

POTENCJAŁ ZASOBOWY WĘGLA BRUNATNEGO W POLSCE I MOŻLIWOŚCI JEGO WYKORZYSTANIA

RESOURCE LIGNITE POTENTIAL IN POLAND AND ITS USABILITY

JACEK ROBERT KASIŃSKI¹

Abstrakt. Bardzo bogate zasoby węgla brunatnego w Polsce, formalnie przekraczające 37 Pt (łącznie zasoby udokumentowane i perspektywiczne), są faktycznie dostępne jedynie w niewielkiej części. Wynika to z istniejącego konfliktu z elementami środowiska naturalnego, a także, w coraz większym stopniu, z wciąż rozwijającą się infrastrukturą. Dlatego istotnym problemem jest ochrona najbardziej wartościowych złóż, wytypowanych w wyniku kompleksowej waloryzacji, przed zagospodarowaniem ich powierzchni.

Obok powszechnie stosowanej odkrywkowej eksploatacji węgla brunatnego rozważa się zastosowanie wielu niekonwencjonalnych technologii utylizacji węgla. Spośród nich najbardziej atrakcyjne wydają się techniki przetwarzania węgla bezpośrednio w złożu dla pozyskania gazu, który mógłby stanowić ekwiwalent gazu ziemnego: gazyfikacja termiczna (UCG) i biokonwersja (BUCC). W obu przypadkach omijany jest problem fizycznego przemieszczenia węgla na powierzchnię i jego spalania w elektrowniach. Nie można jednak lekceważyć wpływu podziemnej przeróbki węgla na powierzchnię terenu, który w wielu wypadkach może być nie mniejszy niż w przypadku wydobycia metodami górniczymi, będąc jednocześnie znacznie mniej przewidywalnym. Najbezpieczniejszą metodą eksploatacji węgla brunatnego pozostaje zatem – paradoksalnie – metoda odkrywkowa.

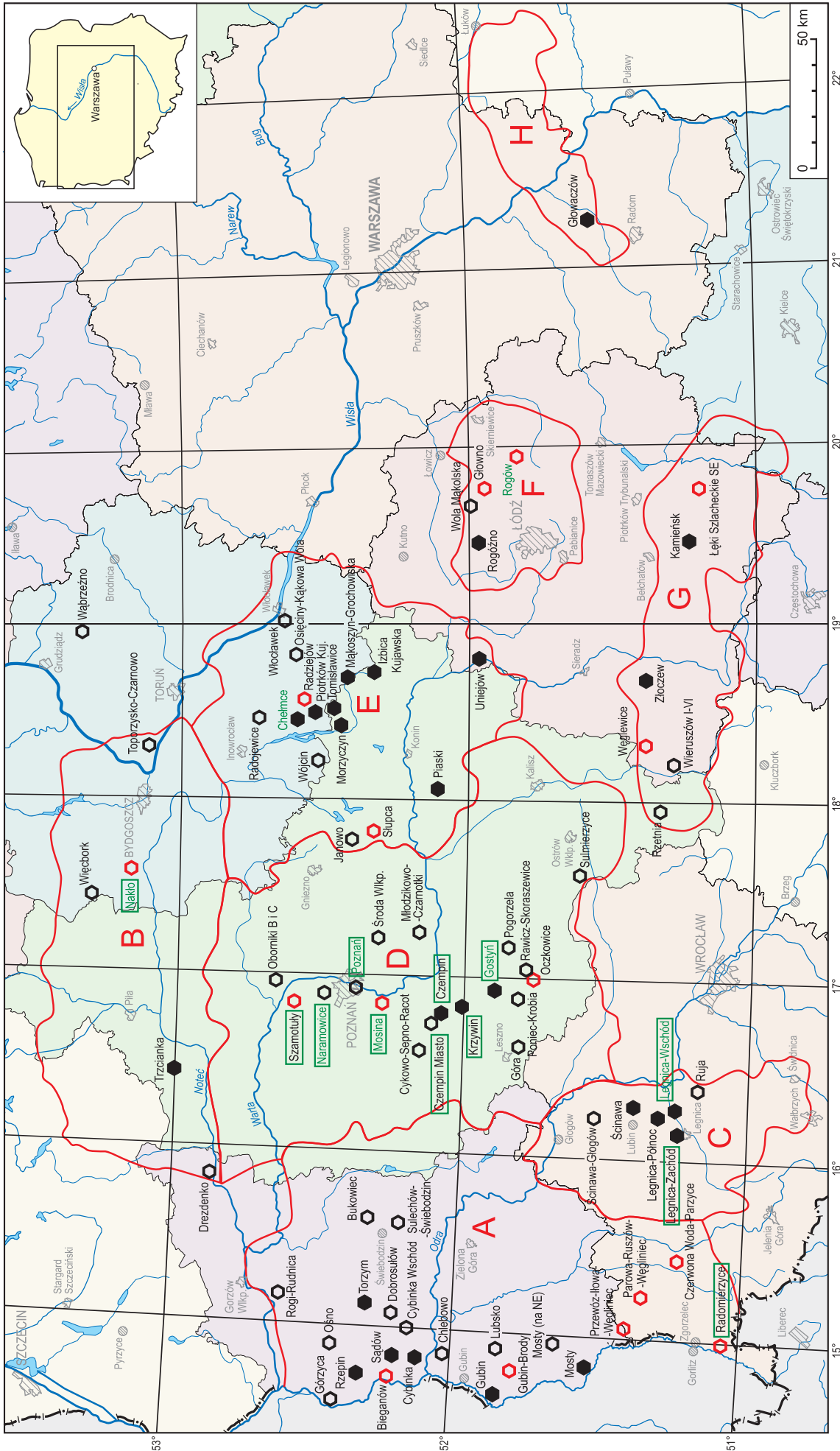
Słowa kluczowe: węgiel brunatny, zasoby, eksploatacja, technologie niekonwencjonalne, Polska.

Abstract. Very rich lignite resources of Poland actually exceed 37 Pt (measured, indicated, inferred and reconnaissance ones together). In fact, only a little part of them is really accessible. It is caused by conflict with elements of natural environment and also, increasingly, with constantly developing infrastructure. Therefore, preservation of the most valuable deposits against building over their surface is a substantial trouble: the deposits designed to preservation should be predicted after a complex valorization.

Beside commonly used opencast mining of lignite, some unconventional technologies of lignite utilization are considered. Among them, underground lignite processing inside a deposit for gaining of gas – an equivalent of natural gas – underground coal gasification (UCG) and bacterial underground coal conversion (BUCC) looks like most attractive. The question of physical lignite transportation to the surface and its burning in power plants looks to be avoided in both the cases. However, an impact of underground coal processing on the surface should not be disregarded. In many cases, it may be not lower than in the case of mining excavation, and it is usually much less predictable. Therefore, opencast lignite excavation is a safest method of lignite exploitation.

Key words: lignite, resources, exploitation, unconventional technologies, Poland.

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; e-mail: jacek.kasinski@pgi.gov.pl



- złoże udokumentowane
measured/indicated/inferred mineral deposits
- złoże o potencjalnej przemysłowości
deposits of potential economic value
- złoże bez potencjalnej przemysłowości
deposits without potential economic value
- Słupca
reconnaissance mineral deposits
- Chelme
deposits of potential economic value
- Gosyń
deposits without potential economic value
- złoże o największym konflikcie eksploatacji ze środowiskiem
deposits of major mining/environment conflict
- złoże o najniższym poziomie akceptacji społecznej
deposits of low level of social acceptance
- złoże w których oba czynniki występują jednocześnie
deposits impacted simultaneously by the both elements above
- granice rejonów węglonośnych
limits of the lignite-bearing regions

OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ZŁÓŻ WĘGLA BRUNATNEGO W POLSCE I OKREŚLENIE ICH POTENCJAŁU SUROWCOWEGO

Węgłe brunatne występują powszechnie na obszarze Niżu Polskiego i w basenach satelickich w utworach jury, kredy, paleogenu i neogenu, przy czym znaczenie gospodarcze mają obecnie jedynie węgle brunatne miękkie (ang. hypolignite) występujące w utworach kenozoicznych (Ciuk, Piwocki, 1990). Szczególnie bogate złoża występują w zachodniej części Polski (fig. 1). Te właśnie złoża stanowią najważniejsze źródło surowców energetycznych w Polsce.

Wśród utworów paleogenu pewne znaczenie gospodarcze ma tylko jeden pokład węgla, występujący na przestrzeni około 7 700 km² – oligoceński V pokład czempiński. Pokład ten osiąga znaczne miąższości (do 45 m) jedynie w kilku złożach (Rogóźno, Łąnięta), z których żadne nie jest w chwili obecnej eksploatowane. Niewielkie znaczenie mają także dwa starsze pokłady mioceni – IV pokład dąbrowski (fig. 2A), występujący na obszarze 7 000 km², osiągający miąższość do 25 m (złoża: Gubin, Gubin–Zasieki–Brody, Ścinawa) i III pokład ścinawski, rozprzestrzeniony na obszarze około 30 000 km², o miąższości do 35 m (złoża Mosty, Ścinawa). Największą rolę odgrywają dwa młodsze pokłady mioceni: II pokład łżycki (fig. 2B), zajmujący powierzchnię około 61 000 km², o grubości do 40 m (złoża: Czempin, Gostyń, Krzywiń, Lubstów, Mosina, Naramowice, Radomierzyce, Szamotuły), a w zapadliskach tektonicznych (łącznie z II pokładem łżyckim) nawet do 250 m (złoża Bełchatów) oraz I pokład środkowopolski (fig. 2C) o powierzchni około 70 000 km² i miąższości osiągającej 20 m (złoża regionu konińskiego).

Pomimo planowanego zwiększenia wykorzystania w energetyce gazu ziemnego i spodziewanego wzrostu produkcji energii ze źródeł odnawialnych przewiduje się, że jeszcze w 2030 roku 60% energii elektrycznej będzie produkowane w elektrowniach opalanych węglem kamiennym i brunatnym. Węgiel brunatny jest jednak obecnie najtańszym źródłem energii (około 19 USD/MWh, co stanowi około 65% kosztów energii uzyskiwanej z węgla kamiennego). Cztery z pięciu wielkich elektrowni opalanych węglem brunatnym produkują energię tańszą niż elektrownia „Opole”, najbardziej ekonomiczna elektrownia pracująca na węglu kamiennym. Sprzy-

jające warunki geologiczne i zaawansowana technologia wydobycia (nie bez znaczenia jest niski koszt transportu wielkogabarytowych ładunków taśmociągami) powodują, że w przeliczeniu na wartość opałow (kaloryczność) węgiel brunatny jest najtańszym źródłem energii w Polsce i pozostanie takim w dającej się przewidzieć perspektywie czasowej (Bielikowski i in., 1999; Kasztelewicz, 2008; Kasztelewicz, Tajduś, 2009).

Bezpośrednie zaplecze zasobowe górnictwa węgla brunatnego stanowią geologiczne zasoby bilansowe w czynnych i budowanych zakładach wydobywczych. Wynoszą one ogółem 1 789,25 Tg, czyli do chwili obecnej zagospodarowano 13,1% udokumentowanych geologicznych zasobów bilansowych węgla brunatnego w Polsce. Przeważającą część zasobów złóż zagospodarowanych (1 708,46 Tg, co stanowi 95,5% całości zasobów tej grupy złóż) rozpoznano z wysoką dokładnością do kategorii A+B+C₁. Zasoby przemysłowe złóż zagospodarowanych wynoszą w sumie 1 414,42 Tg, co stanowi 79,1% łącznych bilansowych zasobów geologicznych tych obiektów. Podstawową rezerwę zasobową dla dalszego rozwoju górnictwa węgla brunatnego stanowią udokumentowane bilansowe zasoby węgla brunatnego w 61 złożach niezagospodarowanych, które wynoszą 11 836,80 Tg. Zasoby te tylko w 21,1% są udokumentowane w wyższych kategoriach (A+B+C₁). Dalszą rezerwę stanowią zasoby prognostyczne kategorii D w złożach perspektywicznych, szacowane na około 23 578,60 Tg (zasoby prognostyczne o cechach bilansowych).

Złoża węgla brunatnego koncentrują się w zachodniej oraz centralnej części kraju i zostały (nieco arbitralnie) przypisane do ośmiu rejonów węglonośnych (Kasiński i in., 1991): zachodniego, północno-zachodniego, legnickiego, wielkopolskiego, konińskiego, łódzkiego, bełchatowskiego i radomskiego (por. fig. 1), zajmujących łącznie około 22% powierzchni kraju (tab. 1). Z istniejących w Polsce 166 udokumentowanych i perspektywicznych złóż węgla brunatnego we wspomnianych ośmiu rejonach znajduje się 163 złoża, a tylko 3 z nich (1,8% całej liczby złóż) znajdują się poza tym obszarem.

←

Fig. 1. Mapa występowania złóż węgla brunatnego w Polsce (wg Kasińskiego, 2009)

Rejony węglonośne: **A** – Zachodni, **B** – Północno-zachodni, **C** – Legnicki, **D** – Radomski, **E** – Koniński, **F** – Łódzki, **G** – Bełchatowski, **H** – Wielkopolski

Map of lignite deposits in Poland (after Kasiński, 2009)

Coal-bearing regions: **A** – Western, **B** – North-Western, **C** – Legnica, **D** – Radom, **E** – Konin, **F** – Łódź, **G** – Bełchatów, **H** – Wielkopolska

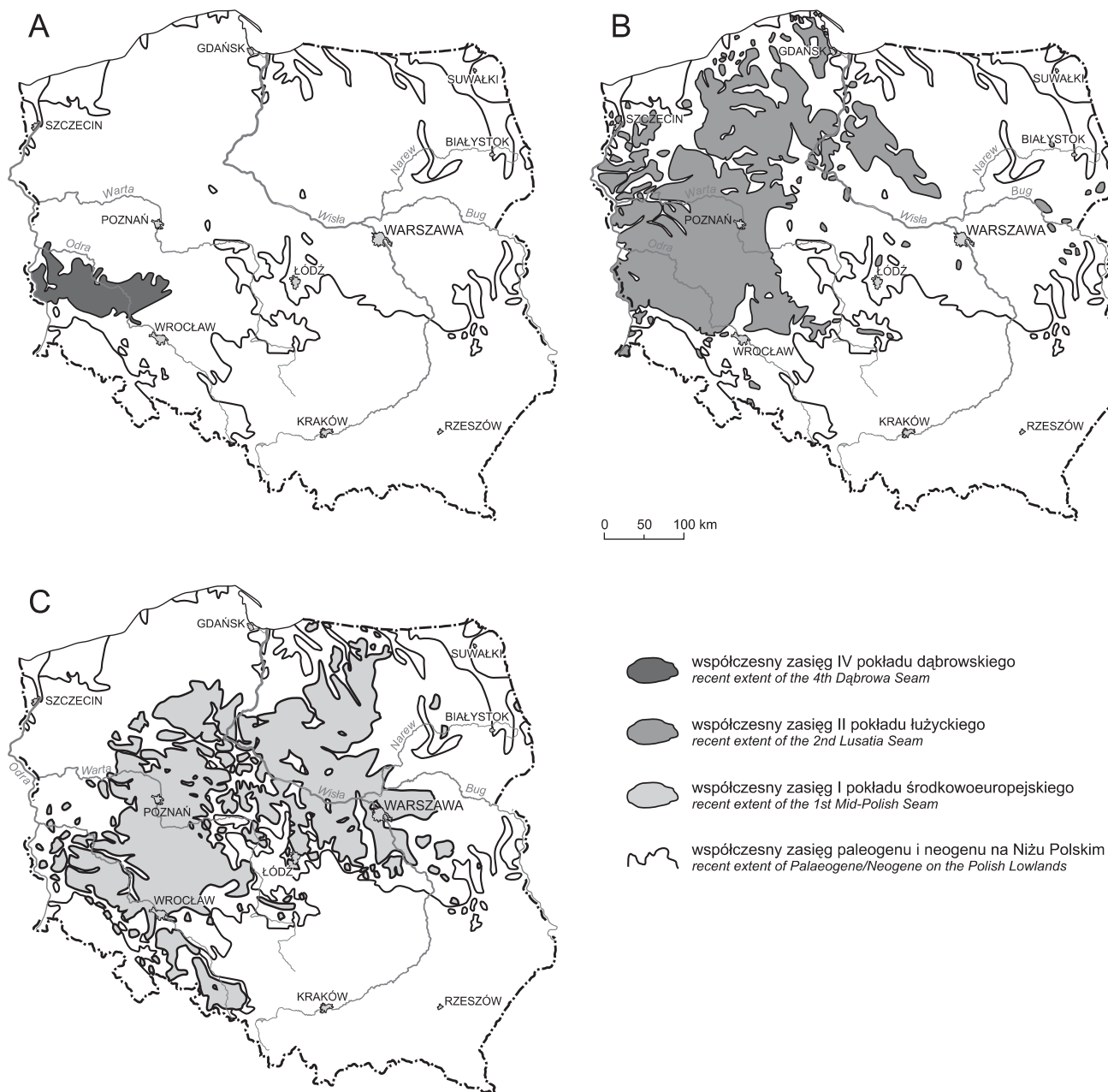


Fig. 2. Zasięg występowania głównych miocenijskich pokładów węgla brunatnego na Niżu Polskim

A – IV pokład dąbrowski (Piwocki, 1998), B – II pokład luzycki (Piwocki, 1992), C – I pokład środkowopolski (Piwocki, 1992)

Extent of the major Miocene lignite seams on the Polish Lowlands

A – 4th Dąbrowa Seam (Piwocki, 1998), B – 2nd Lusatia Seam (Piwocki, 1992), C – 1st Mid-Polish Seam (Piwocki, 1992)

WALORYZACJA ZŁOŻ WĘGLA BRUNATNEGO W ŚWIETLE WYMAGAŃ OCHRONY ZŁOŻ

Złoża węgla brunatnego, z nielicznymi wyjątkami, są obecnie eksploatowane w całym świecie metodą odkrywkową. Choć w chwili obecnej podjęto prace nad adaptacją niekonwencjonalnych metod eksploatacji złóż węgla brunat-

nego, głównie metodą podziemnego zgazowania, metody te na skalę przemysłową jeszcze nieprędko znajdą zastosowanie.

Ponieważ zgodnie z zapisami ustawy „Prawo geologiczne i górnictwo” oraz ustawy o zagospodarowaniu przestrzennym,

Tabela 1

**Zasoby węgla brunatnego w złożach o zasobach powyżej 1 Tg
w poszczególnych rejonach węglonośnych**

Lignite reserves in the deposits above 1 Tg in the coal-bearing regions

Rejon węglonośny	Kod rejonu na mapie	Złoża udokumentowane		Złoża perspektywiczne		Razem	
		liczba złóż	zasoby B+C ₁ +C ₂ [Tg]	liczba złóż	zasoby D ₁ +D ₂ [Tg]	liczba złóż	zasoby ogółem [Tg]
Zachodni	A	21	4 662,12	26	4 298,67	47	8 960,79
Północno-zachodni	B	1	610,18	7	805,82	8	1 416,00
Legnicki	C	7	5 082,34	2	10 987,47	9	16 069,81
Wielkopolski	H	4	3 699,96	22	7 796,87	26	11 498,83
Koniński	E	24	680,75	32	2 858,22	56	3 538,97
Łódzki	F	1	722,76	4	373,75	5	1 096,51
Bełchatowski	G	4	1 601,16	5	453,47	9	2 054,63
Radomski	D	3	92,64	–	–	3	92,64
RAZEM		65	17 201,91	98	27 874,27	163	45 075,18
Poza rejonami	–	2	1,82	1*	–	3	1,82
OGÓLEM		67	17 203,73	99	27 874,27	166	45 077,00

* złożo o zasobach teoretycznych

teren złoża powinien podlegać ochronie przed niewłaściwym wykorzystaniem i być dostępny do eksploatacji teraz bądź w następnych pokoleniach, ochrona złóż powinna polegać głównie na chronieniu powierzchni nad nimi przed zabudową, która mogłaby utrudnić lub uniemożliwić ich późniejsze wykorzystanie. Przeprowadzenie przez złożo autostrady, budowa nad nim osiedla mieszkaniowego czy zakładu przemysłowego może tak poważnie zwiększyć koszty jego przyszłej eksploatacji, że stanie się ona nieopłacalna (Kasztelewicz, Ptak, 2009). Właściwy cykl inwestycyjny powinny zatem poprzedzać następujące etapy:

- rozpoznanie złoża;
- ujęcie złoża w krajowym bilansie zasobów;
- wpisanie złoża do regionalnego i miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego.

Nie wszystkie złoża węgla brunatnego mają oczywiście jednakową wartość, dlatego bezwzględnie chronione powinny być tylko złoża najbardziej wartościowe, o znaczeniu stra-

tegicznym dla gospodarki kraju (Kasztelewicz, Ptak, 2009), a w przypadku złóż mniej wartościowych bardziej racjonalne ze społecznego punktu widzenia może być inne wykorzystanie przestrzeni nad złożem. Z tego powodu podstawowe zagadnienie stanowi właściwa waloryzacja złóż.

W celu przygotowania danych niezbędnych do podjęcia przemysłanych decyzji lokalizacyjnych, a także intensyfikacji koniecznej ochrony złóż węgla brunatnego w Państwowym Instytucie Geologicznym przeprowadzono kompleksowe prace mające na celu aktualizację zasobów złóż węgla brunatnego (Piwocki i in., 2004) i ich waloryzację pod kątem ekonomicznym, geośrodowiskowym i społecznej akceptacji potencjalnej inwestycji (Kasiński i in., 2006). W wyniku przeprowadzonych prac wytypowano złoża najkorzystniejsze pod kątem warunków potencjalnego zagospodarowania (tab. 2). Powierzchnia złóż zestawionych w tabeli powinna podlegać bezwzględnej ochronie dla umożliwienia ich późniejszego zagospodarowania.

CHARAKTERYSTYKA POTENCJALNYCH METOD EKSPLOATACJI/UTYLIZACJI ZŁÓŻ WĘGLA BRUNATNEGO

EKSPLOATACJA PODZIEMNA

Eksploatacja podziemna węgla brunatnego była prowadzona coraz powszechniej w całej Europie od początku XIX wieku, dziś ma jednak znaczenie jedynie historyczne. Do drugiej wojny światowej na ziemiach polskich działało kilkaset małych kopalń podziemnych (Jaros, 1985), głównie w części należącej wówczas do Niemiec. Węgiel brunatny eks-

ploatowano w tym okresie metodą podziemną również na Podkarpaciu, w rejonie Lwowa i na Podolu. Po wojnie przez kilkanaście lat metodą podziemną wydobywano węgiel brunatny w kopalniach: Henryk (Przyjaźń Narodów), Kaławsk, Lubań, Sieniawa i Zapomniana. Ze wszystkich tych zakładów górniczych czynna jest dziś jedynie kopalnia Sieniawa, która eksploatuje obecnie węgiel wyłącznie metodą odkrywkową. W odniesieniu do większych złóż węgla bru-

Tabela 2

**Złoże węgla brunatnego najkorzystniejsze do zagospodarowania
(według Kasińskiego i in., 2006)**

Lignite deposits most favourable for mining operation
(after Kasiński *et al.*, 2006)

Lp.	Nazwa złoża	Rejon	Powierzchnia [km ²]	Zasoby bilansowe [mln Mg]	Średnia miąższość węgla [m]	Nadkład: węgiel
1	Gubin	zachodni	73,00	1 050,8	20,0	5,3
2	Rogóźno	łódzki	18,79	772,8	35,6	6,5
3	Radomierzyce	zachodni	22,32	503,7	18,0	4,3
4	Gubin-Brody	zachodni	109,74	1 934,3	18,8	7,2
5	Legnica Zachód	legnicki	37,33	863,6	21,0	6,6
6	Złoczew	bełchatowski	8,75	485,6	46,2	4,5
7	Rzepin	zachodni	20,36	249,5	12,2	7,9
8	Nakło	północno-zachodni	11,70	254,1	19,5	6,6
10	Trzcianka	północno-zachodni	91,61	610,2	4,6	9,0
11	Legnica Wschód	legnicki	38,14	839,3	18,1	7,6
12	Piaski	koniński	22,57	103,6	6,1	7,3
13	Szamotoły	wielkopolski	32,00	829,4	21,6	7,2
14	Głowaczów	radomski	12,87	76,3	4,8	6,5

natnego eksploatacja podziemna była rozważana jedynie w kontekście kompleksu złóż legnickich (Kozłowski i in., 2008), jednak koszt węgla brunatnego pozyskiwanego w ten sposób znacznie przewyższa koszt surowca pochodzącego z eksploatacji odkrywkowej.

Podstawowe elementy kopalni podziemnej węgla brunatnego są takie same jak w kopalniach węgla kamiennego, a więc:

- nadszybia z infrastruktura techniczną,
- szyby eksploatacyjne i wentylacyjne,
- sieć chodników z infrastrukturą transportową i wentylacyjną,
- miejsca pozyskania urobku (przodek, ściana)
- ciąg technologiczny maszyn dla potrzeb eksploatacji złoża (np. kombajn ścianowy),
- place składowe węgla,
- zwałowiska skały płonnej.

Istnieją istotne zagrożenia środowiska naturalnego związane z podziemną eksploatacją węgla, a także ze strony energetyki opartej na spalaniu węgla brunatnego (wydobycie węgla i produkcję energii elektrycznej należy tu traktować łącznie), które należy uznać za wady omawianej metody eksploatacji (Barteczek i in., 1988; Nowosielski i in., 1991):

(1) przekształcenia hydrologiczne i hydrogeologiczne związane z odwadnianiem górotworu (obniżenie poziomu wód gruntowych, przesuszenie gleb, wpływ na wody powierzchniowe);

(2) deformacje geomechaniczne powierzchni terenu ponad kopalnią: deformacje ciągłe związane z procesami osiadania – głównie niecki dynamiczne postępujące wraz z rozwojem frontu robót górniczych oraz deformacje nieciągłe powierzchni terenu ponad kopalnią (szczeliny, progi, uskoki);

(3) wstrząsy związane z odprężeniem górotworu;

(4) zanieczyszczenie powietrza atmosferycznego w wyniku emisji pyłu przy składowaniu węgla i zwałowaniu skały płonnej oraz gazów powstających podczas pożarów na zwałowiskach skały płonnej (w której zawsze występuje domieszka węgla) w następstwie samozapłonu;

(5) zanieczyszczenie wód powierzchniowych (głównie w postaci zawiesiny);

(6) emisja hałasu przez pracujące urządzenia kopalni.

Nie można uniknąć (1) przekształceń hydrologicznych i hydrogeologicznych w górotworze, jednak ich uciążliwe skutki można zmniejszać przez stosowanie odpowiednich upraw oraz budowę wodociągów wiejskich, a po zakończeniu eksploatacji i zaprzestaniu odwadniania warunki hydrogeologiczne w górotworze ulegną odbudowie w samoistnym procesie. Deformacje geomechaniczne (2) i wstrząsy (3) mają w górnictwie podziemnym znaczną intensywność, w przypadku węgla brunatnego zwiększoną jeszcze przez niewielką grubość nadkładu. Natężenie takich deformacji można minimalizować stosując po przejściu frontu eksploatacyjnego podszadanie wyrobisk podsadzką piaskową lub uzyskaną na bazie odpadów poflotacyjnych, której składnikami mogą być także popioły i żużle pochodzące z zakładu energetycznego, jednak takie działanie podnosi bardzo znacznie (ponad dwukrotnie) koszty eksploatacji. Emisję pyłów i gazów w kopalni (4) ogranicza się, stosując w czasie suszy zraszanie placów składowych oraz okrywanie zwałowisk skały płonnej pokrywą materiałów odcinających dostęp powietrza (np. ropy). Emisję hałasu (ściśle ograniczaną normami) zmniejsza się przez budowę ekranów akustycznych.

Ponieważ obecnie żaden z zakładów energetycznych nie jest zaopatrywany w węgiel brunatny pochodzący z kopalni

podziemnych, zagadnienia wpływu na środowisko elektrowni spalających węgiel brunatny zostaną omówione w następnym rozdziale.

EKSPLOATACJA ODKRYWKOWA

Eksploatacja odkrywkowa jest dziś stosowana powszechnie w złożach węgla brunatnego, które ze względu na rachunek ekonomiczny są dokumentowane do względnie niewielkiej głębokości (w Polsce, według obowiązujących kryteriów bilansowości, spąg złoża powinien być położony nie głębiej niż 350 m p.p.t.). W chwili obecnej wszystkie złoża węgla brunatnego miękkiego, zarówno w Polsce, jak i w całej Europie, a także w olbrzymiej większości krajów pozaeuropejskich (w tym w Australii czy Stanach Zjednoczonych) są eksploatowane wyłącznie tą metodą. Dotychczasowe doświadczenia ze stosowania metody odkrywkowej wskazują, że jest ona nie tylko ekonomicznie uzasadniona, ale również bezpieczna i stosunkowo łatwa w stosowaniu (Kozłowski i in., 2008).

Podstawowymi elementami kopalni odkrywkowej węgla brunatnego są:

- wkop udostępniający, rozwijający się w miarę upływu czasu w wyrobisko eksploatacyjne (odkrywkę);
- zwałowisko zewnętrzne nadkładu, które w toku lub po zakończeniu eksploatacji powinno zostać ponownie umieszczone w wyrobisku poeksploatacyjnym jako jego częściowe wypełnienie;
- zwałowisko wewnętrzne nadkładu, stanowiące wypełnienie wyrobiska postępujące w miarę rozwoju eksploatacji;
- place składowe węgla;
- system odwodnienia powierzchniowego;
- system odwodnienia podziemnego (studnie odwadniające);
- układ KTZ – koparka–taśmociąg–zwałowarka – ciąg technologiczny maszyn dla potrzeb eksploatacji złoża;
- wyrobisko końcowe.

Zagrożenia środowiska naturalnego w wyniku eksploatacji odkrywkowej, a także ze strony energetyki opartej na spalaniu węgla brunatnego, są rzeczywiście poważne. Coraz powszechniejsze stosowanie nowoczesnych technologii przy istniejących surowych normach emisji zanieczyszczeń powoduje jednak, że uciążliwość tego przemysłu dla środowiska znacznie zmalała, a przy jej prowadzeniu jest możliwe zachowanie wszystkich elementów zrównoważonego rozwoju (środowiskowego, ekonomicznego i społecznego).

Na potencjalne obciążenie środowiska wywołane eksploatacją odkrywkową składają się następujące elementy (Piwocki, Kasiński, 1994), które należy uznać za wady omawianej metody eksploatacji:

- (1) całkowite przekształcenie powierzchni terenu w obrębie konturu budowanej odkrywki,
- (2) przekształcenia hydrologiczne i hydrogeologiczne związane z odwadnianiem odkrywki (obniżenie poziomu

wód gruntowych, przesuszenie gleb, wpływ na wody powierzchniowe),

(3) deformacje geomechaniczne na przedpolu, zboczach odkrywki i zwałowiska zewnętrznego (osiadanie i powstawanie osuwisk),

(4) wstrząsy związane z odprężeniem górotworu,

(5) zanieczyszczenie powietrza atmosferycznego w wyniku emisji pyłu podczas eksploatacji i zwałowania nadkładu oraz gazów powstających podczas pożarów węgla w odkrywce w następstwie jego samozapłonu,

(6) zanieczyszczenie wód powierzchniowych (głównie w postaci zawiesiny) i

(7) emisja hałasu przez pracujące urządzenia kopalni.

Do wymienionych zagrożeń należy dodać zagrożenia ze strony zakładu energetycznego:

(8) zanieczyszczenie powietrza atmosferycznego w wyniku emisji pyłu i gazów generowanych przy spalaniu węgla,

(9) zanieczyszczenie termiczne wód powierzchniowych (rzek i jezior),

(10) zanieczyszczenie chemiczne wód podziemnych w wyniku ługowania składowisk popiołów,

(11) emisja do atmosfery znacznych ilości CO₂.

Stosowane coraz powszechniej nowoczesne technologie zapewniają istotne zmniejszenie zagrożeń na niemal wszystkich wymienionych polach. Nie jest możliwe uniknięcie (1) całkowitego przekształcenia powierzchni terenu w granicach odkrywki, jednak prawidłowo prowadzona rekultywacja pozwala na uzyskanie pełnowartościowych terenów rolniczych, leśnych lub zbiorników wodnych, które po okresie 20–30 lat są zwracane gospodarce narodowej. Często zdarza się, że kopalnia oddaje gminie tereny rolnicze o znacznie wyższej klasie bonitacyjnej niż tereny, które kiedyś zajmowała; taka sytuacja ma na przykład miejsce w kopani Konin. Tereny pogórnice stają się także atrakcyjnym miejscem wypoczynku świątecznego, szczególnie w obszarach pozbawionych elementów naturalnych, jak to ma miejsce w rejonie Kolonii w Niemczech. Nie można także uniknąć (2) przekształceń hydrologicznych i hydrogeologicznych, jednak ich uciążliwe skutki można zmniejszać przez stosowanie odpowiednich upraw oraz budowę wodociągów wiejskich, a prawidłowa rekultywacja powoduje z czasem przywrócenie prawidłowych stosunków wodnych w górotworze. Deformacje geomechaniczne (4) i wstrząsy (5) mają na ogół mniejszą intensywność niż w górnictwie podziemnym, a prawidłowo zaprojektowane zbocza wyrobisk i zwałowisk (powszechnie stosowanie zwałowania wewnętrznego) powinny zminimalizować ich natężenie. Emisję pyłu w kopalni (6), która z natury nie jest zbyt wielka, ogranicza się, stosując w czasie suszy zraszanie, a emisję hałasu (ściśle ograniczaną normami) przez budowę ekranów akustycznych. Największe zmiany na korzyść środowiska zaszły jednak w technologii spalania węgla. Nowoczesne bloki spalające węgiel na złożu fluidalnym w praktyce nie powodują (8) zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego (węgiel i produkty jego spalania cyrkulują w obiegu zamkniętym aż do całkowitego rozpadu), a do atmosfery emitowany

jest jedynie CO₂ i para wodna. Należy zwrócić uwagę, że tzw. rea-gipsy, będące produktem odsiarczania spalin w Elektrowni Bełchatów, są w znacznych ilościach (około 600 Tg rocznie) stosowane do wyrobu płyt gipsowo-kartonowych – dodatkowym walorem jest w tym przypadku ochrona złóż naturalnego gipsu. Zanieczyszczenie termiczne wód powierzchniowych (9) zachodziło jedynie w przypadku stosowania otwartego obiegu chłodniczego, jak to ma miejsce jeszcze dziś w elektrowniach Konin i Pątnów; w nowobudowanych elektrowniach zagrożenie to jest eliminowane przez stosowanie wyłącznie obiegu zamkniętego (chłodnie kominowe). Problem przesączania zanieczyszczeń ze składowisk popiołów (10) jest eliminowany na drodze budowy ekranów uszczelniających z materiałów o własnościach jonowymiennych (iły beidellitowo-smektytowe) oraz coraz powszechniejszą petryfikację masy odpadów paleniskowych. W chwili obecnej najtrudniejszym do rozwiązania problemem jawi się (11) emisja znacznych ilości CO₂. Działania podejmowane w kierunku jego rozwiązania to stosowanie nowoczesnych niskoemisyjnych technologii spalania węgla (np. spalanie w czystym tlenie), a przede wszystkim – sekwestracja CO₂ w głębokich strukturach geologicznych. Nie ulega jednak wątpliwości, że w świetle obecnej polityki Unii Europejskiej wymóg bezemisyjnego spalania znacznie podniesie koszty produkcji energii z węgla brunatnego, podobnie zresztą jak tej produkowanej z innych paliw kopalnych (z wyjątkiem energetyki nuklearnej).

EKSPLOATACJA METODĄ HYDROOTWOROWĄ

Metoda eksploatacji hydrorootworowej polega na wierceniu z powierzchni terenu otworów wielkośrednicowych (Ø 550–600 mm) do spągu złoża. Otwory te są zarurowane w warstwie nadkładowej i spągowej. Do otworu zapuszcza się urządzenie wydobywcze, składające się z kolumny rur dostarczających media i odbierającej urobek oraz obrotowej głowicy hydraulicznej. Z głowicy wypływa woda pod wysokim ciśnieniem, która stanowi czynnik urabiający pokład węgla. Eksploatacja jest prowadzona od spągu ku stropowi złoża, a w jej toku jest formowana cylindryczna komora o promieniu do 12,5 m, w dolnej części której osadza się urobiony węgiel. Transmisja mediów urabiających (woda pod ciśnieniem, sprężone powietrze) odbywa się w otworze wiertniczym w kolumnie współśrodkowych rur.

Do najważniejszych zalet eksploatacji hydrorootworowej należą:

- brak konieczności całkowitego przekształcenia powierzchni złoża i związanych z tym skutków technologicznych (np. przekładanie odcinków rzek) i społecznych (np. konieczność przesiedlenia mieszkańców);
 - niewielki – w porównaniu z konwencjonalnymi metodami eksploatacji – koszt udostępnienia złoża;
 - teoretycznie niewielki zakres deformacji powierzchni ziemi w wyniku osiadań związanych z ubytkiem objętości złoża (w przypadku zastosowania podsadzania
- wyrobisk w celu przeciwdziałania wielkoskalowym deformacjom powierzchni terenu);
- Metoda eksploatacji hydrorootworowej węgla brunatnego, która nie była dotychczas stosowana w Polsce, ma jednak również istotne wady:
- nie rozwiązano do końca problemu utrzymania stropu komór eksploatacyjnych podczas urabiania węgla, co jest warunkiem późniejszego podsadzania komór eksploatacyjnych. Wydaje się, że najskuteczniejszą metodą utrzymania stropu jest stosowanie stałego podporowego ciśnienia mieszaniny powietrza i wody (Kozłowski i in., 2008), w chwili obecnej brak jednak na to przekonujących dowodów;
 - urabianie węgla metodą hydrorootworową prowadzi do uzyskania urobku w postaci szlamu o bardzo wysokiej zawartości wody; woda ta musi zostać usunięta w kilkufazowym procesie na składowiskach ociekowych lub/i zestawach sit odsączających; składowiska ociekowe jako metoda aktywna wymagają uwzględnienia czynników: przestrzeni (spowodują one przekształcenie powierzchni terenu na dość znacznych obszarach) i czasu (szczególnie w okresach opadów atmosferycznych); sita odsączające (ewentualnie hydrocyklony) wymagają natomiast dodatkowych nakładów na eksploatację;
 - ponieważ węgiel brunatny jest substancją silnie higroskopijną, następuje dodatkowe związanie wody w przestrzeniach kapilarnych, a co za tym idzie wilgotność węgla brunatnego może wzrosnąć od poziomu średniej wilgotności naturalnej 45–50% nawet do wartości 65–70%; woda kapilarna nie jest usuwalna w procesie suszenia na powietrzu i w przypadku spalania węgla surowego jej obecność spowoduje zmniejszenie wartości opałowej węgla, a co za tym idzie zwiększy pośrednio emisję CO₂ liczoną na jednostkę wyprodukowanej w procesie spalania energii; w przypadku stosowania węgla suszonego termicznie proces suszenia będzie generować dodatkowe koszty;
 - wysoki koszt podsadzania wielkogabarytowych wyrobisk, który jest oceniany jako 2,5-krotnie przekraczający koszt wydobywania węgla, i to tylko w przypadku łatwej (bezkosztowej) dostępności materiału podsadzkowego (Kozłowski i in., 2008).

Zastosowanie metody eksploatacji hydrorootworowej było rozważane w kontekście kompleksu złóż legnickich oraz złoża Kamieńsk, satelickiego w stosunku do złoża bełchatowskiego (Dunikowski i in., 1989; Kudelko, Nowak, 2007). W tym pierwszym przypadku byłoby ono o tyle tańsze, że zakład górniczy dysponowałby na miejscu niewyczerpanym źródłem materiału podsadzkowego w postaci odpadów flotacyjnych KGHM Polska Miedź. Z drugiej strony trzeba wziąć pod uwagę, że odpady te mogą być agresywne i powodować zanieczyszczenie wód podziemnych. Istniejące problemy, które wiążą się z zastosowaniem omawianej metody, z pewnością wymagają jeszcze prac studialnych prowadzonych w niewielkiej instalacji pilotowej.

ZGAZOWANIE TERMICZNE WĘGLA W ZŁOŻU

Zgazowanie termiczne węgla w złożu (UCG – *underground coal gasification*) polega na częściowym spalaniu węgla brunatnego w złożu przy pomocy tlenu w obecności pary wodnej. Złoże może być eksploatowane metodą opływową, przy której zostaje ono udostępnione systemem wyrobisk górniczych (chodników) drażonych w pokładzie węgla, lub metodą otworową. W tym ostatnim przypadku złoże udostępnia się systemem otworów wiertniczych, z których jeden lub kilka służy zapaleniu złoża, a pozostałe są wykorzystywane do odbioru wytworzonych produktów spalania (fig. 3). Pokład węgla powinien być zapalony w części przyspągowej, tak aby proces spalania mógł rozprzestrzeniać się w sposób naturalny ku górze.

W wyniku spalania węgla przy niedostatecznym dostępie powietrza w warunkach wysokiego ciśnienia panującego w sposób naturalny w górotworze w obecności pary wodnej powstaje gaz syntezowy, stanowiący mieszaninę CO, CO₂ i CH₄. Procentowa zawartość poszczególnych składników (a więc i wartość opałowa gazu) jest uzależniona od proporcji dostarczanych mediów i zastosowanej technologii spalania. Uzyskany gaz może być wykorzystywany bezpośrednio lub być przeznaczony do produkcji energii elektrycznej.

Podstawowe zalety metody zgazowania termicznego to:

- brak konieczności całkowitego przekształcenie powierzchni złoża i związanych z tym skutków technologicznych (np. przekładanie odcinków rzek) i społecznych (np. konieczność przesiedlenia mieszkańców);
- niewielki – w porównaniu z konwencjonalnymi metodami eksploatacji – koszt udostępnienia złoża;
- uzyskiwanie produktów nadających się do bezpośredniego wykorzystania jako substytut gazu ziemnego lub do produkcji energii elektrycznej w warunkach niższej niż w przypadku węgla emisji CO₂.

Prezentowana tu metoda, która jest dotychczas stosowana w świecie głównie do przeróbki węgla kamiennego, w odniesieniu do węgla brunatnego nie jest jednak pozbawiona poważnych wad:

- złoża węgla brunatnego są przeważnie silnie zawodnione i często pozostają w kontakcie hydraulicznym z poziomami wodonośnymi nadkładu lub podłoża. Dodatkowy niekontrolowany dopływ wody do złoża musi zakłócić proporcje dostarczanych mediów, a w przypadku znaczniejszych wartości wręcz uniemożliwić spalanie. Z tego powodu w większości przypadków należałoby zastosować – podobnie jak przy konwencjonalnych metodach eksploatacji – górnicze odwodnienie

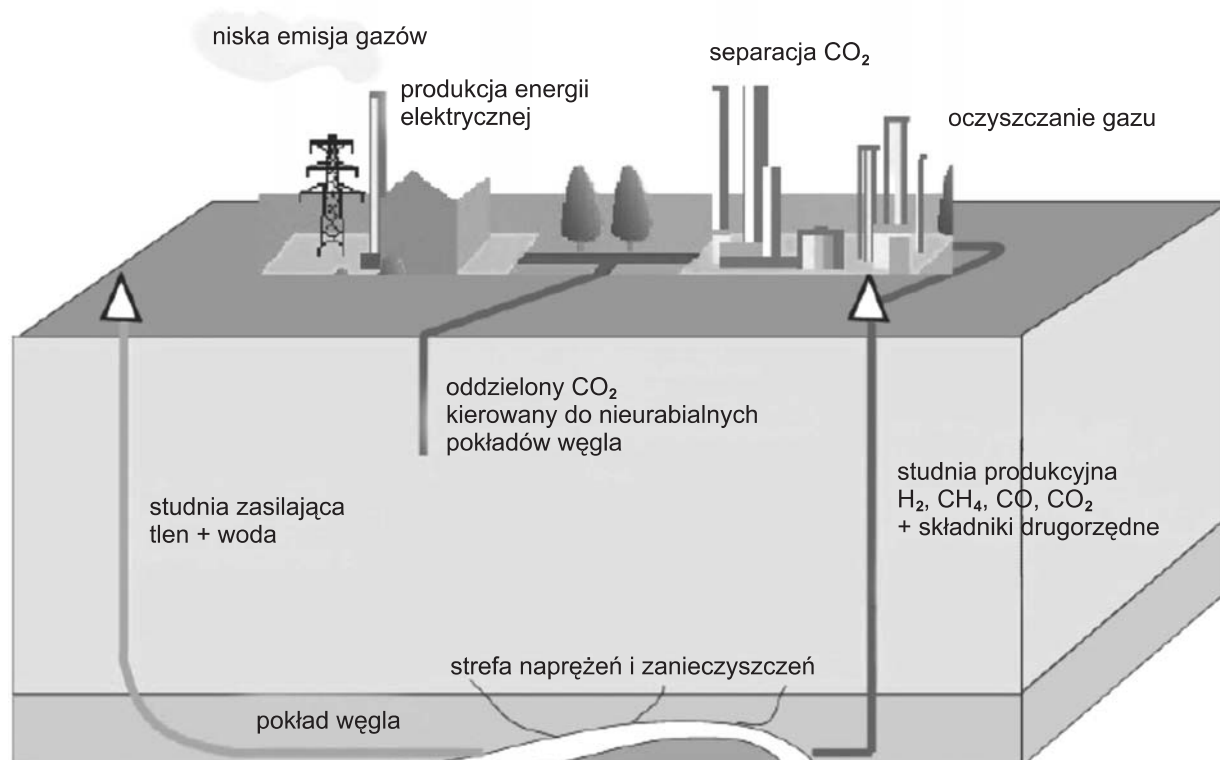


Fig. 3. Schemat procesu podziemnego zgazowania węgla (wg Kozłowski i in., 2008)

Scheme of underground coal gasification (UCG) process (after Kozłowski *et al.*, 2008)

złoża wraz z płynącymi stąd konsekwencjami dla warunków geologicznych w górotworze i środowiska naturalnego otoczenia złoża;

- znane złoża węgla brunatnego są przeważnie położone płytko. To, co było zaletą w przypadku konwencjonalnych metod eksploatacji górniczej (w szczególności eksploatacji odkrywkowej), staje się tutaj wadą, ponieważ niewielki nadkład nie zapewnia wystarczającej ochrony powierzchni przed wzrostem strumienia cieplnego i zjawiskami intensywnego osiadania spowodowanymi znacznymi ubytkami objętości substancji złoża podczas spalania; z tego powodu preferuje się grubość nadkładu powyżej 150 m. Niezbyt korzystne jest również zgazowanie grubych pokładów węgla ze względu na nadmierny kumulatywny wzrost emisji ciepła ku powierzchni;
- skuteczne i bezpieczne sterowanie procesem podziemnego zgazowania wymaga szczegółowej znajomości budowy geologicznej złoża;
- zasoby złoża nie są w pełni wykorzystywane; w referencyjnej instalacji zgazowania węgla brunatnego twardego (subbitumicznego) w Angren w Uzbekistanie współczynnik wykorzystania złoża sięga 82%, jednak w przypadku występującego w Polsce węgla brunatnego miękkiego będzie on z pewnością znacznie niższy.

Istniejące instalacje podziemnego zgazowania węgla brunatnego (twardego) wykorzystują najczęściej złoża o niewielkiej wprawdzie miąższości nadkładu, ale z reguły dobrze izolowane od powierzchni. Taki warunek spełnia tylko niewielka część bazy zasobowej (udokumentowanych złóż) węgla brunatnego, ponieważ w świetle dotychczas obowiązujących kryteriów bilansowości dokumentowane były tylko złoża o wartości współczynnika N:W poniżej 12 i tylko do głębokości 350 m p.p.t.

Z powyższych rozważań wynikają następujące konkluzje:

- zgazowanie termiczne względnie płytko położonych złóż węgla brunatnego powinno być przetestowane w warunkach instalacji pilotowych w celu obiektywnego ustalenia wpływu zastosowanej technologii na powierzchnię Ziemi;
- należy w miarę możliwości przystąpić do dokumentowania głębiej położonych złóż węgla brunatnego, choć jest to oczywiście proces kosztotwórczy;
- należy rozważyć ekonomiczną zasadność podziemnego zgazowania cienkich pokładów węgla brunatnego, udokumentowanych na przykład w nadkładzie istniejących złóż.

Zgazowanie termiczne może być jednak prawdopodobnie zastosowane dla utylizacji cienkich pokładów węgla, o miąższości poniżej 3 m, które nie spełniają obecnie obowiązujących kryteriów bilansowości, a których niewielka miąższość zredukowałaby nadmierny wpływ emisji ciepła. Nawet jednak gdyby częściowo odstąpić od ograniczeń dotyczących krytycznej miąższości nadkładu, tylko niewiele udokumentowanych złóż węgla brunatnego spełnia warunek $N:W \geq 10$, ponieważ wspomniane kryteria bilansowości nie

przewidywały dotąd dokumentowania złóż węgla brunatnego o $N:W > 12$.

BIOTECHNOLOGICZNA KONWERSJA W INNE NOŚNIKI ENERGII

Biotechnologiczna konwersja (BUCC – *bacterial underground coal conversion*) w inne nośniki energii bezpośrednio w złożu (*in situ*) polega na rozkładzie mikrobiologicznym związków organicznych występujących w węglu. Wyselekcjonowane szczepy bakterii z gatunków *Clostridium sporogens*, *Clostridium hystolyticum* i *Disulfovibrio hydrocarbonacleticus* oraz grzyby są w stanie rozkładać węglowodory o długich łańcuchach i złożone związki organiczne zawarte w prasmolach, woskach i bituminach węgla brunatnego na proste węglowodory nasycone: CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , występujące w naturze w stanie gazowym. Mieszanina tych związków wraz z CO_2 , stanowiącym produkt metabolizmu drobnoustrojów, stanowi ostateczny produkt procesu biokonwersji.

Podstawowe zalety metody konwersji biotechnologicznej są podobne jak zalety zgazowania termicznego:

- brak konieczności całkowitego przekształcenie powierzchni złoża i związanych z tym skutków technologicznych (np. przekładanie odcinków rzek) i społecznych (np. konieczność przesiedlenia mieszkańców);
- niewielki – w porównaniu z konwencjonalnymi metodami eksploatacji – koszt udostępnienia złoża;
- uzyskiwanie produktów nadających się do bezpośredniego wykorzystania jako substytut gazu ziemnego lub do produkcji energii elektrycznej w warunkach niższej niż w przypadku węgla emisji CO_2 ;
- brak konieczności odwadniania złoża – metoda może być stosowana w złożach zawodnionych;
- możliwość wykorzystywania węgla silnie zasiarczonego: obecność siarki jest warunkiem koniecznym dla aktywności procesów mikrobiologicznych;

Głównymi wadami prezentowanej metody są:

- określone szczepy mikroorganizmów rozwijają się w dość wąskim, ściśle określonym przedziale parametrów fizykochemicznych środowiska i są szczególnie wrażliwe na zmiany potencjału oksydacyjno-redukcyjnego (Eh), kwasowości ośrodka (pH), zasolenia i temperatury. Warunki takie mogą być kontrolowane bez trudności w zamkniętej instalacji naziemnej, są jednak trudne do utrzymania w złożu, szczególnie posiadającym liczne kontakty hydrauliczne z sąsiednimi litosomami;
- nie ma możliwości utrzymania stałego składu procentowego produktów konwersji biotechnologicznej, co rodzi określone trudności w ich dalszym wykorzystaniu;
- konieczny jest stały odbiór produktów reakcji mikrobiologicznych, ponieważ ich nadmierne stężenie powoduje zahamowanie procesu biokonwersji;
- zasoby złoża są wykorzystywane tylko w niewielkim stopniu; szacuje się, że stopień wykorzystania złoża nie

przekracza 30–50%, a niska sprawność procesu nie rokuje szybkiego i powszechnego zastosowania tej metody. Nowe rozwiązania technologiczne w instalacjach do bio-konwersji powinny być ukierunkowane głównie na zapew-

nienie stałych parametrów fizykochemicznych środowiska, co dotychczas nie zostało rozwiązane w zadowalający sposób. I w tym przypadku zasadne jest przeprowadzenie prób w instalacjach pilotowych

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Węgiel brunatny jest w chwili obecnej jedynym występującym lokalnie surowcem energetycznym, który w długofalowej perspektywie może zapewnić polskiej gospodarce samowystarczalność i zagwarantować naszemu krajowi bezpieczeństwo energetyczne. Energia produkowana z węgla brunatnego jest najtańsza i chociaż jej ceny znacznie wzrosną po wdrożeniu przez Polskę technologii spalania bezemisyjnego, nadal zapewne taką pozostanie w dającej się przewidzieć przyszłości, ponieważ koszt produkcji energii uzyskiwanej w wyniku spalania pozostałych paliw kopalnych (a także biomasy) również wzrośnie proporcjonalnie.

Według obecnego stanu wiedzy eksploatacja odkrywki węgla brunatnego, jako surowca dla elektrowni termicznych, pozostaje metodą zdecydowanie najbardziej ekonomiczną i – paradoksalnie – także najbezpieczniejszą. Należy stanowczo stwierdzić, że wszystkie niekonwencjonalne metody eksploatacji niosą poważne zagrożenia dla środowiska

naturalnego, wywierając istotny wpływ tak na powierzchnię ziemi, jak i na wody podziemne. Negatywne skutki odkrywki eksploatacji węgla i jego spalania w elektrowniach mogą być w znacznym stopniu ograniczane przy zastosowaniu nowoczesnych procedur i technologii, a obszary poeksploatacyjne, po prawidłowo przeprowadzonej rekultywacji, są przywracane środowisku w stanie nie gorszym (a często lepszym) niż w chwili zajmowania pod eksploatację. Niekonwencjonalne technologie utylizacji węgla brunatnego, wśród których najbardziej perspektywiczna wydaje się technologia podziemnego zgazowania, mimo wszystko będą jednak z pewnością znajdować w przyszłości coraz szersze zastosowanie. W chwili obecnej ich wykorzystanie niesie jednak ze sobą wiele niewiadomych, co jednoznacznie wskazuje na potrzebę prowadzenia dalszych badań w skali technicznej, w instalacjach pilotowych zbudowanych na właściwie wybranych obiektach.

LITERATURA

- BARTECZEK A., KOZŁOWSKI S., KUCIĘBA K., NOWOSIELSKI S., 1988 — Ocena wpływu eksploatacji złóż węgla kamiennego na środowisko. Mat. CPBP 04.10:3. Wyd. SGGW-AR. Warszawa.
- BIELIKOWSKI K., CZAPLA Z., LIBICKI J., PETRYSZCZEW W., SZWARNOWSKI A., WŁODARCZYK B., WOJCIECHOWSKI C. (red.), 1999 — Polish lignite. Conf. of Polish Lignite Industry, Turek.
- CIUK E., PIWOCKI M., 1990 — Map of brown-coal deposits and prospect areas in Poland, 1:500 000. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- DUNIKOWSKI A., KLICH J., UBERMAN R., 1989 — Niekonwencjonalne technologie eksploatacji złóż w górnictwie odkrywkowym. *Gór. Odkryw.*, **31**, 4.
- JAROS J., 1985 — Słownik historyczny kopalń węgla na ziemiach polskich. Śląski Inst. Naukowy, Katowice.
- KASIŃSKI J.R., 2009 — Potencjał zasobowy węgla brunatnego w Polsce ze szczególnym uwzględnieniem kompleksów złóż gubińskich i legnickich. Państw. Inst. Geol., Warszawa. http://geoportal.pgi.gov.pl/css/powiaty/publikacje/wegiel_brunatny/Kasinski_potencjal_węgla_brunatnego.pdf
- KASIŃSKI J.R., MAZUREK S., PIWOCKI M., 2006 — Waloryzacja i ranking złóż węgla brunatnego w Polsce. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, **187**.
- KASIŃSKI J.R., PIWOCKI M., PORZYCKI J., ZDANOWSKI A., 1991 — Węgiel kamienny i węgiel brunatny *W*: Atlas zasobów surowców i odpadów mineralnych oraz zagrożeń środowiska w układzie gminnym 1:750 000, z. 2. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- KASZTELEWICZ Z., 2008 — Uwarunkowania wydobywania węgla brunatnego i produkcji energii elektrycznej w Polsce i Europie. Akad. Gór.-Hutn. http://www.pgi.gov.pl/images/stories/artykuly/wegiel_brunatny/tekst_kasztel-mini/pdf
- KASZTELEWICZ Z., PTAK M., 2009 — Wybrane problemy zabezpieczenia złóż węgla brunatnego w Polsce dla odkrywki działalności górniczej. *Węg. Brunat.*, **18**, 4: 14–19.
- KASZTELEWICZ Z., TAJDUŚ A., 2009 — Dziesięć atutów branży węgla brunatnego w Polsce, czyli węgiel brunatny optymalnym paliwem dla polskiej energetyki w I połowie XXI wieku. *Węg. Brunat.*, **18**, 4: 5–10.
- KOZŁOWSKI Z., NOWAK J., KASIŃSKI J.R., KUDEŁKO J., SOBOCIŃSKI M., UBERMAN R., 2008 — Techniczno-ekonomiczny ranking zagospodarowania złóż węgla brunatnego w aspekcie założeń polityki energetycznej Polski. Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- KUDEŁKO J., NOWAK J., 2007 — Geosozjologiczne uwarunkowania dla strategii i wyboru technologii zagospodarowania złóż węgla brunatnego regionu legnickiego. *Cuprum*, **1**: 67–86.
- NOWOSIELSKI S., BARTECZEK A., CZAPSKA-NOWOSIELSKA M., KUCIĘBA K., 1991 — Metodyka i przykłady sporządzania ocen oddziaływania eksploatacji złóż węgla

- kamiennego na środowisko. Mat. CPBP 04.10:47. Wyd. SGGW-AR, Warszawa.
- PIWOCKI M., 1992 — Zasięg i korelacja głównych grup trzeciorzędowych pokładów węgla brunatnego na platformowym obszarze Polski. *Prz. Geol.*, **40**, 5: 281–286.
- PIWOCKI M., 1998 — Charakterystyka dolnomioceńskiej IV grupy pokładów węgla brunatnego w Polsce. *Prz. Geol.*, **46**, 1: 55–61.
- PIWOCKI M., KASIŃSKI J.R., 1994 — Mapa waloryzacji ekonomiczno-środowiskowej złóż węgla brunatnego w Polsce, skala 1:750 000. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- PIWOCKI M., KASIŃSKI J.R., SATERNUS A., DYLAĞ J.K., GIENKA M., WALENTEK I., 2004 — Aktualizacja bazy zasobów złóż węgla brunatnego w Polsce. Państw. Inst. Geol. Centr. Arch. Geol. Państw. Inst. Geol., Warszawa.