gazy brane pod uwagę mogą być następujące: N_2O , CO_2 , CO , CFC-11, CFC-12, a ich przykładowe ilości O_i zostały podane w tab. 5. Wskaźnik kategorii oddziaływania na środowisko jest określany według zależności:

$$\Omega_{GWP} = \sum_i^m b_{i,GWP} O_i = b_{CO_2,CO_2} O_{CO_2} + b_{CO_2,CH_4} O_{CH_4} + b_{CO_2,NO_2} O_{NO_2} \quad (19)$$

Zbiór kategorii oddziaływania określający charakterystykę energetyczno-ekologiczną wyrobu powinien być ustalony, biorąc pod uwagę rodzaj rozpatrywanego wyrobu oraz cel i zakres planowanej analizy. Najczęściej wykorzystuje się pierwsze osiem kategorii oddziaływania. Rzadziej wykorzystuje się potencjał szkodliwego oddziaływania na ludzi i środowisko, ponieważ obecne metody i ustalenia są oparte na bardzo przybliżonych modelach przebiegu mechanizmów środowiskowych.

Obciążenie środowiska i -tą substancją wyrażone wielkością O_i mierzy się ilością substancji wprowadzanych do środowiska lub ilością zasobów pobranych ze środowiska. Określony materiał zastosowany do wytworzenia danego wyrobu ocenia się zbiorem wskaźników charakteryzujących skumulowane równoważne obciążenia środowiska. Zbiór wskaźników $\hat{\beta}$ obejmujących wszystkie rozpatrywane obciążenia można zapisać w postaci n -wymiarowego wektora [37, 38, 39]:

$$\hat{\beta} = \{ \hat{\beta}_E, \hat{\beta}_M, \hat{\beta}_W, \hat{\beta}_{GWP}, \hat{\beta}_{ODP}, \hat{\beta}_{POCP}, \hat{\beta}_{AP}, \hat{\beta}_{EP}, \hat{\beta}_{HTP}, \hat{\beta}_S \}^T \quad (20)$$

gdzie wskaźnik skumulowanego równoważnego j -tego obciążenia zdefiniowany w [37, 38, 39] wyraża się wzorem

$$\hat{\beta}_j = \mathbf{b}^T \boldsymbol{\beta}_j \quad (21)$$

lub

$$\hat{\beta}_j = \sum_{i=1}^m b_{ij} \beta_{ij} \quad (22)$$

przy czym: b_{ij} – równoważnik i -tej substancji obciążającej środowisko dla j -tej kategorii oddziaływania, β_{ij} – wskaźnik obciążenia i -tą substancją dla j -tej kategorii oddziaływania na środowisko.

Zgodnie z [37] wskaźniki skumulowanych równoważnych obciążeń środowiska dla produkowanych i znajdujących się na rynku materiałów mogą stanowić zbiór danych ułatwiających wykonywanie charakterystyk energetyczno-ekologicznych wyrobów. W pracy [38] zamieszczono przykładowe zbiory wskaźników β skumulowanych równoważnych obciążeń środowiska dla kilku powszechnie stosowanych w technice materiałów i nośników energii.

Przykład obliczania równoważnego skumulowanego wskaźnika obciążenia środowiska

Posiłkując się wartościami wskaźników skumulowanych emisji zanieczyszczeń dla różnych paliw podanymi w tab. 3 na podstawie wzoru (21) obliczymy równoważny skumulowany wskaźnik $\hat{\beta}_{AP}$ obciążenia środowiska na przykładzie oddziaływania powodującego zakwaszenie środowiska dla elektrowni wytwarzającej energię elektryczną na bazie węgla kamiennego. Sprawność energetyczna elektrowni wytwarzania energii elektrycznej wynosi $\eta_{el} = 0,34$. Na efekt zakwaszenia środowiska ma wpływ emisja SO_2 i NO_x ; z tab. 3 odczytujemy, że ich skumulowane wskaźniki emisji wynoszą odpowiednio: $\beta'_{SO_2} = 0,791$ kg SO_2 /MJ energii chemicznej węgla i $\beta'_{NO_x} = 0,164$ kg NO_x /MJ energii chemicznej węgla.

Wskaźniki zaczerpnięte z tab. 3 odnoszą się do jednostki energii chemicznej paliwa, nas natomiast interesuje przeliczenie ich na odniesienie do jednostki energii elektrycznej, co uzyskamy przez podzielenie powyższych wartości wskaźników przez sprawność wytwarzania energii elektrycznej η_{el} . Po uwzględnieniu sprawności elektrowni otrzymujemy

$$\beta_{SO_2} = \frac{\beta'_{SO_2}}{\eta_{el}} = \frac{0,791}{0,34} = 2,326 \text{ kg } SO_2/\text{GJ energii elektrycznej}$$

$$\beta_{NO_x} = \frac{\beta'_{NO_x}}{\eta_{el}} = \frac{0,164}{0,34} = 0,482 \text{ kg } NO_x/\text{GJ energii elektrycznej}$$

Stosując wzór (22) otrzymujemy równoważny skumulowany wskaźnik obciążenia środowiska w kategorii zakwaszenia AP (*Acidification Potential*)

$$\hat{\beta}_{AP} = \sum_{i=1}^m b_{ij} \beta_{ij} = b_{SO_2,SO_2} \beta_{SO_2} + b_{SO_2,NO_x} \beta_{NO_x} = 1 \cdot 2,326 + 0,70 \cdot 0,482 = 2,663 \text{ kg } SO_2/\text{GJ}$$

Równoważniki emisji b_{ij} zaczerpnięto z [38] tablica D2.5 str. 479.

9. Możliwości poprawy charakterystyki energetyczno-ekologicznej przetworzonych nośników energii

9.1. Charakterystyka energetyczno-ekologiczna nośników energii

Rozpatrując nośniki energii z punktu widzenia ich oddziaływania na środowisko, czyli szerzej niż z punktu widzenia

ich zużycia, możemy posłużyć się ich charakterystyką energetyczno-ekologiczną, która uwzględnia kategorie oddziaływania uznane za istotne na obecnym poziomie działalności gospodarczej. Wśród przetworzonych nośników energii bezpośrednio najczęściej stosowanych w obiektach budowlanych są ciepło i energia elektryczna, dlatego istnieje potrzeba przedstawienia ich charakterystyki energetyczno-ekologicznej. W tabeli 6 przedstawiono taką charakterystykę dla produkcji energii elektrycznej, a w tabeli 7 dla ciepła dostarczanego do ogrzewania budynków wytwarzanego na bazie gazu ziemnego, jako istotnych wytworów działalności gospodarczej mających wpływ na wskaźniki oceny całej działalności społeczno-gospodarczej.

Możliwości proekologicznej racjonalizacji w działalności społeczno-gospodarczej zależą w znacznym stopniu od charakterystyk energetyczno-ekologicznych dostarczanych przez system energetyczny nośników energii bezpośrednio (ciepła i energii elektrycznej), wykorzystywanych w tej działalności. Odnosi się to również do nośników energii zużywanych w obiektach budowlanych w kraju, ponieważ ich zużycie w tej sferze działalności stanowi ponad 40% zużycia w całej gospodarce kraju.

Energochłonność pozyskania i dostarczenia podstawowych nośników energii ma istotny wpływ na zużycie energii pierwotnej w obiektach budowlanych. Dlatego omówiono możliwości doskonalenia charakterystyki energetyczno-ekologicznej przetworzonych nośników energii (ciepła i energii elektrycznej) przez działania rozwojowe i racjonalizujące odbywające się w całym systemie energetycznym zapewniającym dostarczenie tych nośników energii do odbiorców.

9.2. Możliwości wpływu na charakterystykę energetyczno-ekologiczną nośników energii

W procesach wytwarzania i dostarczania ciepła i energii elektrycznej, odbywających się poza sferą funkcjonowania rozpatrywanych obiektów, istnieje wiele możliwości działania w kierunku poprawy ich charakterystyki energetyczno-ekologicznej. Jako najważniejsze mogą być rozpatrywane następujące działania:

- zwiększenie sprawności obecnych technologii energetycznych,
- zwiększenie udziału skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej,
- poprawa wskaźników ekologicznych obecnych technologii przez usuwanie zanieczyszczeń z paliw lub spalin na drodze fizycznej, chemicznej i biologicznej,
- wprowadzanie nowych technologii energetycznych,
- zwiększenie wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych,
- zwiększenie udziału energetyki jądrowej,
- zmniejszenie strat energii w systemach przesyłania nośników energii.

Przemiana energii chemicznej paliw kopalnych w energię elektryczną w elektrowniach ciepłych odbywa się w łańcuchu przemian: energia chemiczna – ciepło spalin – ciepło w parze – energia mechaniczna – energia elektryczna. Natomiast przemiana energii chemicznej paliw w ciepło odbywa się w krótszym łańcuchu przemian, kończącym się na produkcji w kotle pary lub gorącej wody. Na efektywność całego procesu przemian energii chemicznej paliw w energię elektryczną mają wpływ sprawności poszczególnych pojedynczych przemian energetycznych. Przemiana w ogniach paliwowych oraz

Tabela 5. Przykład obliczania równoważnej skumulowanej emisji gazów cieplarnianych Ω_{GWP} [39]

Substancja (i)	O_i g subst. (i)	b_{ij} g CO_2 /g subst. (i)	Ω_{ij} g CO_2 subst.
N_2O	58	320	18 560
CO_2	998 000	1	998 000
CO	1 020	2	2 040
CFC-11	530	4 000	2 120 000
CFC-12	80	8 500	680 000
Ω_{GWP}	-	-	3 818 600

energii promieniowania słonecznego w energię elektryczną w ogniach fotowoltaicznych wymaga znacznie mniejszych nakładów energii pierwotnej. Jednakże obecnie udział tych technik wytwarzania w całkowitej produkcji energii elektrycznej i ciepła jest niewielki i będą odgrywać istotniejszą rolę dopiero w przyszłości.

Budowane obecnie bloki energetyczne na parametry nadkrytyczne pozwalają znacznie zmniejszyć obciążenie środowiska powodowane przez energetykę. Na przykład, projektowany blok energetyczny w Elektrowni Jaworzno III o mocy 910 MW będzie osiągał sprawność do 45,9% przy mniejszej emisji zanieczyszczeń w porównaniu z blokiem starej konstrukcji o mocy 120 MW: pyłu o 91%, SO_2 o 95%, NO_x o 82% i CO_2 o 28% [128].

9.3. Zwiększenie sprawności obecnych technologii energetycznych

Średnia sprawność wytwarzania energii elektrycznej w Polsce wynosi 33,8%. W energetyce odbywa się ciągle doskonalenie poszczególnych urządzeń realizujących przemiany: silników ciepłych (turbiny parowych i gazowych), kotłów, generatorów energii elektrycznej, innych maszyn i urządzeń oraz układów automatyki. Prowadzi to do coraz większej sprawności energetycznej całych układów i zmniejszenia obciążenia środowiska, wyrażającego się poprawą charakterystyk energetyczno-ekologicznych produkowanych nośników energii.

Współczesne technologie energetyczne wykorzystujące węgiel pozwalają wykorzystać węgiel kamienny i brunatny w różnych układach energetycznych, przy czym praktyczne znaczenie mają [15, 104]:

- tradycyjne bloki parowe z kotłem pyłowym,
- bloki parowe z paleniskami fluidalnymi,
- kombinowane układy gazowo-parowe dwupaliwowe (gaz i węgiel),
- technologie węglowe w układach z turbinami gazowymi.

Postęp w inżynierii materiałowej umożliwia już obecnie stosowanie wyższych parametrów pary: ciśnienie 27 – 29 MPa, temperatura pary przegrzanej 570 – 580°C. W tradycyjnych blokach parowych z kotłami pyłowymi daje to możliwość uzyskania sprawności energetycznej bloku netto rzędu 44 – 45% przy chłodniach kominowych i 47% przy chłodzeniu otwartym. Dotychczas osiągnięte sprawności bloków energetycznych w klasycznych elektrowniach węglowych dochodzą do 40%.

Odnosnie do bloków parowych z atmosferycznymi paleniskami fluidalnymi w energetyce są stosowane głównie paleniska z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym, w których odbywa się proces oczyszczania spalin z SO_2 i NO_x .

Stosowane w elektrowniach i elektrociepłowniach paliwa gazowe są najczęściej wykorzystywane w układach

parowo-gazowych, które współcześnie należą do technologii energetycznych o największej sprawności (58 – 60%). W niedalekiej przyszłości duże znaczenie uzyskają zapewne wysokotemperaturowe ogniwa paliwowe w układach z turbinami gazowymi, dla których oczekuje się sprawności nawet do 80%. Istnieje wiele możliwości realizacji węglowych technologii energetycznych z turbiną gazową. Głównie są to układy wykorzystujące ciśnieniowe procesy zgazowania węgla, biomasy, pozostałości po przerobieniu ropy naftowej i odpadów komunalnych zintegrowane z klasycznym układem gazowo-parowym oraz z wysokotemperaturowymi ogniwami paliwowymi.

9.4. Zwiększenie udziału skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej

Podstawowe nośniki energii bezpośredniej, ciepło i energia elektryczna, mogą być produkowane w dwóch niezależnych procesach, w elektrowni kondensacyjnej i ciepłowni. Produkcja energii elektrycznej w elektrowni wiąże się z koniecznością skraplania pary odprowadzanej z turbiny, co sprawia, że sprawność produkcji energii elektrycznej jest stosunkowo niska (33,8% średnio w Polsce). Znacznie wyższą sprawność uzyskuje się stosując skojarzone wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej (co odbywa się w elektrociepłowni), przez wykorzystanie ciepła

w parze odprowadzanej z turbiny. Dyrektywa [U1] wprowadziła zalecenie promowania tej formy produkcji ciepła i energii elektrycznej tam, gdzie jest to możliwe technicznie i uzasadnione ekonomicznie.

Realizacja obiegu w elektrociepłowni pozwala na zwiększenie ogólnej efektywności wykorzystania energii chemicznej paliwa i na znaczną poprawę wskaźników energetyczno-ekologicznych wytwarzania ciepła i energii elektrycznej. Wyraża się to znacznym zmniejszeniem zużycia energii i emisji CO₂ oraz innych zanieczyszczeń środowiska.

Układy skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej z turbinami gazowymi o małej mocy elektrycznej (rzędu kilkuset kW) są instalowane w obiektach budowlanych (szpitale, hotele, ośrodki wypoczynku, obiekty sportowe, budynki użyteczności publicznej). Cały układ jest budowany w postaci zestawu we wspólnej obudowie i dostarczany w całości ze wszystkimi urządzeniami pomocniczymi i aparaturą kontrolno-pomiarową. Sprawność całkowita układu skojarzonego (produkcja ciepła i energii elektrycznej) może dochodzić do 90% [112]. Układem konkurencyjnym w stosunku do turbiny gazowej małej mocy jest układ wyposażony w silnik tłokowy zasilany gazem ziemnym, najczęściej są to jednostki o mocy w zakresie 70 – 1000 kW.

Tablica 6. Charakterystyka energetyczno-ekologiczna energii elektrycznej dostarczanej do odbiorcy [95]

Kategorie oddziaływania	Symbol Ω_i	Wskaźniki kategorii	Znormalizowane wskaźniki kategorii
Zużycie energii pierwotnej	Ω_E	2960 MJ/GJ	0,0378
Zużycie surowców nieenergetycznych	Ω_M	0,359 Mg/GJ	0,077
Zużycie wody	Ω_W	1131/GJ	0,000387
Efekt cieplarniany	Ω_{GWP}	302 kg CO ₂ /GJ	0,0308
Destrukcyjność warstwy ozonowej	Ω_{ODP}	0,000006 kg CFC-11/GJ	0,00087
Efekt zakwaszenia	Ω_{AP}	1,8 kg SO ₂ /GJ	0,0224
Smog fotochemiczny	Ω_{POCP}	0,13 kg C ₂ H ₄ /GJ	0,00403
Eutrofizacja	Ω_{EP}	0,0916 kg PO ₄ /GJ	0,001396
Toksyczność dla ludzi (powietrze)	Ω_{HTP}	2,2 kg tox/GJ	0,0247
Toksyczność dla ludzi (woda)	Ω_{HTP}	0,027 kg tox/GJ	1,35
Ekotoksyczność	Ω_{ETP}	121 000 m ³ tox/GJ	0,0155
Ilość odpadów	Ω_S	0,025 Mg/GJ	0,00764

Tablica 7. Charakterystyka energetyczno-ekologiczna ciepła wytwarzanego na bazie gazu ziemnego u odbiorcy [95]

Kategorie oddziaływania	Symbol Ω_i	Wskaźniki kategorii	Znormalizowane wskaźniki kategorii
Zużycie energii pierwotnej	Ω_E	2210 MJ/GJ	0,0282
Zużycie surowców nieenergetycznych	Ω_M	0,020 Mg/GJ	0,0043
Zużycie wody	Ω_W	6721/GJ	0,0023
Efekt cieplarniany	Ω_{GWP}	58 kg CO ₂ /GJ	0,00592
Destrukcyjność warstwy ozonowej	Ω_{ODP}	1,16 E-5 kg CFC-11/GJ	0,00077
Efekt zakwaszenia	Ω_{AP}	6,88 E-2 kg SO ₂ /GJ	0,00080
Smog fotochemiczny	Ω_{POCP}	1,18 E-2 kg C ₂ H ₄ /GJ	0,00102
Eutrofizacja	Ω_{EP}	1,21 E-2 kg PO ₄ /GJ	0,000184
Toksyczność dla ludzi (powietrze)	Ω_{HTP}	0,204 kg tox/GJ	0,00228
Toksyczność dla ludzi (woda)	Ω_{HTP}	7,99 E-3 kg tox/GJ	0,400
Ekotoksyczność	Ω_{ETP}	1 413 m ³ tox/GJ	0,00183
Ilość odpadów	Ω_S	0,0010 Mg/GJ	0,00031

9.5. Poprawa wskaźników ekologicznych obecnych technologii energetycznych

W procesach pozyskiwania paliw kopalnych i przetwarzania ich na energię elektryczną i ciepło można wyróżnić następujące sposoby proekologicznego działania [103, 104]:

- usuwanie zanieczyszczeń z paliw na drodze fizycznej, chemicznej i biologicznej,
- stosowanie czystych technologii spalania,
- oczyszczanie spalin opuszczających komorę spalania kotła,
- poprawa sprawności przetwarzania paliw pierwotnych na ciepło i energię elektryczną,
- zastępowanie węgla gazem ziemnym i biomasą.

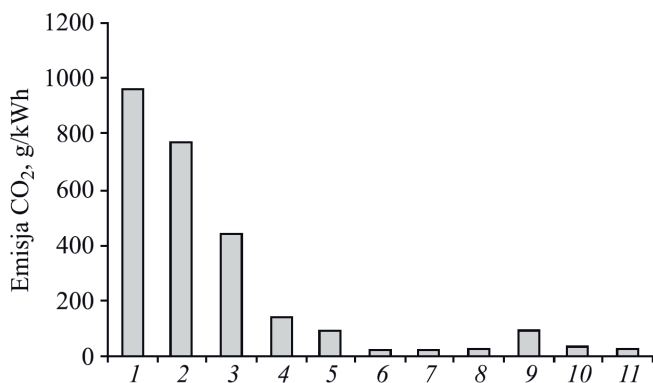
Średni udział siarki w polskich węglach wynosi ok. 0,9%. Znaczny udział siarki w postaci nieorganicznej pozwala na jej częściowe usunięcie w procesach przeróbki mechanicznej, o ok. 40 – 60%. Metodami przeróbki mechanicznej usuwa się do 90% siarki w postaci pirytów, natomiast metodami chemicznymi i biologicznymi nawet do 90% siarki całkowitej [103, 104].

Przy spalaniu fluidalnym zmniejsza się emisja NO_x w wyniku niskiej temperatury spalania (850 – 950°C) oraz emisja SO₂ w wyniku dodatku sorbentu w postaci kamienia wapiennego lub dolomitu. Jednakże w procesie odsiarczania, ze względu na wymagany duży nadmiar sorbentu w celu uzyskania odsiarczenia na poziomie 80 – 90%, w palenisku fluidalnym powstaje kilkakrotnie więcej odpadów stałych niż ilość popiołu, które wymagają racjonalnego zagospodarowania.

Skuteczne zmniejszenie emisji NO_x w paleniskach kotłów uzyskuje się przez modyfikację procesu spalania: stosowanie palników niskoemisyjnych, stopniowanie powietrza w komorze paleniskowej, recyrkulację spalin, stopniowanie paliwa w komorze paleniskowej.

Blisko 97% emitowanego w Polsce CO₂ pochodzi ze spalania paliw kopalnych, a możliwości zmniejszenia emisji CO₂ w systemach energetycznych są następujące [103]:

- substytucja paliw węglowych gazem ziemnym lub biomasą,
- zwiększenie sprawności wytwarzania ciepła i energii elektrycznej,
- usuwanie CO₂ ze spalin odprowadzanych z kotłów energetycznych,



Rys. 6. Porównanie skumulowanej emisji gazów cieplarnianych w produkcji energii elektrycznej (wytwarzanie, użytkowanie) przy zastosowaniu [50]: 1 – węgla kamiennego, 2 – oleju opałowego, 3 – gazu ziemnego, 4 – elementów fotowoltaicznych, 5 – energii słonecznej, 6 – energii wiatru, 7 – małych elektrowni wodnych, 8 – elektrowni wodnych, 9 – energia geotermiczna, 10 – uprawy energetyczne (obecnie), 11 – uprawy energetyczne (w przyszłości)

- przemiana związków węgla w gazie przed jego spalaniem. Omówione wcześniej pierwsze dwa zagadnienia należą do podstawowych problemów współczesnej energetyki.

Na rys. 6 przedstawiono porównanie skumulowanej emisji zanieczyszczeń gazów cieplarnianych w produkcji energii elektrycznej, z którego wynika zdecydowanie większa emisja w przypadku wykorzystania paliw kopalnych (1, 2, 3) w stosunku do odnawialnych źródeł energii.

W przypadku energetycznego wykorzystania biomasy ilość wytwarzanych gazów cieplarnianych w porównaniu ze spalaniem węgla kamiennego stanowi ok. 10% [42, 50, 103].

Usuwanie dwutlenku węgla ze spalin jest technicznie możliwe, ale obecnie bardzo kosztowne. Według [103, 104] jedynym obecnie realnym sposobem zmniejszenia emisji CO₂ jest podnoszenie sprawności obiegu cieplnego oraz zwiększenie udziału innych paliw (gazu ziemnego, biomasy). Najmniejszy obecnie koszt redukcji CO₂ można uzyskać z bloku IGCC omawianego dalej.

9.6. Wprowadzanie nowych technologii energetycznych

Do zaawansowanych i dalej rozwijanych technologii energetycznych należą [15]:

- układy gazowo-parowe ze zgazowaniem paliw,
- układy gazowo-parowe na gaz ziemny,
- układy skojarzone z turbiną gazową małej i średniej mocy oraz z silnikami tłokowymi.

Wśród rozwijających się czystych technologii węglowych wyróżniają się układy gazowo-parowe ze zgazowaniem węgla (*Integrated Gasification Combined Cycle*, IGCC). Koncepcja układu IGCC polega na zgazowaniu (z udziałem tlenu) węgla, odpadów porafineryjnych ropy naftowej lub biomasy do średniokalorycznego paliwa gazowego, które po oczyszczeniu najczęściej jest spalane w komorze w części układu z turbiną gazową, pracującej w układzie z turbiną parową. Przetwarzanie węgla na paliwa gazowe i ciekłe jest połączone z dokładnym oczyszczaniem tych produktów. Istotnymi cechami układu IGCC są: niskie emisje SO₂ i NO_x i możliwość uzyskania stosunkowo wysokich sprawności (obecnie 39 – 43%). Ta technologia należy obecnie do najczystszych ekologicznie metod produkcji energii elektrycznej i ciepła na paliwie węglowym, jednak koszt produkcji energii elektrycznej jest o ok. 40% wyższy niż w tradycyjnych elektrowniach [103].

9.7. Zwiększenie wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych

Pewne zmniejszenie obciążenia środowiska zapewnią odnawialne źródła energii (rys. 9): biomasa, hydroenergetyka, energia geotermalna, słoneczna i wiatru. Istnieje jednak wiele problemów ograniczających ich wykorzystanie. W przypadku wykorzystania energii słonecznej i wiatru są to przede wszystkim ograniczenia z powodów technicznych i dużych kosztów. Z kolei budowa elektrowni wodnych wiąże się z istnieniem odpowiednich uwarunkowań geograficznych i dużymi kosztami. Stały wzrost udziału odnawialnych źródeł energii w bilansie energetycznym świata przyczynia się do oszczędnego korzystania z zasobów kopalnych surowców energetycznych i do poprawy stanu środowiska.

Celem strategicznym UE jest zmniejszenie emisji CO₂ o 20% w 2020 r. w wyniku zwiększenia udziału energii pochodzącej ze

źródeł odnawialnych w bilansie energii pierwotnej. W Polsce istotnym argumentem za rozwojem pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych jest konieczność realizacji zobowiązań międzynarodowych, wynikających z potrzeby zapobiegania zmianom klimatu [103, 104].

Biomasa staje się paliwem wykorzystywanym do wytwarzania energii elektrycznej i ciepła. Spalanie i współspalanie biomasy w kotłach energetycznych wpływa na zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych i innych zanieczyszczeń oraz na zmniejszenie ilości odpadów [42, 43]. Biomasa wykorzystywana do celów energetycznych to głównie drewno i słoma w postaci stałej, biogaz lub biomasa przetwarzana na paliwa ciekłe. Poza biomasą odpadową prowadzi się uprawy roślin energetycznych, szybko rosnących roślin drzewiastych.

Energetyczne zasoby wodne Polski są niewielkie. Łączna moc zainstalowana dużych elektrowni wodnych (bez elektrowni szczytowo-pompowych, które nie są zaliczane do odnawialnych źródeł energii) wynosi ok. 630 MW, a małych 160 MW. Energetyka wodna w Polsce ma szansę na pewien rozwój w przyszłości. Systematycznie zwiększa się liczba instalowanych małych elektrowni wodnych, czyli obiektów o mocy poniżej 500 kW.

Zasoby energii geotermalnej w Polsce określa się jako znaczące. Wybudowano liczne instalacje geotermalne, prowadzona jest budowa dalszych instalacji, głównie w celu zaopatrzenia w ciepło obiektów budowlanych. Możliwy jest znaczny rozwój tej formy energetyki w Polsce.

Energetyka wiatrowa w Polsce rozpoczęła rozwój dopiero na początku lat 90. XX wieku. Uruchomiono pewną liczbę farm wiatrowych oraz małych autonomicznych siłowni wiatrowych i dalej ma miejsce dynamiczny rozwój tej formy energetyki. Jednakże energia elektryczna produkowana w elektrowniach wiatrowych w Polsce jest bardzo droga ze względu na wysokie koszty elektrowni i bardzo niski poziom ich wykorzystania z powodu słabych warunków wiatrowych [11]. Energetyka słoneczna praktycznie jest najmniej rozpowszechnioną formą energii odnawialnej. W Polsce występuje nierównomierny rozkład promieniowania słonecznego w cyklu rocznym, ok. 80% całkowitej rocznej sumy nasłonecznienia przypada na sześć miesięcy sezonu wiosenno-letniego. W kilku regionach kraju stosowane są kolektory słoneczne, głównie do podgrzewania wody w budynkach, zbiornikach, basenach oraz wody technologicznej w małych jednostkach gospodarczych. W Polsce zainstalowano nieliczne ogniwa fotowoltaiczne, w których dokonuje się konwersji promieniowania słonecznego w energię elektryczną.

Według przewidywań w UE największy wkład do zwiększenia zużycia energii ze źródeł odnawialnych zapewni biomasa, w następnej kolejności energia wiatru. Spodziewany jest także znaczny wzrost zastosowania kolektorów promieniowania

słonecznego, mniejszy udział jest oczekiwany ze strony fotowoltaiki i energii geotermalnej. Natomiast energia wodna prawdopodobnie pozostanie drugim co do wielkości odnawialnym źródłem energii, ale z małą możliwością rozwoju.

9.7. Udział energetyki jądrowej

Aktualnie w Europie energetyka jądrowa pokrywa zapotrzebowanie na ok. 30% energii elektrycznej, a na świecie jest to 6%. Atrakcyjność ekologiczna energetyki jądrowej wynika głównie z braku emisji zanieczyszczeń chemicznych. Atrakcyjność ekonomiczna energetyki jądrowej opiera się przede wszystkim na niskich kosztach paliwa. Koszty budowy elektrowni jądrowej są jednak wysokie, wyższe niż w przypadku elektrowni węglowej i znacznie wyższe niż w przypadku elektrowni gazowej, głównie z uwagi na rozbudowane systemy bezpieczeństwa zapobiegające wystąpieniu awarii oraz systemy ochrony personelu przed promieniowaniem radioaktywnym. Według [11] koszty produkcji energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych są z reguły niższe, a niekiedy znacznie niższe niż w elektrowniach węglowych.

W stosowanych obecnie metodach obliczania kosztów produkcji energii elektrycznej koszty społeczne w środowisku są zwykle pomijane. Wysokie koszty budowy elektrowni jądrowych w stosunku do elektrowni węglowych wynikają z faktu, że w elektrowniach jądrowych nastąpiło praktycznie pełne włączenie kosztów systemów zabezpieczających środowisko do rachunku efektywności ekonomicznej, czyli wprowadzenie kosztów zewnętrznych do kosztów wewnętrznych elektrowni. Uwzględnienie w większym stopniu kosztów środowiskowych w kosztach produkcji energii elektrycznej w elektrowniach węglowych umożliwiłoby porównanie rzeczywistych kosztów. Według [11] energia elektryczna uzyskana z energetyki jądrowej jest również tańsza od energii odnawialnej, w szczególności od energii pozyskanej z elektrowni wiatrowych, głównie ze względu na wysokie koszty budowy i słabe warunki wiatrowe w Polsce powodujące niski stopień wykorzystania tych urządzeń.

Przy obecnym poziomie rozwoju techniki w energetyce jądrowej, zwłaszcza w zakresie zabezpieczenia przed promieniowaniem radioaktywnym, zagrożenie promieniowaniem zostało znacznie zmniejszone. Na rynku energetycznym dostępne są elektrownie jądrowe III generacji [11], które zapewniają bardzo wysoki poziom bezpieczeństwa, pozwalający na ochronę przed najcięższymi uszkodzeniami i błędami ludzi.

 Anna Kucharska

„Transformacja energetyczna. Wyzwania dla Polski wobec doświadczeń krajów Europy Zachodniej”

Wydawnictwo Naukowe PWN SA