



POLITYKA ENERGETYCZNA
Tom 6 ♦ Zeszyt specjalny ♦ 2003
Wyd. Instytut GSMiE PAN ♦ Kraków ♦ s. 389 – 398
PL ISSN 1429–6675

Tadeusz OLKUSKI*, Eugeniusz MOKRZYCKI**

Miejsca powstawania strat energii chemicznej zawartej w węglu w procesach pozyskania węgla oraz wytwarzania energii elektrycznej

Streszczenie

W artykule przedstawiono straty energii występujące podczas eksploatacji węgla w kopalni oraz przetwarzania go na energię elektryczną. Strat nie można uniknąć. Można jedynie, i trzeba, dążyć do ich zmniejszania w miarę posiadanych możliwości. Na etapie eksploatacji jest to wybór odpowiedniego systemu urabiania. W elektrowni straty zależą głównie od stosowanych urządzeń i rodzaju przemian energetycznych. Małe i/lub stare urządzenia powodują zwykle większe straty niż nowe duże i nowoczesne.

SŁOWA KLUCZOWE: węgiel kamienny, energia, straty

Wprowadzenie

W procesach energetycznego wykorzystania węgla tylko część energii chemicznej zawartej w paliwie może być skutecznie odzyskana. Straty energii występują na wszystkich etapach przygotowania i wykorzystania węgla. Już podczas eksploatacji występują straty spowodowane czynnikami geologicznymi, górnictwymi i technicznymi. W elektrowni lub w elektrociepłowni również występują straty. Zalicza się do nich straty w kotle, w turbinie oraz w turbogeneratorze. Występują jeszcze straty na etapie wzbogacania węgla. Ze względu na obszerność zagadnienia analiza tych strat będzie przedmiotem odrębnej publikacji.

Straty w procesach pozyskania węgla

W procesie eksploatacji węgla kamiennego nie jest możliwe całkowite wydobycie substancji węglowej. Pewna część zasobów pozostaje pod ziemią i stanowi straty eksploatacyjne. Jeśli przyjąć, że w zasobach przemysłowych czyli zasobach określanych na etapie opracowywania projektu

* Mgr inż., ** Dr hab. inż. Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków; Wydział Paliw i Energii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków
Recenzował prof. dr hab. inż. Wiesław BLASCHKE

zagospodarowania złoża, jako technicznie możliwe do eksploatacji i ekonomicznie uzasadnione znajduje się 100% energii chemicznej, to straty eksploatacyjne stanowią około 2—4% zasobów [2, 3]. Główną przyczyną strat eksploatacyjnych jest ścianowy system eksploatacji powodujący pozostawanie dużych ilości węgla w złożu.

Straty pozaeksploatacyjne złoża wynoszą około 14—18% i spowodowane są czynnikami górnictwymi i geologicznymi [7].

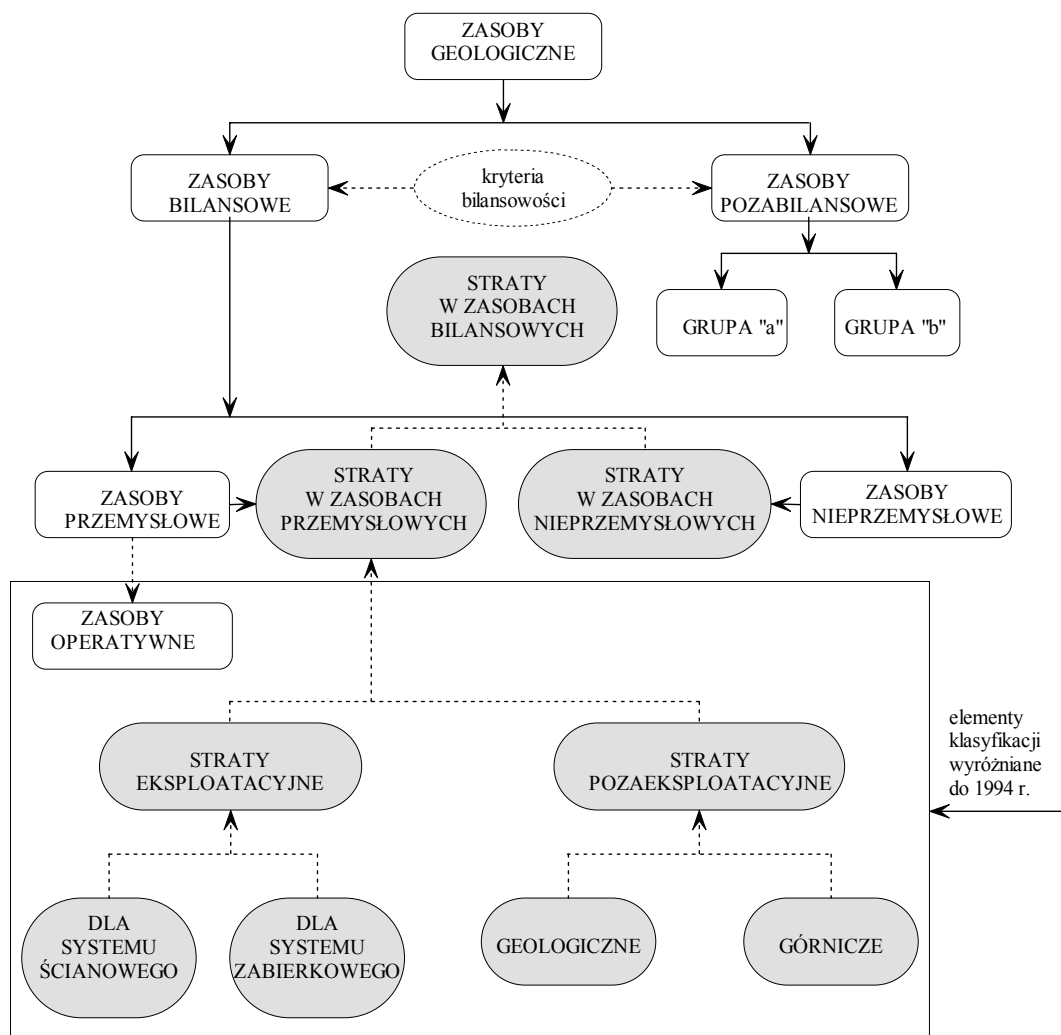
Do czynników górnictwowych powodujących około 6—8% strat zalicza się:

- ◆ pozostawianie filarów oporowych,
- ◆ rozcięcie złoża starymi wyrobiskami,
- ◆ zagrożenie tapaniami,
- ◆ występowanie ognisk pożarowych,
- ◆ sąsiedztwo zawodnionych starych zrobów.

Do czynników geologicznych zalicza się:

- ◆ skomplikowaną tektonikę,
- ◆ ścienienie i zanik pokładu,
- ◆ trudnourabialne przerosty (zrosty substancji organicznej z substancją mineralną) w węglu,
- ◆ niekorzystne warunki stropowe.

Straty w zasobach geologicznych przedstawiono na rys. 1.



Źródło: [1]

Rys. 1. Rodzaje strat węgla kamiennego na etapie jego eksploatacji
 Fig. 1. Losses of coal at the stage of coal exploitation

Eksploatacja ścianowa, stosowana powszechnie ze względu na koncentrację wydobywania, powoduje powstawanie strat poprzez rezygnację z wydobywania nieregularnych i nieforemnych parcel. Dążąc do osiągnięcia rentowności, kopalnie rezygnują z eksploatacji pokładów cienkich oraz partii złóż o dużych zagrożeniach tektonicznych, wymagających stosowania drogich systemów zabezpieczających. Rezygnuje się również z eksploatacji pokładów nachylonych pod kątem większym niż 30—45° oraz pokładów silnie zasiarczonych i zapopielonych. Również ograniczenie stosowania podsadzki płynnej uniemożliwia eksploatację w obszarach, w których nie mogą być dotrzymane wymagania dotyczące wielkości osiadania powierzchni. Wszystkie te zasoby są bezpowrotnie stracone.

Ocenia się, że na każde wydobyte 100 ton węgla kamiennego ubywa 187 ton zasobów bilansowych w wyniku strat i przekwalifikowania tych zasobów do pozabilansowych [5].

Straty w procesach wytwarzania energii elektrycznej

Przetwarzanie energii chemicznej w elektrowni lub elektrociepłowni odbywa się trójstopniowo. W pierwszym etapie następuje zamiana energii chemicznej paliwa na energię cieplną. Proces ten zachodzi w kotle. Następnie energia cieplna w postaci pary transportowana jest do turbiny gdzie zamieniana jest na energię mechaniczną. Trzeci etap przetwarzania energii polega na zamianie energii mechanicznej na energię elektryczną w generatorze.

Przemiany energetyczne poszczególnych rodzajów energii rozpatrywać można na poziomie pojedynczego bloku energetycznego, jak również dla całej elektrowni. Ponieważ elektrownia jako całość składa się z pojedynczych bloków a całkowita moc, sprawność czy też koszty eksploatacji są prostą sumą określonych parametrów poszczególnych bloków, można więc posługiwać się blokiem energetycznym jako układem, w którym zachodzą wszelkie interesujące nas przemiany.

Poniżej omówiono poszczególne elementy bloku energetycznego z uwzględnieniem strat w nich powstających.

Straty w kotle

Kocioł jest urządzeniem służącym do wytwarzania pary wodnej w wyniku przemiany energii chemicznej paliwa w energię cieplną. Wyróżnia się wiele rodzajów kotłów [4]. I tak, w zależności od:

- ◆ przeznaczenia: energetyczne, przemysłowe, grzewcze;
- ◆ postaci wyjściowej czynnika roboczego: wodne i parowe;
- ◆ rodzaju paleniska: warstwowe (z rusztem stałym, ruchomym, narzutowe, ze złożem fluidalnym) i komorowe;
- ◆ konstrukcji głównej powierzchni ogrzewalnej: płomienicowe, płomienicowo-płomieniówkowe, rurowe;
- ◆ liczby ciągów (nawrotów) spalin: jednociągowe, dwuciągowe, wielociągowe;
- ◆ postaci odprowadzanego żużla: z odprowadzeniem stałego żużla i z odprowadzeniem ciekłego żużla;
- ◆ obiegu wody: z obiegiem naturalnym, z obiegiem wspomaganym, z obiegiem wymuszonym, z obiegiem przepływowym.

Wszystkie kotły pracują w połączeniu z urządzeniami pomocniczymi, do których zalicza się: wentylatory (powietrza, spalin, młynowe i uszczelniające), pompy (zasilające i przewalowe), urządzenia do transportu i przygotowania paliwa (podajniki węgla, młyny), urządzenia do usuwania żużla i popiołu, urządzenia do odpylania spalin, aparaturę kontrolno—pomiarową oraz urządzenia do sterowania procesami w kotle.

Straty energii cieplnej w kotle spowodowane są trzema zjawiskami, są to niecałkowite i niezupełne spalanie, straty wylotowe i straty promieniowania.

Straty ciepła wskutek niecałkowitego spalania — S_n (%), spowodowane są tym, że część paliwa przechodzi do popiołu i żużla oraz jest unoszona przez spaliny w postaci koksiku. Straty te oblicza się według wzoru [4, 14]:

$$S_n = \frac{100Q_k}{m_B Q_r} \sum m_{Aj} c_{Aj} \quad (1)$$

gdzie:

S_n — straty niecałkowitego spalania, %,
 m_{Aj} — strumień masy popiołu i żużla, kg/s,
 m_B — strumień masy paliwa dostarczonego do kotła, kg/s,
 c_{Aj} — udział masowy części palnych w popiele i żużlu, kg/kg,
 Q_k — wartość opałowa koksu — 34 000 kJ/kg,
 Q_r — wartość opałowa paliwa, kJ/kg.

Straty te wynoszą dla kotłów rusztowych 2—14% oraz 1—2% dla kotłów pyłowych.

Straty spowodowane niepełnym spalaniem — S_{CO} , wynikające z obecności gazów palnych, a zwłaszcza CO w spalinach, oblicza się ze wzoru [4, 14]:

$$S_{CO} = v_s CO \frac{Q_{CO}}{Q_r} \quad (2)$$

lub ze wzoru uproszczonego:

$$S_{CO} = \beta \frac{CO}{CO + CO_2} \quad (3)$$

gdzie:

S_{CO} — straty niepełnego spalania, %,
 Q_{CO} — wartość opałowa CO — 12 760 kJ/m³,
 v_s — objętość spalin z 1 kg paliwa, m³/kg,
 CO — zawartość tlenku węgla w spalinach, %,
 CO_2 — zawartość dwutlenku węgla w spalinach, %,
 β — współczynnik przeliczeniowy (dla węgla kamiennego $\beta = 60$),
 Q_r — wartość opałowa paliwa kJ/kg.

Straty te wynoszą dla kotłów pyłowych 0,5% oraz do 5% dla kotłów rusztowych.

Straty wylotowe (kominowe) — S_w , są to straty ciepła unoszonego przez spaliny do otoczenia. Straty kominowe osiągają najwyższe wielkości w porównaniu do poprzednio omówionych strat i mają decydujący wpływ na sprawność kotła. Wynoszą one od 6 do 25%. Oblicza się je ze wzoru [4, 14]:

$$S_w = v_s \frac{c_{sp}(t_s - t_0)}{Q_r} 100 \quad (4)$$

lub z wzoru empirycznego Siegerta:

$$S_w = \alpha \lambda \frac{t_s - t_0}{CO_{2\max}} = \alpha \frac{t_s - t_0}{CO_2} \quad (5)$$

gdzie:

S_w — straty wylotowe (kominowe), %,
 c_{sp} — średnie ciepło właściwe spalin i powietrza w zakresie temperatur t_s — t_0 ,
 t_s — temperatura spalin opuszczających kocioł, °C,
 t_0 — temperatura powietrza pobranego do spalania (temperatura otoczenia), °C,
 α — współczynnik zależny od zawartości wilgoci w paliwie i CO₂ w spalinach (dla węgla kamiennego wynosi około 0,65),
 CO_2 — zawartość dwutlenku węgla w spalinach, %,
 λ — nadmiar powietrza określany na podstawie analizy chemicznej spalin, z wykresów lub ze wzoru:

$$\lambda = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \cdot \frac{O_2 - 0,5CO}{N_2}} \quad (6)$$

gdzie:

$$N_2 = 100 - (CO_2 + CO), \% \quad (7)$$

albo ze wzorów uproszczonych:

$$\lambda \approx \frac{21}{21 - O_2} \quad (8)$$

$$\lambda \approx \frac{CO_{2max}}{CO_2} \quad (9)$$

gdzie:

- N_2 — zawartość azotu w spalinach, %,
- O_2 — zawartość tlenu w spalinach, %,
- CO — zawartość tlenku węgla w spalinach, %,
- CO_2 — zawartość dwutlenku węgla w spalinach, %,
- CO_{2max} — maksymalna zawartość dwutlenku węgla w spalinach, którą można dla znanych udziałów masowych obliczyć z wzoru:

$$CO_{2max} = \frac{21c}{c + 2,37 \left(h - \frac{o+s}{8} \right)} \quad (10)$$

gdzie:

- c, h, o, s — udziały masowe węgla — c , wodoru — h , tlenu — o i siarki — s ,
- $2,37$ — współczynnik przeliczeniowy,

Dla węgla kamiennego CO_{2max} wynosi 18,5 — 19,1%.

Strata promieniowania — S_p jest to strata ciepła oddawanego przez obudowę kotła. Wyznacza się ją z wykresów empirycznych [9]. W zależności od wielkości i rodzaju kotła strata ta wynosi od 0,3 do 3%. Dla dużych kotłów procentowa ilość strat jest zwykle mniejsza.

Wszystkie wyżej wymienione straty powodują spadek sprawności kotła. Im wyższe straty tym mniejsza sprawność. Sprawność kotła wyznacza się metodą bezpośrednią lub pośrednią. Metodę bezpośrednią stosuje się w przypadku możliwości dokonania dokładnych pomiarów masy zużytego paliwa i jego średniej wartości opałowej. Metodę pośrednią stosuje się do obliczeń dużych kotłów energetycznych o sprawności brutto powyżej 80%. Dla kotłów o wydajności znamionowej poniżej 50 Mg/h metodę pośrednią można stosować przy spalaniu węgla o zawartości popiołu A^r poniżej 25% oraz gdy zawartość części palnych w żużlu nie przekracza 20% (PN—72/M—34128).

Sprawność ogólna kotła jest to stosunek ilości ciepła dostarczonego do kotła i przejętego przez wodę i parę wodną do ilości ciepła wytworzonego przez spalanie paliw [6, 8, 11]:

$$\eta = \frac{Q_o}{Q} \quad (11)$$

$$Q_o = D_p (i_p - t_1) \quad (12)$$

$$Q = B \cdot Q_{pal} \quad (13)$$

gdzie:

- D_p — ilość odparowanej wody w kotle, kg/h,

i_p — całkowita ilość ciepła w 1 kg wytworzonej pary (entalpia pary), kJ/kg,

t_1 — temperatura wody zasilającej,

B — ilość spalonego węgla, kg/h,

Q_{pal} — wartość opałowa paliwa, kJ/kg,

Q — ilość ciepła wytworzona poprzez spalanie paliw, kJ/h.

Sprawność ogólna η jest iloczynem sprawności paleniska η_p i sprawności powierzchni ogrzewalnych η_{po} , czyli:

$$\eta = \eta_p \cdot \eta_{po} \quad (14)$$

W praktyce η_p zależy od rodzaju paleniska i stopnia dokładności odbywającego się w nim spalania i wynosi 0,85—0,97. Z kolei η_{po} zależy zarówno od rodzaju kotła, jak i od możliwości odbioru ciepła przez kocioł. Dla kotłów bez przegrzewacza i innych urządzeń odzyskujących ciepło spalin wynosi 0,70—0,80, a w kotłach z przegrzewaczem pary, podgrzewaczem wody i podgrzewaczem powietrza dochodzi do 0,94. Sprawność ogólna η zawiera się w przedziale 0,65—0,92.

Zazwyczaj sprawność teoretyczną oblicza się poprzez wyliczenie strat i odjęcie od 100 [8]:

$$\eta_t = 100 - \sum S \quad (15)$$

gdzie:

η_t — sprawność teoretyczna, %,

S — straty, %.

Dla dużych kotłów przyjmuje się rezerwę uwzględniającą błędy obliczeń wynikłe między innymi z zanieczyszczeń powierzchni ogrzewalnych, błędów pomiarowych itp., która wynosi 0,25—3,0%. W związku z tym sprawność całkowita η (%) wynosi:

$$\eta = \eta_t - (0,25 - 3,0) \quad (16)$$

W literaturze można znaleźć różne sposoby wyznaczania sprawności kotłów energetycznych [12,13]. Przeciętne sprawności niektórych kotłów zaprezentowano w tabeli 1 [11].

TABELA 1. Przeciętne sprawności niektórych kotłów, %

TABLE 1. Average efficiency of some boilers, %

Rodzaj kotła	Sprawność [%]
Kotły płomienicowe	50—60
Kotły płomieniówkowo-płomienicowe	70—90
Małe kotły rusztowe	72—78
Duże kotły rusztowe	75—85
Kotły pyłowe	87—92

Źródło: [11]

Wielkość strat w kotle w dużej mierze zależy również od nadmiaru powietrza. Z danych empirycznych wynika, że suma strat jest najmniejsza dla nadmiaru powietrza $\lambda = 1,25$ i wynosi około 13% [4].

Straty w turbinie

W turbinie parowej następuje przemiana energii cieplnej zawartej w parze w energię mechaniczną. Turbiny można podzielić na wiele rodzajów ze względu na przyjęte kryterium. I tak ze względu na:

- ◆ — zasadę działania: akcyjne (ze stopniowaniem ciśnienia lub prędkości) i reakcyjne,
- ◆ — kierunek przepływu pary: osiowe i promieniowe,

- ◆ — stan czynnika termodynamicznego: na parę przegrzaną z ciśnieniem pod— i nadkrytycznym i na parę nasyconą,
- ◆ — liczbę: kadłubów, wylotów, wałów,
- ◆ — specyfikę konstrukcji: komorowe, bębnowe, komorowo—bębnowe,
- ◆ — sposób realizacji obiegu cieplnego: kondensacyjne, przeciwprężne, upustowo—kondensacyjne, upustowo—przeciwprężne, kondensacyjno—ciepłownicze, upustowo—ciepłownicze,
- ◆ — udział w pokrywaniu obciążeń dobowych w systemie elektroenergetycznym: do obciążeń podstawowych, podszczytowych, szczytowych.

Straty energii powstające w turbinie mogą być wewnętrzne i zewnętrzne.

Do strat wewnętrznych zalicza się straty w zaworach turbiny (dławienie, 3—5% ciśnienia dolotowego), straty w dyszach i kierownicach, w wieńcu wirnikowym, straty wylotowe (2—4% dla turbin kondensacyjnych), straty z powodu tarcia i wentylacji wirnika, straty z powodu przepływu pary przez nieszczelności wewnętrzne oraz straty z powodu wilgotności pary (straty hamowania). Powoduje to obniżenie sprawności wewnętrznej od 13 do 35%.

Do strat zewnętrznych zaliczamy straty z powodu nieszczelności dławic końcowych (1,5—3% pary zużytej przez turbinę), straty przez promieniowanie (0,5—3%) i straty mechaniczne.

Straty z powodu nieszczelności można zmniejszać poprzez wykorzystywanie pary z uszczelnień w dalszym procesie. Straty promieniowania zależą od jakości izolacji można je minimalizować poprzez stosowanie jak najlepszych izolatorów. Turbiny dużej mocy mają zwykle mniejsze straty nie przekraczające 1%. W turbinach małej mocy straty przypadające na promieniowanie są większe i dochodzą do 3%.

Straty w turbogeneratorze

Przetwarzanie energii mechanicznej na energię elektryczną następuje w trójfazowych prądnicach synchronicznych nazywanych, w przypadku napędzania turbinami parowymi, turbogeneratorami.

Straty mocy mechanicznej — P_m doprowadzonej do generatora można podzielić na straty niezależne od obciążenia, tak zwane straty biegu jałowego oraz straty zależne od obciążenia. Do pierwszych z nich zaliczamy straty mechaniczne na pokonanie oporów tarcia w łożyskach i na wentylację (1—1,5% mocy znamionowej — P_N) oraz straty w żelazie stojana wskutek prądów wirowych i przemagnesowania blach (0,5—1%).

Do drugiej grupy należą straty w uzwojeniu stojana (0,3—0,8%) i straty w uzwojeniu wzbudzenia 0,3%.

Straty mechaniczne w turbogeneratorach chłodzonych powietrzem stanowią 40% strat całkowitych. W przypadku zastosowania chłodzenia wodorowego zmniejszają się do 0,2—0,3% P_N .

Znając doprowadzoną moc mechaniczną — P_m i moc elektryczną — P_e mierzoną na zaciskach generatora można obliczyć jego sprawność η_g . Wynosi ona zwykle 0,96 dla generatorów chłodzonych powietrzem, a w przypadku chłodzenia wodno—wodorowego oraz wodnego — 0,987.

Wnioski

Nie jest możliwe uniknięcie strat energii zawartej w węglu na etapie eksploatacji. Sposobem na ograniczenie tych strat mogło by być zaniechanie stosowania ścianowego systemu eksploatacji. Jest to jednak w praktyce trudne, gdyż system ścianowy zapewnia największą wydajność przy najmniejszych kosztach eksploatacyjnych. Straty eksploatacyjne wynoszą 2—4%, a pozaeksploatacyjne 14—18%.

Na etapie wytwarzania energii elektrycznej straty powstają głównie w kotle podczas zamiany energii chemicznej węgla w energię cieplną pary wodnej. Są to głównie straty niecałkowitego i niepełnego spalania, straty promieniowania oraz straty wylotowe zwane także stratami kominowymi. Również powstają straty w turbinie parowej, gdzie następuje przemiana energii cieplnej zawartej w parze w energię mechaniczną. Straty te mogą być wewnętrzne i zewnętrzne. Ponadto

powstają straty w turbogeneratorach, w których następuje przetwarzanie energii mechanicznej na energię elektryczną. W poszczególnych ogniwach łańcucha przemian energetycznych powstają straty energii, których wielkość jest uzależniona od szeregu różnych czynników.

Opracowanie zostało częściowo wykonane w ramach pracy statutowej AGH nr 11.11.210.64.2

Literatura:

- [1] DARSKI J., KICKI J., SOBCZYK E.J., 2001 — Raport o stanie gospodarki zasobami złóż węgla kamiennego, Studia, Rozprawy, Monografie nr 85. Wyd. IGSMiE PAN. Kraków.
- [2] KICKI J., 1996 — Straty zasobów węgla w kopalniach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego w 1994 r. V Konferencja Wykorzystanie złóż kopalin użytecznych. Sympozja i konferencje. CPPGSMiE PAN nr 21, s. 209—225.
- [3] KICKI J., WACŁAWSKI J., 1993 — Gospodarka zasobami złóż węgla kamiennego w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym w latach 1981—1990. CPPGSMiE PAN, Studia i Rozprawy. Cz. 1, z. 24. Cz. 2, z. 30.
- [4] LAUDYN D., PAWLIK M., STRZELCZYK F., 1997 — Elektrownie. WNT. Warszawa.
- [5] MALARA J., 2000 – Paliwa w gospodarce energetycznej Polski. Przegląd Górniczy Nr 7-8/2000. s. 3—19.
- [6] MIKULSKI Cz., 1954 — Kotły parowe (wytwornice pary). PWN. Warszawa.
- [7] NIEĆ M., 1997 — Analiza bilansu zasobów węgla kamiennego w nawiązaniu do programu restrukturyzacji górnictwa węglowego. Gospodarka Surowcami Mineralnymi. t. 13, z. 1. s. 5 — 28.
- [8] ORŁOWSKI P., DOBRZAŃSKI W., SZWARC E., 1979 — Kotły parowe. Konstrukcja i obliczanie. WNT. Warszawa.
- [9] OSTROWSKI Z., 1969 — Elektrownie i elektrociepłownie kondensacyjne. [W:] Informator energetyka. WNT. Warszawa. rozdz. 4. s. 298—302.
- [10] PN—72/M—34128 — Kotły parowe. Wymagania i badania odbiorcze.
- [11] PRONOBIS M., 2002 — Modernizacja kotłów energetycznych. Wyd. Naukowo—Techniczne. Warszawa.
- [12] SOBOTA J., 2001 — Propozycja modyfikacji sposobu wyznaczania sprawności kotłów brutto metodą pośrednią według PN—72/M—34128. Energetyka nr3. s. 125 – 132.
- [13] SOBOTA J., 2002 — Czynniki decydujące o wyborze metody wyznaczania sprawności kotłów energetycznych. Energetyka nr 5, s. 321—315.
- [14] ZIÓLKOWSKI R., 1974 — Kotły parowe [W:] Poradnik termoeenergetyka. WNT. Warszawa.

Tadeusz OLKUSKI, Eugeniusz MOKRZYCKI

Places of erasing of chemical energy losses existing in coal in processes of coal exploitation and electrical energy generation

KEY WORDS: hard coal, energy, losses

Abstract

This paper presents energy losses of coal arising at the stage of coal production and electrical energy generation. It is impossible to avoid energy losses. the only thing that could be done is to diminish them. At the stage of coal exploitation losses depend on geological and mining factors as well as on choice of technical means of exploitation. In the power plants the losses consist of the boiler losses, losses throughout the turbine and the losses in the turbogenerator.