

PRZYDATNOŚĆ WĘGLA BRUNATNEGO W POLSCE DLA PROCESU ZGAZOWANIA PODZIEMNEGO (UGC) – PROBLEM KRYTERIÓW BILANSOWOŚCI

USEFULNESS OF LIGNITE IN POLAND FOR THE UNDERGROUND COAL GASIFICATION (UCG) – THE PROBLEM OF CRITERIA OF ECONOMIC VIABILITY

JACEK R. KASIŃSKI¹, KAZIMIERZ MATL², ANDRZEJ STACHOWIAK³

Abstrakt. Spośród niekonwencjonalnych „czystych” technologii wykorzystania węgla brunatnego najbardziej zaawansowane wydaje się być podziemne zgazowanie węgla w złożu (UGC – *underground coal gasification*). Otrzymany gaz syntezowy stanowi substytut gazu ziemnego i może być użytkowany bezpośrednio lub do produkcji energii elektrycznej, przy czym emisja CO₂ jest znacznie niższa niż w przypadku „klasycznego” spalania węgla. W wielu krajach działały lub działają obecnie instalacje eksperymentalne, a w kilku (Chiny, Indie, Uzbekistan) także niewielkie bloki energetyki zawodowej. Zaletą technologii UGC jest przede wszystkim mniejsza ingerencja przekształcająca powierzchnię ziemi oraz niski koszt pozyskania produktu, wadą natomiast – możliwość szkodliwych oddziaływań na wody podziemne i powierzchnię ziemi.

Dla technologii UGC mogą być przydatne, obok złóż udokumentowanych dla potrzeb eksploatacji odkrywkowej, także cienkie pokłady węgla brunatnego oraz pokłady położone poniżej dotychczasowej granicy dokumentowania 350 m p.p.t. Na obecnym etapie badań problem stanowi jednak brak choćby ramowych kryteriów bilansowości węgla dla potrzeb UGC, co uniemożliwia porównywanie między sobą obiektów złożowych z punktu widzenia tej metody eksploatacji. Nie do końca są także wyjaśnione elementy procesu, w szczególności w obszarze oddziaływania na środowisko, co wskazuje na potrzebę prowadzenia dalszych badań w skali technicznej w instalacjach pilotowych.

Słowa kluczowe: węgiel brunatny, zgazowanie podziemne, wpływ na środowisko, kryteria bilansowości.

Abstract. Among unconventional clean coal utilization technology, the underground coal gasification within the deposit (UCG) appears to be the most advanced. The produced synthesis gas is a substitute for natural gas and it can be used directly or to produce electricity, while CO₂ emission is much lower than during the “classic” coal combustion. Experimental installations, operated or currently work in many countries. In several countries (China, India, Uzbekistan) small blocks of power plants also operate. The advantage of UCG technology is primarily the less transforming effect on soils and the low cost of the product. The disadvantage is the possibility of harmful impact on groundwater and soil. In addition to deposits documented for the opencast lignite mining, UGC technology could be useful for thin beds and seams situated below a depth of 350 m under the ground surface, which limited the depth of recent prospecting. At the present stage of research, the lack of mining and ecological criteria for the UGC makes it impossible to compare between the deposit from the viewpoint of this exploitation technology. The elements of the process are also not fully resolved, particularly in the area of environmental impact, indicating a need for further research in technical scale in pilot installations.

Key words: lignite, underground gasification, environmental impact, evaluation criteria.

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

² Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

³ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Oddział Dolnośląski, Jaworowa 19, 53-122 Wrocław

WSTĘP – PROCES ZGAZOWANIA TERMICZNEGO

Zgazowanie termiczne węgla w złożu (*UCG – underground coal gasification*) polega na częściowym spalaniu węgla brunatnego w złożu przy pomocy tlenu lub innego czynnika zgazowującego w obecności pary wodnej. Złoże może być eksploatowane metodą opływową, przy której zostaje ono udostępnione systemem wyrobisk górniczych (chodników) drążonych 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 zatłaczania mediów zgazowujących oraz odbioru wytworzonych produktów zgazowania węgla (fig. 1). Pokład węgla powinien być zapalony w części przyspagowej, tak aby proces spalania mógł rozprzestrzenić 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 zastosowanego sposobu prowadzenia zgazowania. Uzyskany gaz może być wykorzystywany bezpośrednio jako substytut gazu ziemnego (Steinberg, 2005) i w tej roli jako surowiec dla wytwarzania innych produktów w przemyśle chemicznym, 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 konwencjonalnego spalania węgla, emisji CO₂.

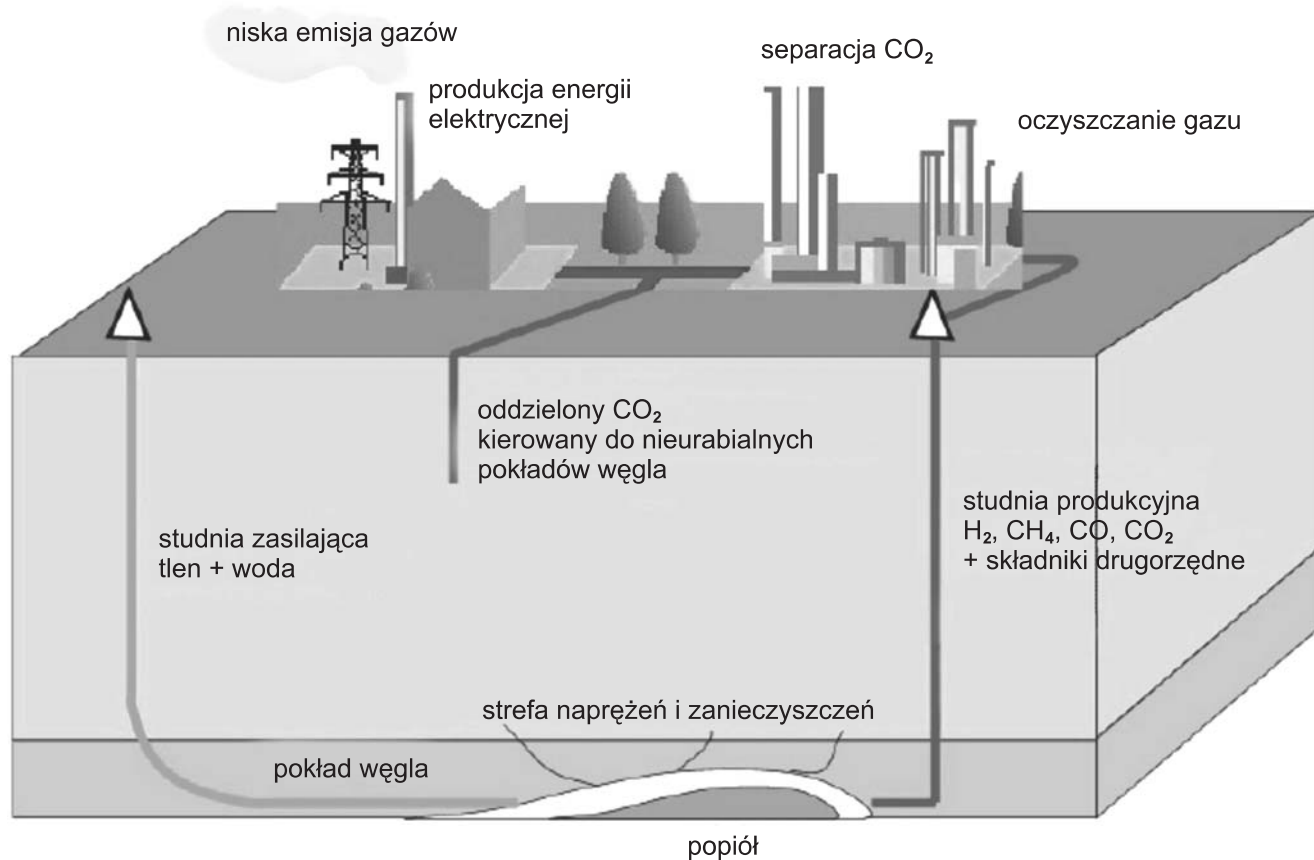


Fig. 1. Schemat procesu podziemnego zgazowania węgla (wg Kozłowskiego i in., 2008; Kasińskiego, 2010)

Scheme of underground coal gasification (UCG) process (after Kozłowski *et al.*, 2008; Kasiński, 2010)

Prezentowana tu metoda, która była dotychczas stosowana w świecie głównie do przeróbki węgla kamiennego, w odniesieniu do węgla brunatnego nie jest jednak pozbawiona istotnych niedogodności (Kasiński, 2010):

- złoża węgla brunatnego są przeważnie silnie zawodnione i często pozostają w kontakcie hydraulicznym z poziomami wodonośnymi nadkładu lub podłoża; niekontrolowany dopływ wody do złoża musi zakłócić proporcje dostarczanych mediów, a w przypadku znacznie wyższych wartości może wręcz uniemożliwić spalanie; z drugiej strony wspomniana sytuacja rodzi niebezpieczeństwo skażenia poziomów wód gruntowych;

- znane złoża węgla brunatnego są przeważnie położone płytko; to, co było zaletą w przypadku konwencjonalnych metod eksploatacji górniczej (w szczególności eksploatacji odkrywkowej), staje się wadą, ponieważ nadkład o małej miąższości nie zapewnia wystarczającej ochrony powierzchni przed wzrostem strumienia cieplnego i zjawiskami intensywnego osiadania spowodowanymi znacznymi ubytkami objętości substancji złoża podczas spalania;

- 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 (*subbituminous coal*) w Angren w Uzbekistanie współczynnik wykorzystania złoża sięga wprawdzie 82%, jednak

w przypadku występującego w Polsce węgla brunatnego miękkiego będzie on przypuszczalnie znacznie niższy.

Zgazowanie węgla dotyczyło dotychczas głównie węgla kamiennego (*bituminous coal*), na szerszą skalę prowadzonego w Republice Południowej Afryki w latach długoletniego embarga na gaz ziemny i produkty ropopochodne, związanego z polityką apartheidu. Wiele eksperymentów i prób produkcyjnych prowadzono także w zakresie zgazowania węgla brunatnego. Aż do ostatnich lat dotyczyły one niemal wyłącznie węgla brunatnego twardego (*subbituminous coal*); węgiel brunatny miękki (*lignite*) zgazowywano niejako „przy okazji” jedynie w dwóch instalacjach: w 1959 roku w Newman Spinley w Wielkiej Brytanii i w latach 1989–1998 w Tremendal (fig. 2) w Hiszpanii (Khadse i in., 2007). Niektóre z tych instalacji były wykorzystywane do produkcji energii elektrycznej, jednak produkcja ta odbywała się na niewielką skalę – do największych należała instalacja w Angren (Uzbekistan) zasilająca w gaz syntezowy elektrownię ciepłą.

Dopiero w ostatnich latach zostały uruchomione pierwsze instalacje eksperymentalne i pilotowe usytuowane na złożach węgla brunatnego miękkiego (*lignite*). Instalacje takie powstały m.in. w Stanach Zjednoczonych w Teksasie (Jennings i in., 2009), Alabamie, Illinois, Missisipi, Utah (Dorminey i in., 2009), a także w Chinach (Liu i in., 2009), Indiach (Khadse i in., 2007) i Pakistanie.



Fig. 2. Instalacja podziemnego zgazowania węgla brunatnego w Tremendal, prowincja Teruel (wg Greena, 2008)

Installation of underground lignite gasification in Tremendal, province Teruel (after Green, 2008)

PARAMETRY POKŁADU WĘGLA WARUNKUJĄCE MOŻLIWOŚCI STOSOWANIA UCG

W Polsce węgiel brunatny twardy występuje jedynie w niewielkiej ilości w utworach mezozoicznych (jura i kreda) w obrzeżeniu Gór Świętokrzyskich i w niecce północno-sudeckiej (Ciuk, Piwocki, 1990). Złoża tych węgla, niegdyś eksploatowane w rejonie Częstochowy i Zawiercia (Kołcon, Wagner, 1968), dziś nie mają żadnego znaczenia gospodarczego (Kasiński, 2010). Ogromne zasoby węgla brunatnego, szacowane na 41,6 Pg (Kasiński, 2011b), są natomiast związane z kenozoicznymi (paleogeńskimi i neogeńskimi) pokładami węgla brunatnego, reprezentowanymi wyłącznie przez węgle brunatne miękkie. Na obecnym etapie rozpoznania bazy zasobowej trudno ocenić, jaka część tych zasobów może zostać zakwalifikowana jako możliwe do podziemnego zgazowania, ponieważ szereg parametrów pokładu węgla może uniemożliwić zastosowanie do ich eksploatacji omawianej tu technologii, albo uczynić taką eksploatację nieopłacalną. Parametry, które mają krytyczne znaczenie dla procesu zgazowania podziemnego, można podzielić na trzy grupy:

- geologiczno-górniczne, warunkujące bezpieczeństwo i opłacalność procesu zgazowania: (1) głębokość zalegania pokładu węgla przeznaczonego do zgazowania, (2) miąższość tego pokładu i (3) jego położenie względem innych pokładów w złożu, (4) stopień izolacji warstw skalnych w stropie i spągu pokładu oraz (5) odległość od poziomów wodonośnych, (6) zawodnienie pokładu, (7) stopień zuskokowania i szczelinowatości górotworu, a zapewne także (8) litologia skał otaczających;
- chemiczno-technologiczne warunkujące ilość i jakość (w tym kaloryczność) uzyskiwanego gazu;
- sozologiczne, związane z oddziaływaniem na wody gruntowe oraz na powierzchnię ziemi ponad reaktorem, w tym na infrastrukturę, wody powierzchniowe oraz obszary i obiekty chronione.

Próbę przedstawienia wszystkich istotnych parametrów krytycznych stanowi karta informacyjna złoża (pokładu) węgla brunatnego (tab. 1), opracowania w toku realizacji projektu „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej” (zadanie 1: „Opracowanie szczegółowej bazy danych węgla krajowych dla procesu zgazowania”) (Kasiński, 2011a) stanowiąca adaptację podobnej karty, opracowanej wcześniej dla węgla kamiennego (Nieć, 2010)

Podstawowym problemem jest brak kryteriów parametrycznych, pozwalających na dokonanie oceny stopnia przydatności złoża (czy też raczej wybranego pokładu) do podziemnego zgazowania. Brak ten nie pozwala nie tylko na jednoznaczne zakwalifikowanie złoża do grupy przydatności (np. przydatne – warunkowo przydatne – nieprzydatne) jak i porównywania złóż pomiędzy sobą. Przy eksploatacji klasycznej – w przypadku węgla brunatnego w Polsce ma miejsce wyłącznie eksploatacja odkrywkowa – istnieją za-

twierdzone kryteria bilansowości (tab. 2), które wypełniają obie te role. W chwili obecnej nie ma jasności, jakie konkretnie wartości przypisać poszczególnym parametrom, a propozycje różnych autorów (Kozłowski i in., 2008; Nieć, 2009; Drzewiecki i in., 2011; Stachowiak i in., 2011; Hajdo, 2012) bywają dość odmienne. Zestawienie dostępnych parametrów pracujących i zaniechanych instalacji zgazowania podziemnego węgla brunatnego (tab. 3) także nie przybliża w sposób istotny rozwiązania problemu: te same parametry w poszczególnych instalacjach są bardzo zróżnicowane pod względem wartości, a ponadto niemal wszystkie dotyczą węgla brunatnego twardego.

Uproszczone kryteria przydatności pokładów węgla brunatnego zestawiono na podstawie materiałów publikowanych w tabeli 4.

PARAMETRY GEOLOGICZNO-GÓRNICZE POKŁADU WĘGLA BRUNATNEGO

Głębokość zalegania węgla. Istniejące instalacje podziemnego zgazowania węgla brunatnego twardego wykorzystują najczęściej złoża położone dość płytko (por. tab. 3), ale z reguły dobrze izolowane od powierzchni. Taki warunek spełnia tylko niewielka część bazy zasobowej (udokumentowanych złóż) węgla brunatnego w Polsce, ponieważ w świetle dotychczas obowiązujących kryteriów bilansowości były dokumentowane tylko złoża o wartości współczynnika N:W poniżej 12 (por. tab. 2).

Miąższość pokładu. Wykazano doświadczalnie, że jakość gazu syntezowego uzyskanego w procesie podziemnego zgazowania węgla wzrasta proporcjonalnie do miąższości pokładu (Nieć, 2009), przy czym produkcja gazu uzyskanego z pokładów o miąższości poniżej 2 m nie jest opłacalna ze względu na jego niską kaloryczność (fig. 3A). Z kolei duża miąższość zgazowywanego pokładu, przy stosunkowo niewielkiej grubości nadkładu, zwiększa potencjalny wpływ na powierzchnię ziemi ponad reaktorem, z powodu kumulacji strumienia ciepłego i rosnących osiadań. Zasadne wydaje się więc przyjęcie, jako jednego z kryteriów, proponowanej już wcześniej (Kasiński, 2009), wartości liniowego współczynnika N:W, którego wartość brzeżną należy określić w toku dalszych badań.

Odległość od sąsiednich pokładów węgla. Uważa się (Drzewiecki i in., 2011), że ze względu na możliwość interakcji odległość od sąsiednich pokładów węgla nie powinna być zbyt mała; najlepiej, by nie była ona mniejsza niż 10 m.

Poziom izolacji (tzw. szczelność) warstw w stropie i spągu pokładu węgla jest uzależniony od stopnia szczelinowatości (spękania) górotworu. W przypadku, gdy stopień szczelinowatości jest niewielki, co zresztą powinno być warunkiem *sine qua non* dla kwalifikacji pokładu węgla do zgazowania podziemnego, a izolacja jest uzależniona od wodoprzepuszczalności i porowatości skał otaczających

Tabela 1

Karta informacyjna pokładu węgla brunatnego (według Kasińskiego, 2011a)

Information sheet for a lignite seam (after Kasiński, 2011a)

ZŁOŻE:		POKŁAD:	
Kategoria rozpoznania		Głębokość od–do Odległość od spągu nadkładu: Rodzaj nadkładu serii węglonośnej:	
Miąższość od do [m] i średnio [m]	pokładu		
	węgla w pokładzie przerostów		
Liczba przerostów w pokładzie i ich ciągłość i rozmieszczenie			
Orientacyjna powierzchnia [km ²] pokładu o miąższości: 1,0–3,0 m ponad 3,0 m			
Zasoby bilansowe kat B kat. C ₁ kat. C ₂ kat D			
Miąższość kompleksu skał nieprzepuszczalnych nad stropem pokładu w metrach	jednorodny		Charakterystyka, jeśli zawierają przewarstwienia skał przepuszczalnych (udział %, liczba, rozmieszczenie, miąższość)
	z przewarstwieńiami piasku i żwiru do 2 m miąższości		
Zmienność kompleksu skał stropowych			
Miąższość kompleksu skał nieprzepuszczalnych w spągu pokładu w metrach	jednorodny		Charakterystyka, jeśli zawierają przewarstwienia skał przepuszczalnych (udział %, liczba, rozmieszczenie, miąższość)
	z przewarstwieńiami piaskowca do 2 m miąższości		
Zmienność kompleksu skał spągowych			
Odległość od warstwy wodonośnej w stropie [m]			
Współczynnik wodoprzepuszczalności warstwy najslabiej przepuszczalnej w stropie [m/s]			
Odległość od warstwy wodonośnej w spągu [m]			
Odległość od najbliższego pokładu w stropie [m/s]		Numer pokładu	
Odległość od najbliższego pokładu w spągu [m]		Numer pokładu	
Współczynnik wodoprzepuszczalności warstwy najslabiej przepuszczalnej w spągu [m/s]			
Wartość opałowa (w stanie roboczym) (Q _{ri}) od–do, średnio [MJ/Mg]			
Popielność (w stanie suchym) (A _d): średnio, od–do [%]			
Zawartość części lotnych (w stanie suchym i bezpopiołowym) (V _{daf}): średnio, od–do [%]			
Zawartość węgla pierwiastkowego (w stanie suchym i bezpopiołowym) C ^{daf} [%]			
Zawartość wodoru pierwiastkowego (w stanie suchym i bezpopiołowym) H ^{daf} [%]			
Całkowita zawartość siarki (w stanie suchym) (S ^d): średnio, od–do [%]			
Zawartość siarki palnej (w stanie suchym) S _d [%]			
Zawartość chloru (w stanie suchym) Cl ^d [%]			
Zawartość bituminów (w stanie suchym) B ^d [%]			
Wydajność prasmoły (w stanie suchym) T ^d _{sk} [%]			
Wydajność półkoku (w stanie suchym) (sk) ^d [%]			
Wydajność gazu wytłepnego (w stanie suchym) G ^d _{sk} [%]			
Rozcięcia erozyjne	w nadkładzie pokładu		
	rozcinające pokład		
Charakterystyka tektoniki	nachylenie pokładu		
	zuskokowanie		

Tabela 2

**Kryteria bilansowości dla złóż węgla brunatnego
(wg Rozporządzenie..., 2001, 2005)**

Applicable criteria of viability for lignite deposits
(after Rozporządzenie..., 2001, 2005)

Parametr	Jednostka	Wartość brzeżna
Maksymalna głębokość spągu złoża	m	350
Minimalna miąższość węgla brunatnego w pokładzie	m	3
Maksymalny stosunek grubości nadkładu do miąższości złoża (liniowy współczynnik nadkładu)	–	12
Minimalna średnia ważona wartość opałowa węgla brunatnego w pokładzie wraz z przerostami, przy wilgotności węgla 50 %	MJ/Mg	6 500
Maksymalna średnia ważona zawartość siarki całkowitej wraz z przerostami, przy wilgotności węgla 50 %	%	2*

* przy zawartości siarki przekraczającej 2% zasoby są kwalifikowane jako pozabilansowe

* with a sulfur content exceeding 2% the resources are classified as sub-economic

Tabela 3

**Parametry geologiczno-górnice i parametry chemiczno-technologiczne węgla brunatnego
w pokładach będących obiektami zgazowania podziemnego**

Geologic/mining parameters and chemical/technological parameters of lignite in the seams being the objects of UCG

Okres działalności	Instalacja	Kraj	Klasa węgla	Głębokość stropu [m p.p.t.]	Miąższość węgla [m]	Zawartość części lotnych	Wartość opałowa	Popielność	Wilgotność	Upad pokładu węgla [°]
						V_{daf}	Q^r_i	A^d	W^r	
						[%]	[MJ/Mg]	[%]	[%]	
1941–1946	Podmoskownaya-1 ¹⁾	Rosja	brunatny twardy	30–80	ok. 2,5	śr. 44,5		śr. 34,3	ok. 30	0–2
1946–1963	Podmoskownaya-2 ¹⁾	Rosja	brunatny twardy	ok. 50	1,0–5,0	śr. 44,5		śr. 34,3	ok. 30	0–2
1955–2012	Angren ²⁾	Uzbekistan	brunatny twardy	130–300	0,2–15,0		11 720–13 400	15,0–21,0	30–35	7–10
1959	Newman Spinney ³⁾	Wlk. Brytania	brunatny twardy i miękki	75	ok. 0,8					
1959–1976	Szackaya-1 ¹⁾	Rosja	brunatny twardy	30–60	2,6–4,0	śr. 38,1		śr. 26,0	ok. 30	0–2
1973–1974	Hanna-2 ³⁾	USA	brunatny twardy	90–120	ok. 6,8					
1976–1979	Hoe Creek ⁴⁾	USA	brunatny twardy	ok. 38	ok. 7,6					
1989–1998	Tremendal ³⁾	Hiszpania	brunatny twardy i miękki	530–580	2,0–5,0					
1999–2012	Chinchilla ³⁾	Australia	brunatny twardy	ok. 130	8,0–10,0					

¹⁾ – Kasztelewicz, Polak (2009); ²⁾ – Underground... (2008); ³⁾ – Khadse i in. (2007); ⁴⁾ – Cambell i in. (1977); Barrash i in. (1987)

Tabela 4

Uproszczone kryteria dla kwalifikowania pokładów węgla brunatnego jako bazy zasobowej dla zgazowania podziemnego (na podstawie materiałów publikowanych)

Simplified criteria for estimation of lignite seams as the resource potential for UGC (on a base of printed matters)

Parametr	Propozycje polskie		Propozycje amerykańskie (Beath, 2004)
	wymagania minimalne (Kozłowski i in., 2008)	dla procesu opłacalnego (Stachowiak i in., 2011)	
Głębokość stropu	>12 m	>150 m	100–1 400 m
Miąższość węgla	>1,5 m	>4,0 m	>3 m
Popielność A ^d	–	<20%	<60%
Zawartość siarki S ^d _t	–	<1%	–
Warunki hydrogeologiczne	poniżej poziomu wód gruntowych	minimum 40 m poniżej poziomu wód gruntowych	izolacja użytkowych poziomów wodonośnych
Skład wody	TDS >1 ppm	–	–
Szczelność nadkładu	–	warstwy szczelne na poziomie niskiego oddziaływania termicznego	warstwy szczelne pomiędzy reaktorem a użytkowym poziomem wodonośnym
Tektonika	–	brak uskoków i szczelin	brak większych nieciągłości
Zagospodarowanie powierzchni	–	brak zabudowy powierzchni, wód powierzchniowych, obszarów i obiektów chronionych	–

(por. Drzewiecki i in., 2011), wówczas miarą szczelności górotworu, na odcinku pomiędzy pokładem węgla a najbliższym poziomem wodonośnym, mogłaby być wartość średnia (ważona) współczynnika wodoprzepuszczalności, ponieważ wartość porowatości nie jest zazwyczaj podawana w dokumentacjach geologicznych złóż węgla brunatnego.

Odległość od poziomów wodonośnych wraz z wodoprzepuszczalnością tzw. „szczelnych” skał w nadkładzie i podłożu zgazowywanego pokładu węgla współdecyduje o wielkości dopływu wody do pokładu.

Zawodnienie pokładu. Ponieważ 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 może wręcz uniemożliwić spalanie. Zwiększa on również wilgotność gazu syntezowego stanowiącego produkt zgazowania podziemnego. Oba te czynniki wpływają wysoce niekorzystnie na kaloryczność otrzymanego produktu, przy czym kaloryczność maleje w stosunku do obu tych wartości odwrotnie proporcjonalnie w stosunku logarytmicznym (fig. 3A, B). Wysoka wilgotność naturalna węgla brunatnego powoduje zmniejszenie wartości opałowej gazu syntezowego, który jest z tego powodu zubożony w wodór, a wzbogacony w CO₂, co jest związane z niższą temperaturą reakcji pirolizy (w wyniku strat ciepła na odparowanie wody), która tylko nieznacznie przekracza wtedy 800°C (Stańczyk i in., 2010).

Z powyższych powodów w wielu przypadkach należałoby zastosować, podobnie jak przy konwencjonalnych

metodach eksploatacji, górnicze odwodnienie złoża, wraz z płynącymi stąd konsekwencjami dla stosunków wodnych w górotworze i dla środowiska naturalnego w otoczeniu złoża (Kostúr, Sasvári, 2010). Wydaje się jednak, że koszty związane z takim odwodnieniem uczyniłyby produkcję gazu syntezowego całkowicie nieopłacalną. Z tego powodu złoża o znacznie większym dopływie wód nie mogą być brane pod uwagę jako baza zasobowa dla potrzeb zgazowania podziemnego. W określonych przypadkach ograniczony dopływ wód gruntowych może być wykorzystany, w warunkach kontrolowanego ciśnienia, do produkcji gazu syntezowego wzbogaconego w wodór (Liu i in., 2009).

Stopień zuskokowania. Sieć uskokowa może stanowić istotne drogi migracji zarówno wód podziemnych do reaktora, jak i produktów otrzymanych w wyniku podziemnego zgazowania węgla (z których część może stanowić istotne zagrożenie środowiska) w głąb górotworu lub ku powierzchni. W skałach luźnych, które dominują w utworach paleogenu i neogenu, szczeliny uskokowe pozostają zazwyczaj zamknięte i zakolmatowane. Dlatego wskaźnik 50 metrów dyslokacji na hektar, przyjmowany dla węgla kamiennego (Drzewiecki i in. 2011), którego pokłady występują w otoczeniu skał zwięzłych, można uznać wstępnie za bezpieczny, a nawet nadmiarowy. Oczywiście i to zagadnienie wymaga dalszych badań.

Litologia skał otaczających. Litologia skał otaczających wpływa w sposób zasadniczy na właściwości wytrzymałościowe skał otaczających reaktor (szczególnie po wyżarzeniu) i występujących w jego nadkładzie. W bezpośrednim sąsiedztwie reaktora skały otaczające mogą również

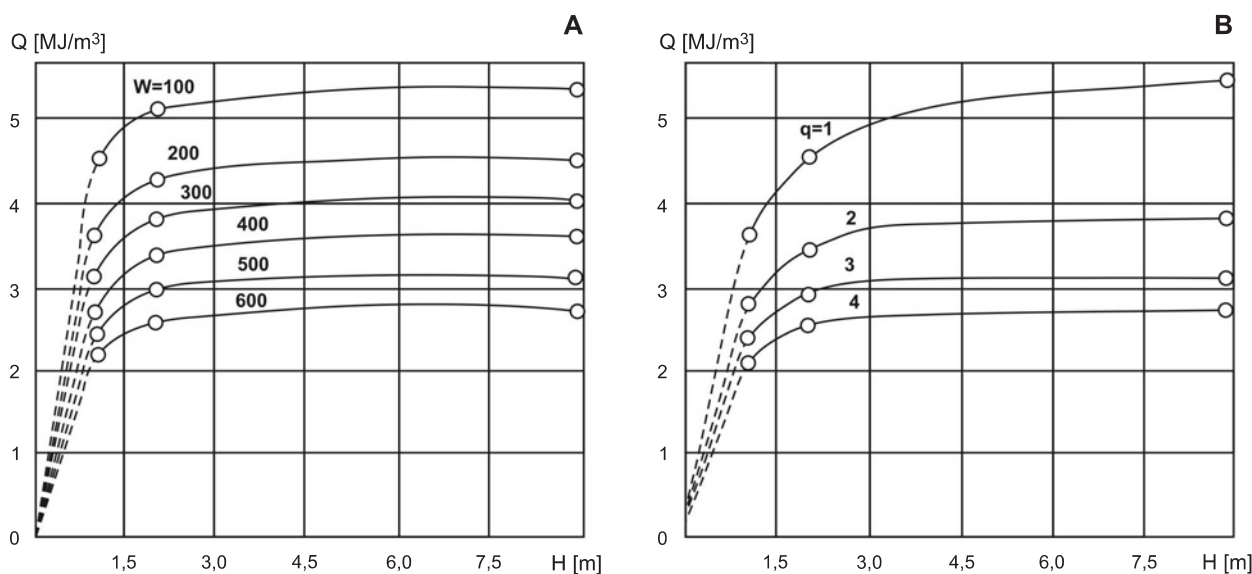


Fig. 3. Wartość opałowa gazu syntezowego – produktu zgazowania podziemnego węgla jako funkcja miąższości pokładu oraz wilgotności gazu (A) i dopływu wody do reaktora (B) (wg Niecia, 2009)

Heating value of a synthesis gas – a product of the underground coal gasification as a function of lignite seam thickness and gas moisture (A) and groundwater influx to the reactor (B) (after Nieć, 2009)

ulegać rozkładowi termicznemu, przy czym skały bardziej podatne (np. ciemne ropy i mułki z rozproszonym pirytem) mogą w procesie rozkładu emitować znaczne ilości produktów gazowych zmieniających na niekorzyść skład gazu syntezowego (Porada, 2011).

PARAMETRY CHEMICZNO-TECHNOLOGICZNE WĘGLA BRUNATNEGO

Z grupy parametrów chemiczno-technologicznych, określanych w wyniku analiz rozszerzonych węgla, wykonywanych dotychczas standardowo dla potrzeb dokumentacji geologicznych, *in plus* działa tu z pewnością wysoka wartość opałowa Q^i , zawartość węgla C^{daf} , wodoru pierwiastkowego H^{daf} , zawartość części lotnych V^{daf} , zawartość bituminów B^d oraz wydajność prasoły T_{sk}^d i gazu wytłelnego G_{sk}^d . *In minus* działa wysoka popielność A^d , zawartość chloru Cl^d i wilgotność naturalna W^t . Trudniejsza do określenia jest rola zawartości siarki palnej S_{C}^d , czy też siarki siarczanowej ($S_{SO_4}^d$), choć z pewnością nie można jej pominąć.

Parametrem węgla brunatnego, który może mieć istotny wpływ na proces zgazowania może być skład petrograficzny. Obok rozmiaru cząstek wpływa on bezpośrednio na reaktywność węgla (Sligar, 1998). Najwyższą reaktywnością cechują się macerały grupy huminitu, a następnie liptynit, najmniej reaktywne są natomiast macerały z grupy inertynit (Bielowicz, 2012).

PARAMETRY SOZOLOGICZNE OTOCZENIA REAKTORA

Proces podziemnego zgazowania węgla oddziałuje w sposób istotny zarówno na środowisko naturalne, jak i antropogeniczne. Szkodliwe oddziaływanie manifestuje się w dwóch przestrzeniach (fig. 4): w głębi górotworu, gdzie najbardziej wrażliwym elementem są wody podziemne oraz na powierzchni ziemi, gdzie może ono zagrażać środowisku przyrodniczemu i infrastrukturze.

Wpływ na wody podziemne. W procesie pirolizy węgla brunatnego, podczas zgazowania podziemnego, powstają liczne substancje szkodliwe, głównie należące do grupy organicznych związków aromatycznych (fenole, benzen, policykliczne węglowodory aromatyczne) (Campbell i in., 1977; Liu i in., 2007). Spośród zanieczyszczeń nieorganicznych podczas gazyfikacji stwierdzono bardzo wysoki wzrost stężeń jonów żelaza oraz silnie podwyższoną kwasowość wód, zazwyczaj zaznacza się także znaczny wzrost koncentracji amoniaku, siarczków i metali ciężkich (Liu i in., 2006), przy czym w przypadku węgla brunatnego stężenia tych związków są z reguły niższe niż powstające w wyniku pirolizy węgla kamiennego (Kapusta, Stańczyk, 2010).

Substancje te mogą stać się przyczyną zanieczyszczenia wód podziemnych, co ma szczególne znaczenie w przypadku obszarów wysokiej (OWO) i najwyższej (ONO) ochrony (Kleczkowski, 1990) oraz użytkowych poziomów wodonośnych.

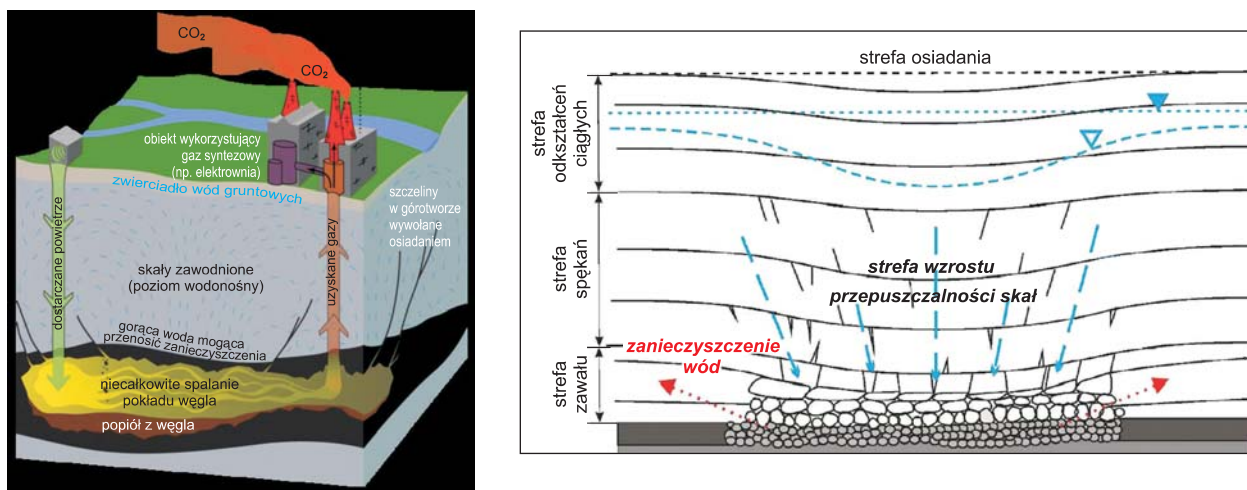


Fig. 4. Schemat wpływu podziemnego zgazowania węgla na otaczający górotwór i powierzchnię ziemi ponad reaktorem wg Coila i in. (2011) (A) oraz Kasztelewicza i Polaka (2009) (B)

Scheme of UCG impact on surrounding rocks and soil surface after Coila i in. (2011) (A) and Kasztelewicz, Polak (2009) (B)

Wpływ na środowisko przyrodnicze. Proces podziemnego zgazowania węgla wywiera wpływ na środowisko przyrodnicze przede wszystkim bezpośrednio ponad reaktorem. Dla zachowania bezpieczeństwa wskazane jest przyjęcie strefy buforowej, w której nie powinny znajdować się obszary chronione oraz zbiorniki wód powierzchniowych. Wyniki ba-

dań (Drzewiecki i in., 2011) wskazują, że taka strefa powinna obejmować obszar nie mniejszy niż 0,5 km od granic reaktora.

Wpływ na infrastrukturę. Wpływ na infrastrukturę ogranicza się głównie do obszaru ponad reaktorem; obszar ten powinien być niezabudowany i nie zawierać elementów infrastruktury liniowej (drogi, koleje *etc.*).

STAN ROZPOZNANIA BAZY ZASOBOWEJ

Stan rozpoznania bazy zasobowej węgla brunatnego w Polsce można uznać za bardzo dobry (Ciuk, Piwocki, 1990; Kasiński, 2010). W świetle „klasycznych” kryteriów bilansowości tylko w kilku niewielkich rejonach można spodziewać się udokumentowania nowych złóż i to zaledwie średniej wielkości (Kasiński, 2011b). Sytuacja wygląda zgoła odmiennie w odniesieniu do bazy zasobowej dla potrzeb zgazowania podziemnego.

Jak już wspomniano, z różnych powodów tylko część udokumentowanej bazy zasobowej może zostać wykorzystana w procesie UCG – jak wielka, tego w chwili obecnej nie sposób określić, ze względu na brak jednoznacznych kryteriów przydatności. Rysująca się paląca potrzeba ustalenia takich kryteriów zostanie zapewne zaspokojona w wyniku realizacji projektu „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej” (zadanie 1: „Opracowanie szczegółowej bazy danych węgla krajowych dla procesu zgazowania”). Na obecnym etapie kryteria takie miałyby charakter wstępny, stanowiąc materiał umożliwiający porównywanie poszczególnych obiektów, ale nie dyskwalifikujący żadnego z nich, a o ostatecznym uznaniu bilansowości złoża powinien decydować

inwestor, na podstawie dodatkowych czynników stanowiących indywidualne kryteria bilansowości, takich jak:

- odległość od instalacji odbiorczej produktu zgazowania, co generuje koszty transportu, długości rurociągu, *etc.*;
- wyniki testu przeprowadzonego już na wczesnym etapie rozpoznania złoża, które mogą wykazać, że złożo nie odpowiadające wstępnym kryteriom, np. pokład o mniejszej miąższości niż przewidują może być jednak opłacalny do zgazowania i odwrotnie, że obiekt, który odpowiada kryteriom będzie musiał zostać zdyskwalifikowany.

Mimo to wydaje się także celowe, aby wstępne kryteria zostały w przyszłości, po zgromadzeniu dalszych doświadczeń, sformalizowane w postaci kryteriów bilansowości złóż węgla brunatnego dla potrzeb zgazowania podziemnego.

Z drugiej strony zgazowanie termiczne może być prawdopodobnie zastosowane dla utylizacji cienkich pokładów węgla, o miąższości 2–3 m, które nie spełniają obecnie obowiązujących kryteriów bilansowości, a których niewielka miąższość mimo ich płytkiego zalegania zredukowałaby nadmierny wpływ emisji ciepła w kierunku powierzchni. Największe perspektywy niosą jednak pokłady węgla występujące na głębokości ponad 350 m p.p.t., czyli poniżej

głębokości dotychczas prowadzonych prac dokumentacyjnych. Możliwości występowania takich pokładów rysują się w następujących sytuacjach:

- w głębokich rowach tektonicznych wypełnionych przede wszystkim osadami paleogenu i neogenu (Kasiński, 2004), jak np. rów Roztoki–Mokrzyszowa na Dolnym Śląsku;
- w zapadliskach tektonicznych w nakładzie wysadów solnych – w tym przypadku dotyczy to głównie oligocen-skiego V pokładu węgla brunatnego (fig. 5), ale w pojedynczych przypadkach także pokładów paleocen-skich – te pokłady są względnie najlepiej rozpoznane, z powodu prowadzonych w przeszłości w tych samych obszarach prac dokumentacyjnych dotyczących złóż soli kamiennej;
- na obszarach wielkopromiennych obniżen epejrogenicznych powierzchni stropowej mezozoiku; obszary, w których ta powierzchnia występuje poniżej 200 m p.p.m. (fig. 6) można wyznaczyć na północ i zachód od legnickiego kompleksu złóż węgla brunatnego oraz w rejonie Pyrzyca na Pomorzu Zachodnim (Kasiński, 2011b).

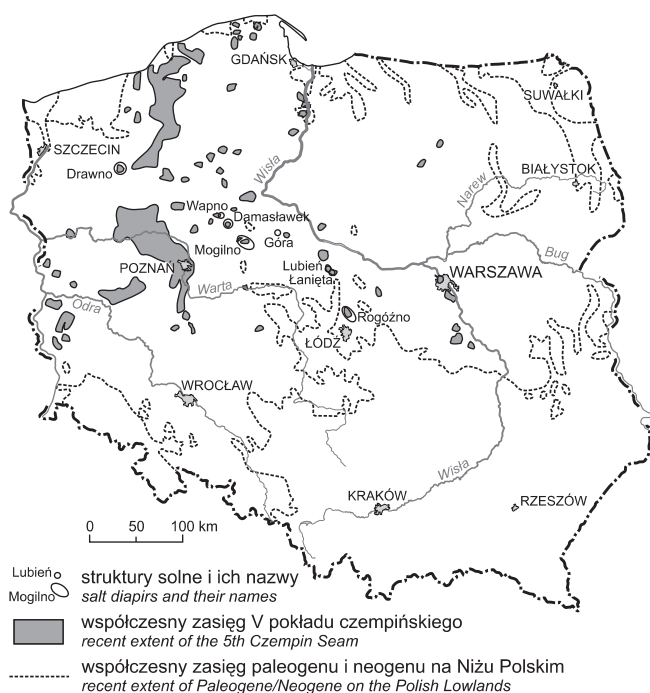


Fig. 5. Występowanie oligocen-skiego V pokładu węgla brunatnego na obszarze Polski z uwzględnieniem nakładu wysadów solnych (wg Piwockiego, 2004 oraz Kasińskiego i Saturnusa, 2010)

Occurrence of the 5th lignite seam (Oligocene) in Poland with emphasis on salt diapire overburden (after Piwocki, 2004 and Kasiński, Saturnus, 2010)

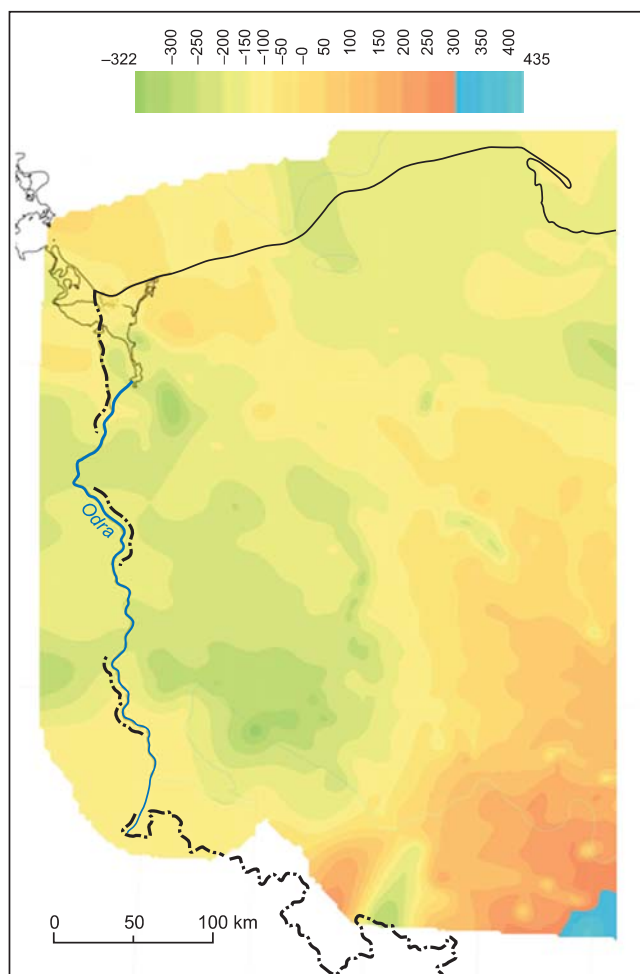


Fig. 6. Mapa powierzchni stropowej mezozoiku w zachodniej Polsce z widocznymi obszarami wielkopromiennych obniżen (wg Knoxa i in., 2010)

Map of the Mesozoic top surface in Western Poland with visible areas of large scale depressions (after Knox *et al.*, 2010)

Kompleksowe określenie bazy zasobowej węgla brunatnego dla potrzeb podziemnego zgazowania wymaga zatem prowadzenia prac w dwóch kierunkach:

- reinterpretacji materiałów archiwalnych dostępnych w dokumentacjach złożowych węgla brunatnego oraz w sprawozdaniach z poszukiwań węgla;
- prowadzenia dalszych prac poszukiwawczo-rozpoznawczych węgla brunatnego w obszarach, gdzie istnieje możliwość występowania węgla brunatnego poniżej głębokości 350 m p.p.t.

W obu przypadkach efektem prac (po ustaleniu formalnych kryteriów bilansowości) powinno być sporządzenie nowych formalnych dokumentacji geologicznych złóż węgla brunatnego.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Technologia podziemnego zgazowania węgla brunatnego, pomimo istniejących problemów i zagrożeń, wydaje się najbardziej perspektywiczną spośród wszystkich niekonwencjonalnych technologii wykorzystania tego surowca i jako taka będzie z pewnością znajdować coraz szersze zastosowanie. Nie do końca wyjaśnione elementy procesu, w szczególności w obszarze oddziaływania na środowisko, jednoznacznie wskazują na potrzebę prowadzenia dalszych badań w skali technicznej w instalacjach pilotowych zlokalizowanych na właściwie wybranych obiektach.

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;
- istnieje pilna potrzeba ustalenia ostatecznych kryteriów kwalifikacji pokładów węgla brunatnego dla potrzeb zgazowania podziemnego, które to kryteria powinny następnie zostać sformalizowane;

– należy dokonać reinterpretacji materiałów archiwalnych dotyczących węgla brunatnego (w tym istniejących dokumentacji złóż), w celu ustalenia bazy zasobowej dla potrzeb zgazowania podziemnego;

– należy w miarę możliwości przystąpić do dokumentowania głębiej położonych pokładów węgla brunatnego, jako przydatnych dla zgazowania podziemnego, chociaż jest to oczywiście proces kosztotwórczy.

Publikacja powstała w związku z realizacją zadania badawczego „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoelektrycznej produkcji paliw i energii elektrycznej”, koordynowanego przez Główny Instytut Górnicztwa w Katowicach i finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych pt. „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”.

LITERATURA

- BARRASH W., SCHOWENGERDT R.S., SMITH P., 1987 — Hydrogeology of the Hoe Creek underground coal gasification site, Powder River Basin, Western Research Institute, Wyoming.
- BEATH A., 2004 — Underground coal gasification: evaluating environmental barriers, CSIRO Exploration and Mining Report. <http://web.archive.org/web/20080719115225/>; <http://carbonenergy.com.au/uploads/File/carbonenergy/presentations/Innovation&ExcellenceCSIRO+-+Aug2004.pdf>.
- BIELOWICZ B., 2012 — Wstępna ocena możliwości wykorzystania węgla brunatnego ze złoża Gubin w procesie zgazowania. *W: Złóża kopalni – aktualne problemy prac poszukiwawczych, badawczych i dokumentacyjnych* (red. M. Pańczyk). *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **448** (ten tom).
- CAMBELL J.H., DALTON V., BUSBY J., 1977 — Effects of underground coal gasification on ground-water quality. Lawrence Livermore Lab. Papers 1977: 95–106, Livermore, CA, http://www.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/23_2_ANAHEIM03-78_0095.pdf.
- CIUK E., PIWOCKI M., 1990 — Map of brown coal deposits and prospect areas in Poland, scale 1:500 000. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- COIL D., MCKITTRICK E., HIGMAN B., 2010 — Underground coal gasification (UCG). 4 p. *W: Ground Truth Trekking, Wild Resource Alaska*, Juneau <http://www.groundtruthtrekking.org/WildResource/Issues/UndergroundCoalGasification.html>.
- DORMINEY J., NORTHINGTON J., ROXANN L., YONGUE R.A., 2009 — Lignite gasification testing at the power systems development facility. *W: 34th Intern. Technical Conf. on Clean Coal and Fuel System* May 31–June 4, 2009. Southern Comp. Services Power Systems Development Facility, Wilsonville AL.
- DRZEWIECKI J., DUBIŃSKI J., FREJOWSKI A., GAJDA A., KABIESZ J., KONOPKO W., MAKÓWKA J., MYSZKOWSKI J., PATYŃSKA R., RAJWA S., TUREK M., 2011 — Raport merytoryczny z przeprowadzonych badań i prac technicznych w okresie 04.05.2010–30.09.2011. Główny Instytut Górnicztwa. Arch. Akad. Gór.-Hutn., Kraków.
- GREEN M., 2008 — Underground Coal Gasification as a Clean Energy Option for Europe Part 2 prezentacja 2008-06-06, Wrocław.
- HAJDO S., 2012 — Analiza wyników eksperymentalnych dotyczących wymagań technologicznych i środowiskowych podziemnego zgazowania węgla brunatnego oraz opracowanie kryteriów złożowych i technologicznych dla weryfikacji krajowych zasobów węgla. Sprawozdanie roczne za 2011-01-01–2011-12-31 z części tematu badawczego 1.4.1. *W: Opracowanie szczegółowej bazy danych węgla krajowych dla procesu zgazowania* (koord. J. Klich). Główny Inst. Górnicztwa. Arch. Akad. Gór.-Hutn., Kraków.
- JENNINGS J.W., STRICKLAND R.F., von GONTEN W.D., 2009 — Texas A&M Project Status Underground Lignite Gasification. Texas. 17 p. Texas A&M University, College Station Tx. www.uwlib5.uwyo.edu/omeka/archive/files/texas-am-project-status-underground-lignite-gasification
- KAPUSTA K., STAŃCZYK K., 201 — Pollution of water during underground coal gasification of hard coal and lignite, *Fuel*, **90**,5: 1927–1934.
- KASIŃSKI, J.R., 2004 — Paleogen i neogen w zapadliskach i rowach tektonicznych. *W: Budowa geologiczna Polski. Stratygrafia. Trzeciorzęd. 3:3a* (red. T.M. Peryt, M. Piwocki): 134–161, Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- KASIŃSKI, J.R., 2009 — Przydatność polskich złóż węgla brunatnego do zgazowania podziemnego. 17 p., *Konf. „Zgazowanie Węgla – fakty i szanse”*, AGH, Kraków, 20090114/7_Kasiński.pdf.
- KASIŃSKI J.R., 2010 — Potencjał zasobowy węgla brunatnego w Polsce i możliwości jego wykorzystania. *W: Złóża kopalni – ak-*

- tualne problemy prac poszukiwawczych, badawczych i dokumentacyjnych (red. M. Pańczyk). *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **439**:1: 87–98.
- KASIŃSKI J.R., 2011a — Identyfikacja warunków złożowych węgla brunatnego przy uwzględnieniu klasycznych kryteriów bilansowości oraz określenie bazy zasobowej w ramach wybranych złóż. Sprawozdanie roczne za 2011-01-01–2011-12-31 z części tematu badawczego 1.5.2. *W*: Opracowanie szczegółowej bazy danych węgla krajowych dla procesu zgazowania (koord. J. Klich). Główny Inst. Górnictwa, Arch. AGH, Kraków.
- KASIŃSKI J.R., 2011b — Węgiel brunatny. *W*: Bilans perspektywicznych zasobów kopalin Polski według stanu na 31 XII 2009: kopaliny energetyczne (red. S. Wołkowicz, T. Smakowski, S. Speczik): 46–50. Państw. Inst. Geol. – PIB, Warszawa.
- KASIŃSKI J.R., SATERNUS A., 2010 — Oligoceńskie węgle brunatne w nadkładzie wysadów solnych na Niżu Polskim. *W*: 33. Symp.: Geologia formacji węglonośnych Polski (red. I. Lipiarski), 33: 21–33, Wyd. Akad. Górn.-Hutn., Kraków.
- KASZTELEWICZ Z., POLAK K., 2009 — Metody wydobycia węgla i rozwój technologii podziemnego zgazowania. *Konf. „Zgazowanie Węgla – fakty i szanse”*. AGH, Kraków, 20090114/1_Kasztelewicz.pdf.
- KHADSE A., QAYYUMI M., MAHAJANI S., AGHALAYAM P., 2007 — Underground coal gasification: A new clean coal utilization technique for India. *Energy*, **27**,11: 2061–2071.
- KLECZKOWSKI A.S. (red.), 1990 — Mapa obszarów Głównych Zbiorników Wód Podziemnych (GZWP) w Polsce wymagających szczególnej ochrony, skala 1:500 000. AGH, Kraków.
- KNOX R., BOSCH A., RASMUSSEN E.S., HEILMANN-CLAUSE C., HISS M., de LUGT I., KASIŃSKI J.R., KING C., KÖTHE A., SŁODKOWSKA B., STANDKE G., VANDERBERGHE N., 2010 — Cenozoic. *W*: Petroleum geological atlas of the Southern Permian Basin area (red. H. Doornenbal, A. Stevenson): 212–223. European Ass. Geoscientists a. Engineers Publ. b.v., Houten.
- KOŁCON I., WAGNER M., 1968 — Studium petrologiczne twardego węgla brunatnego z Poręby koło Zawiercia. *Kwart. Geol.*, **26**, 3/4: 533–544.
- KOSTŮR K., SASVÁRI T., 2010 — Research of lignite underground gasification. *Acta Montanistica Slovaca*, **15**, 2: 121–133.
- 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.
- LIU S.Q., WANG Y.Y., YU L., OAKLEY J., 2006 — Volatilization of mercury, arsenic and selenium during underground coal gasification. *Fuel*, **85**, 1: 1550–1558.
- LIU S.Q., LI J.G., MEI M., DONG D.L., 2007 — Groundwater pollution from underground coal gasification. *J. China Univ. Mining & Technology*, **17**, 4: 467–472.
- LIU S.Q., WANG Y.Y., ZHAO K., YANG N., 2009 — Enhanced-hydrogen gas production through underground gasification of lignite. *Mining Sci. and Technology (China)*, **19**, 3: 389–394.
- NIEĆ M., 2009 — Uwarunkowania geologiczne eksploatacji otworowej i podziemnego zgazowania węgla. *Konf. „Zgazowanie Węgla – fakty i szanse”*, AGH, Kraków, 20090114/6_Niec.pdf.
- NIEĆ M., 2010 — Analiza, identyfikacja i określenie dostępnej krajowej bazy surowcowej dla podziemnego zgazowania węgla kamiennego w części dotyczącej Dolnośląskiego Zagłębia Węglowego i Lubelskiego Zagłębia Węglowego. Sprawozdanie półroczne za 2010-07-01–2010-12-31 z części tematu badawczego 1.3.1. *W*: Opracowanie szczegółowej bazy danych węgla krajowych dla procesu zgazowania (koord. J. Klich). Główny Inst. Górnictwa, Arch. AGH., Kraków.
- PIWOCKI M., 2004 — Paleogen. *W*: Budowa geologiczna Polski. Stratygrafia. Trzeciorzęd. 3, 3a (red. T.M. Peryt, M. Piwocki): 22–71. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- PORADA S., 2011 — Badania niestandardowych właściwości węgla w aspekcie ich przydatności do procesu zgazowania. Sprawozdanie roczne za 2011-01-01–2011-12-31 z części tematu badawczego 1.1.2. *W*: Opracowanie szczegółowej bazy danych węgla krajowych dla procesu zgazowania (koord. J. Klich). Główny Inst. Górnictwa, Arch. AGH, Kraków.
- Rozporządzenie..., 2001 — Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 grudnia 2001 r. w sprawie kryteriów bilansowości złóż kopalin (Dz. U. # 153 poz. 1 774), Ministerstwo Środowiska, Warszawa.
- Rozporządzenie..., 2005 — Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 czerwca 2005 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie kryteriów bilansowości złóż kopalin (Dz. U. # 116 poz. 978), Ministerstwo Środowiska, Warszawa.
- SLIGAR J., 1998 — The Hardgrove Grindability Index, ACARP Report I. No. 5, www.acarp.com.au/Newsletters/hgi.html.
- STACHOWIAK A., NOWAK J., SZTROMWASSER E., 2011 — Złóża węgla brunatnego w rejonie Legnicy-Ścinawy i technologii ich zagospodarowania. *W*: Mezozoik i kenozoik Dolnego Śląska (red. A. Żelaźniewicz, J. Wojewoda, W. Ciężkowski): 121–135. LXXXI Zjazd PTG, Polskie Tow. Geol., Wrocław.
- STAŃCZYK K., SMOLIŃSKI A., KAPUSTA K., WIATOWSKI M., ŚWIĄDROWSKI J., KOTYRBA A., ROGUT J., 2010 — Dynamic experimental simulation of hydrogen oriented underground gasification of lignite. *Fuel*, **89**, 4: 3307–3314.
- STEINBERG M., 2005 — Conversion of coal to substitute natural gas (SNG). HCE, LLC Proprietary Information HCEI 1-05-1, 23 p. Melville NY. com.HCEI105001.pdf
- Underground...*, 2008 — Underground coal gasification in Republic of Uzbekistan. Eioba, Almaty, <http://www.eioba.com/a/lws2/underground-coal-gasification-in-republic-of-uzbekistan>

SUMMARY

Technology of underground gasification of coal, despite existing problems and hazards, seems to be most prospective of all unconventional technologies of coal utilisation and, therefore, will certainly find wider application (Figs 1 and 2). Today it applied on an industrial scale mostly in the processing of bituminous and subbituminous coal (in China, In-

dia, Russia, South Africa and Uzbekistan) but there is no reason to believe that it could be also applied for lignite.

However, there are no closely defined criteria that should be used to determine the suitability of specific lignite deposits to the process of underground gasification. We should consider three major groups of those:

– geologic/mining parameters of the lignite seam, i.e. depth and thickness, distance from neighboring lignite seams and aquifers, insulation (tightness) level, water supply, faulting, lithology of neighboring rocks);

– chemical and technical parameters, such as heat value Q_i^r , elementary carbon C^{daf} and hydrogen H^{daf} content, content of volatile matter V^{daf} , bitumine content B^d , pra-ter T_{sk}^d and gas G_{sk}^d efficiency, ash content A^d , chlorine content Cl^d and natural moisture content W^f .

– environmental parameters of the reactor: (1) impact on groundwater, which may be polluted with products of coal pyrolysis (phenols, benzene, polycyclic aromatic hydrocarbons – Campbell *et al.*, 1977) and inorganic compounds (ammonium, sulphides and heavy metals – Liu *et al.*, 2006),

(2) impact on the surface natural environment, and (3) impact of human infrastructure.

Not fully explained conditions of the process, particularly in the area of environmental impact, indicate the need for further research on the technical scale in the pilot installations located in appropriately selected objects.

Because the evaluating criteria for estimation of usefulness of lignite to the underground gasification process are quite different than those applied for “classic” mining, geological data of lignite deposits should be reprocessed to determine the potential of lignite for the UCG technology. Studies of lignite seams located deeper than those for opencast mining also might be interesting from the viewpoint of underground gasification.