

UKD 622.333: 622.1: 550.8: 622.553.96: 622.553.94

Stan bazy zasobowej węgla w Polsce i jej problemy złożowo- -środowiskowe w odniesieniu do eksploatacji metodą podziemnego zgazowania

State of the resources base of coal in Poland and deposit and environmental
problems in relation to the underground coal gasification process



Prof. dr hab. inż. Marek Nieć^{*)}



Dr inż. Jarosław Chećko^{**)}



Dr inż. Jerzy Górecki^{*)}



Dr inż. Edyta Sermet^{*)}

Treść: Ewidencjonowane w Polsce zasoby geologiczne złóż węgla kamiennego i brunatnego są bardzo duże. Istnieje jednak szereg ograniczeń dla wykorzystania złóż węgla przy zastosowaniu podziemnego zgazowania węgla (PZW). Są to miąższość pokładu/złoża, warunki hydrogeologiczne złoża i jego otoczenia, rodzaj, budowa i grubość nadkładu, tektonika, budowa wewnętrzna złoża (ciągłość, przerosty skał płonnych itp.). Efektem gazyfikacji są m.in. toksyczne produkty ciekłe i gazowe. Ich emisja do środowiska może powodować skażenia np. wód podziemnych, a także poważne zagrożenia dla bezpieczeństwa publicznego (np. migracja CO, CH₄). Innymi negatywnymi zjawiskami mogą być deformacje i osiadanie powierzchni terenu.

Abstract: Registered geological resources of hard coal and lignite deposits are very large in Poland. However there are lots of limits to the use of coal deposits by applying the underground coal gasification (UCG). These are: seam or deposit thickness, hydrogeological conditions of the deposit and its environment, type, structure and thickness of the overburden, tectonics, structure of the deposit. The overburden increased permeability and subsidence, gas (CO, CO₂, H₂) and organic pyrolysis products emission, possible water and air contamination are the main negative events related to underground coal gasification.

Słowa kluczowe:

złoża węgla kamiennego, złoża węgla brunatnego, podziemne zgazowanie węgla (PZW), złożowo-środowiskowe warunki stosowania PZW

Key words:

hard coal deposits, brown coal deposits, underground coal gasification (UCG), deposit and environmental conditions for the UCG application

^{*)} AGH w Krakowie, ^{**)} Główny Instytut Górnictwa w Katowicach

1. Wprowadzenie

Trudności, na jakie napotyka tradycyjna eksploatacja złóż węgla, zarówno podziemna, jak i odkrywkowa powodują, że duże nadzieje wiąże się ich wykorzystaniem metodą podziemnego zgazowania (PZW). Podejmowane były liczne próby podziemnego zgazowywania węgla w wielu krajach [13, 11, 14, 19]. W trzech przypadkach udało się uruchomić eksploatację na skalę przemysłową węgla kamiennych niskiej klasy w zagłębiu kuznieckim w okresie 26 lat oraz twardej węgla brunatnych w zagłębiu podmoskiewskim w okresie 15 lat, a także na złożu Angren w Uzbekistanie trwającą od 1965 r. [12]. We wszystkich przypadkach uzyskiwano gaz o wartości opałowej $700 \div 900 \text{ kcal/m}^3$ użytkowany na cele lokalne w odległości do 30 km od miejsca pozyskania. Zgazowywanych rocznie było $36 \div 79 \text{ tys. t}$ węgla [12]. Próbną eksploatację uruchomiono także w Australii na złożu Chinchilla [9].

Rosnące zainteresowanie możliwością eksploatacji węgla tą metodą skłania do rozważania jej zastosowania w złożach polskich [20, 3, 11]. Do czasu podjęcia systematycznych badań nad możliwością stosowania PZW, w wielu publikacjach krajowych i zagranicznych prezentowano, w sposób bezkrytyczny, całą bazę zasobową złóż węgla w Polsce jako podstawę dla optymistycznej oceny możliwości stosowania tej metody na szeroką skalę [4, 5, 6, 3, 33]. Zakładano, że PZW może być alternatywą dla konwencjonalnych metod eksploatacji węgla, w szczególności w pokładach, których eksploatacja nie może być podejmowana ze względów ekonomicznych lub z powodu istniejących zagrożeń, w szczególności w pokładach cienkich, na dużej głębokości, a także w resztkach nie wyeksploatowanych pokładów w likwidowanych kopalniach [5, 33] oraz, że pozwoli ono na bardziej efektywne i mniej kosztowne wykorzystanie zasobów [28, 22, 23].

Opinie te budziły zastrzeżenia [24, 17]. Zwracano uwagę na znaczenie znajomości budowy geologicznej dla właściwego projektowania podziemnego zgazowania oraz wpływ czynników geologicznych na przebieg procesu PZW i jego efektywność [28, 24, 17, 10].

2. Problemy podziemnego zgazowania węgla

W 2010 r. podjęte zostały systematyczne prace w celu oceny możliwości stosowania PZW i oceny zasobów realnie przydatnych do takiej eksploatacji z uwzględnieniem specyficznych cech budowy geologicznej polskich zagłębi węglowych oraz warunków występowania i właściwości pokładów węgla. Realizowane są one w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych pt.: „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, w zadaniu badawczym „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysoce efektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej”. Celem jest

„Opracowanie szczegółowej bazy danych węgla krajowych dla procesu zgazowania” (temat badawczy 1).

Ewidencjonowane w Polsce zasoby węgla kamiennego w pokładach o miąższości ponad 1 m i węgla brunatnego (miękkiego) w pokładach o grubości ponad 3 m są bardzo duże (tabl. 1). Istnieje jednak wiele ograniczeń dla wykorzystania złóż węgla przy zastosowaniu podziemnego zgazowania. Zmuszają one do krytycznej oceny możliwości stosowania tej metody.

Rozpatrywana jest możliwość podziemnego zgazowania węgla w trzech wariantach:

- za pomocą otworów wierconych z powierzchni,
- w złożu udostępnionym wyrobiskami górnictwami,
- za pomocą otworów wierconych z wyrobisk górniczych (tzw. metodą hybrydową).

Podstawowymi czynnikami geologicznymi istotnymi dla prowadzenia takiej eksploatacji są:

- miąższość złoża,
- warunki hydrogeologiczne złoża i jego otoczenia,
- rodzaj, budowa i grubość nadkładu,
- tektonika złoża,
- rodzaj i właściwości skał budujących złoża i ich zmiany w wyniku eksploatacji,
- budowa wewnętrzna złoża (jego ciągłość, przerosty skał płonnych itp.).

Produktem zgazowania jest gaz o złożonym składzie, w którym, w zależności od sposobu realizacji procesu poważny udział, nawet do kilkudziesięciu procent mają składniki toksyczne w szczególności CO. Ubocznym efektem zgazowania są produkty wyprzedzającej pirolizy węgla, na przykład fenole. Podstawowym pytaniem jest czy PZW stanowi szansę czy zagrożenie dla bezpiecznej i racjonalnej gospodarki złożem spełniającej wymagania ochrony środowiska.

Podstawową trudnością w ocenie bazy zasobowej złóż do PZW jest brak wyczerpujących i jednoznacznych informacji, jakie wymagania musi spełniać złoża węgla i poszczególne pokłady by mogły kwalifikować się do eksploatacji tą metodą, w szczególności w złożach wielopokładowych. Nie uzyskano ich dotychczas mimo licznych, podejmowanych prób stosowania PZW. Przedstawiane w wielu publikacjach takie wymagania stanowią oceny eksperckie nie popierane uzasadnieniem.

Jedynymi kryteriami, które są dotychczas dostatecznie udokumentowane przez doświadczenia praktyczne są:

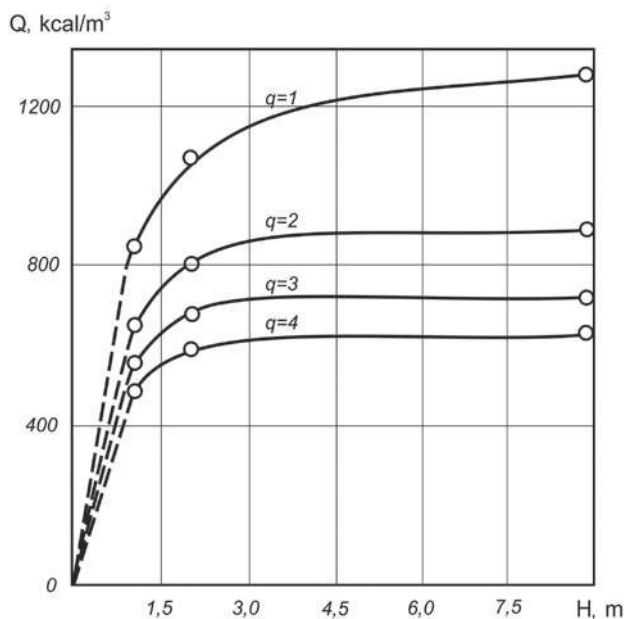
- miąższość pokładów węgla,
- typ węgla.

Efektywny przebieg procesu, oceniany na podstawie wartości opałowej uzyskiwanego gazu ma miejsce, gdy prowadzona jest gazyfikacja pokładów o miąższości ponad 2 m [12]. Może być zadowalający jeszcze przy miąższości ok. 1,5 m, ale gdy jest ona mniejsza, efektywność procesu gwałtownie spada (rys. 1). Do podobnego wniosku prowadzi także analiza kosztów podziemnej gazyfikacji [23]. W przypadku małej miąższości pokładów istotne znaczenie dla przebiegu gazyfikacji mają straty ciepła w stropie i spągu pokładu.

Tablica 1. Zasoby złóż węgla w Polsce (mld t) wg [35, 38]

Table 1. Resources of coal in Poland (mld t) acc. to [35, 38]

WĘGIEL KAMIENNY	Udokumentowane bilansowe do 1000 m			Prognostyczne poniżej 1000 m
	Łącznie	typ 31-33	typ 34-37	
Ogółem	48,2	34,5	12,9	34,6
Złoża zagospodarowane	19,1	11,4	7,7	
WĘGIEL BRUNATNY	Udokumentowane bilansowe do 350 m			Prognostyczne do 350 m
Ogółem		22,6		27,5
Złoża zagospodarowane		1,59		



Rys. 1. Zależność wartości opalowej gazu Q (kcal/m³) od miąższości złoża H (m) i dopływu wody q (m³/t) [wg. 12]

Fig. 1. Relation of heating value of the gas Q (kcal/m³) from deposit thickness H (m) and water inflow q (m³/t) [after 12]

Również duże straty ciepła powoduje wysoka wilgotność węgla. Na podstawie doświadczeń gazyfikacji naziemnej w reaktorze fluidalnym można przyjąć, że powinna być ona mniejsza od 15 % [32].

Istotne znaczenie dla efektywności procesu, mierzonej kalorycznością uzyskiwanych produktów gazowych, ma zawodnienie złoża (rys. 1). W przypadku złóż zawodnionych

i występowania utworów wodonośnych bezpośrednio w otoczeniu złoża niezbędne jest ich odwodnienie.

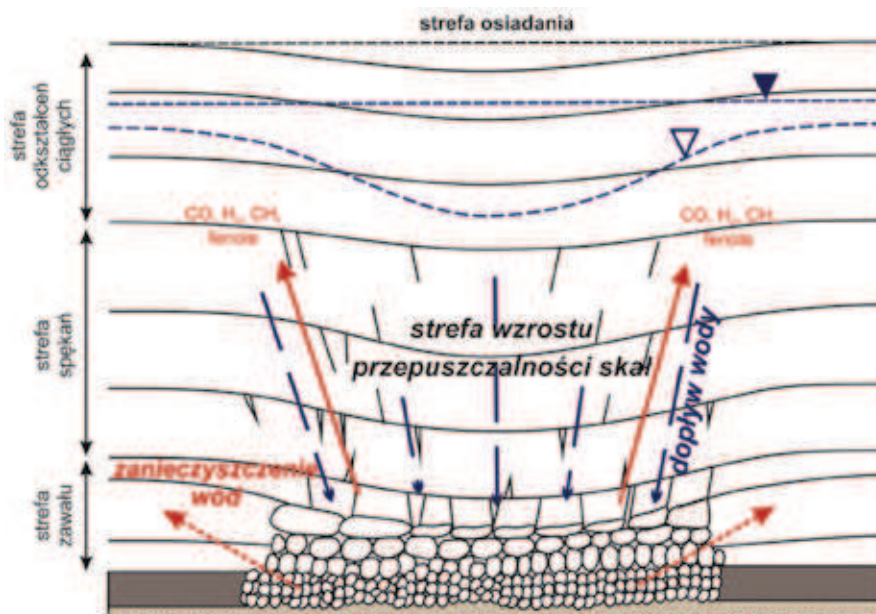
Na skalę przemysłową udało się dotychczas prowadzić podziemne zgazowanie węgla brunatnych twardych. Przyjmuje się, że do tego procesu nadają się tylko węgle o niskiej spiekalności [16 wg 30]. Według doświadczeń zgazowania naziemnego w reaktorze fluidalnym nie kwalifikują się do zgazowania węgle o wskaźniku spiekalności wyrażonym indeksem Rogi ponad 15, a zatem już węgle typu 32.2, 33 oraz koksowe typu 34, 35 i wyższych [32]. Kwestia możliwej gazyfikacji węgla o dużej spiekalności, zwłaszcza w złożu („in situ”) nie jest dostatecznie wyjaśniona. Można jedynie przypuszczać, że w przypadku gazyfikacji węgla koksowych, które na dużej głębokości mają małą porowatość, wystąpią zjawiska uszczelniania gazogeneratora przez produkty pirolizy poprzedzającej samo zgazowanie, które będą utrudniać jego prowadzenie. Można też przypuszczać, że zmienność jakości węgla jest jednym z czynników zróżnicowania składu produktów gazyfikacji, ale brak na ten temat dostatecznych danych.

W przypadku zgazowania naziemnego za parametr kluczowy podawana jest zawartość chloru, która powinna wynosić poniżej 0,1 %. Można w związku z tym żywić obawy, że utrudniać może ona proces gazyfikacji węgla na dużych głębokościach, gdy w serii węglonośnej występują wody zasolone i solanki.

Na przebieg procesu zgazowania węgla w złożu i jego efekty ma także wpływ budowa wewnętrzna pokładu, w szczególności jego ciągłość, obecność i rozmieszczenie przerostów płonnych oraz zmienność jakości węgla. Brak jednak na ten temat dostatecznych danych.

3. Problem szczelności górotworu

Efektom gazyfikacji są toksyczne produkty ciekłe i gazowe. Emisja ich do środowiska może powodować jego skażenie i poważne zagrożenia (rys. 2). Mogą się one ujawniać nawet



Rys. 2. Osiadanie i spękania nadkładu, deformacje powierzchni terenu, emisja gazów (CO, CO₂, H₂, związków organicznych), możliwe zanieczyszczenie wód podziemnych i atmosfery w związku z eksploatacją węgla metodą podziemnego zgazowania [wg 17, zmodyfikowany]

Fig. 2. Overburden increased permeability and subsidence, gas (CO, CO₂, H₂) and organic pyrolysis products emission, possible water and air contamination, related to underground coal gasification process [after 17]

po znacznym upływie czasu, zależne od okresu i dróg migracji tych produktów w otoczeniu gazogeneratora. Substancje gazowe, a także ciekłe, powstające w pierwszej fazie koksowania węgla w wysokiej temperaturze, poprzedzającej fazę gazyfikacji stwarzają zagrożenie zanieczyszczeniem wód podziemnych [30]. Zwraca się uwagę w szczególności na fenole, jako charakterystyczne, wykrywane produkty gazyfikacji [39]. Migracja gazów do powierzchni (w szczególności CO, CH₄) może powodować bezpośrednie zagrożenie dla bezpieczeństwa publicznego. Zgodnie przyjmuje się zatem, że istotną cechą pokładu i przestrzeni, w której prowadzona jest gazyfikacja (gazogeneratora) jest jego izolacja od powierzchni, zbiorników wód podziemnych i poziomów wodonośnych. Wymaganie szczelności gazogeneratora, jego izolacja, ma dwójakie znaczenie:

- zabezpieczenie przed dopływem wody z zewnątrz z poziomów wodonośnych,
- zabezpieczenie środowiska przed skażeniem: wód podziemnych przez produkty ciekłe pirolizy węgla (w szczególności fenole) oraz wód powierzchniowych, podziemnych i atmosfery przez gazowe produkty gazyfikacji (CO, CH₄, NH₃, H₂S).

Całkowicie brak jest niestety danych zarówno doświadczalnych, jak i modelowych na temat warunków, jakie muszą być spełnione by odpowiednia szczelność była zapewniona. Brak w związku z tym danych odnośnie niezbędnej minimalnej miąższości utworów izolujących pokład, nieprzepuszczalnych dla toksycznych produktów zgazowania, w szczególności po naruszeniu tych utworów przez deformacje poeksploatacyjne i przemiany fazowe skał pod wpływem wysokiej temperatury. Wypowiedane opinie na temat wymaganej miąższości skał nieprzepuszczalnych, izolujących gazogenerator są bardzo zróżnicowane. Podawane są wielkości od 10 do 100 m. Hajdo i Herbich [15] uważają, że powinna ona wynosić 2,74 grubości pokładu węgla, ale jest to ocena bardzo zaniżona, uwzględniająca tylko strefę zawału i spękań z nią bezpośrednio związanych.

Powyżej zawału powstaje strefa spękań. Przyjmuje się, że jej miąższość jest równa około 40-krotnej grubości pokładu [18]. Podawane są także wartości równe 20÷100-krotnej miąższości warstwy wybranej, a wysokość strefy spękań połączonych w której zachodzi może swobodny przepływ płynów szacuje się na 19 ÷ 41 m [29].

Zakłada się też, że wysokość strefy zwiększonej przepuszczalności H zależy od długości gazoreaktora L [34]. Wynosi ona

$$H_g = L/G_g$$

gdzie G_g – współczynnik 1,45 dla pokładów poziomych wzrastający do 2,12 dla pokładów nachylonych pod kątem 50°.

Zasięg strefy spękań w poziomie zależy od wysokości a nad gazoreaktorem i wynosi

$$X_g = L - a G_g$$

Strefa wzmózonej przepuszczalności może występować także poniżej gazoreaktora i jej głębokość wynosi

$$H_d = L/G_d$$

gdzie G_d – współczynnik 3,91 dla pokładów poziomych wzrastający do 5,33 dla pokładów nachylonych pod kątem 50°.

Zasięg strefy wzmózonej przepuszczalności w poziomie zależy od głębokości b poniżej gazoreaktora i wynosi:

$$X_d = L - b G_d$$

Poza strefą spękań, w skałach porowatych, np. w piaskowcach możliwa jest migracja gazów (szczególnie CO) na znaczną odległość, dochodzącą nawet do 133 m.

Można przyjąć, że przy uwzględnieniu pełnego zawału stropu nad gazogeneratorem i samopodsadzenia przestrzeni wyeksploatowanej na wysokość równą $5M$ (gdzie M miąższość pokładu przy założeniu współczynnika rozluźnienia skał w zawale 1,2), miąższość strefy poeksploatacyjnych spękań łącznie ze strefą zawału wyniesie 60 do 70 m (dla pokładów o miąższości 2 ÷ 4 m). Zakładając, że nienaruszona, wyżej leżąca izolująca warstwa skał nieprzepuszczalnych powinna mieć grubość co najmniej 10 m, gazogenerator powinien być odległy od utworów zawadzionych w stopie o minimum 70 ÷ 80 m. Ze względu na niejednorodność litologiczną utworów karbońskich powinno się przyjmować tę odległość około 100 m. Odpowiada to miąższości półki ochronnej przyjmowanej w Lubelskim Zagłębiu Węglowym dla serii węglonośnej występującej pod zawadzionym nadkładem utworów jurajskich i kredowych. Zarazem jest to odległość przyjmowana jako zasięg migracji gazów w stropie wyrobiska eksploatacyjnego [21]. Należy też mieć na uwadze, że w górotworze zbudowanym z warstw o różnych parametrach fizycznych następuje nierównomierne uginanie warstw i tworzy się mogą między nimi pustki („pustki Webera”) zapełniane przez gazy toksyczne.

Warunkiem szczelności gazogeneratora jest brak zaburzeń tektonicznych, uskokowych, naruszających ciągłość pokładu i stanowiących potencjalne drogi migracji gazowych produktów reakcji do otoczenia. Na temat niezbędnej odległości gazogeneratora od uskoków brak jest również przekonywujących danych. Przyjmuje się, że nie powinny one występować w promieniu od 50 m do 1 km.

Nieuniknionym efektem eksploatacji jest osiadanie powierzchni terenu nad wyeksploatowaną częścią złoża. Wielkość obniżenia zależy od jego miąższości i stopnia wypełnienia przestrzeni wyeksploatowanej. Brak możliwości bezpośredniego sterowania przebiegiem procesów w złożu powoduje często nieregularny jego rozwój i w konsekwencji zmienny kształt tej przestrzeni. Istotne znaczenie mają zwykle w tym przypadku zjawiska tektoniczne i spękania skał tworzących złoża. Zaburzenia takie naruszają ciągłość złoża i mogą albo utrudniać prowadzenie eksploatacji, albo powodować ukierunkowany przebieg procesów wydobywczych i nieregularny kształt przestrzeni poeksploatacyjnej. Zaburzenia tektoniczne, w szczególności układ spękań, wpływają na rozwój procesów zgazowania w złożu [27], a w konsekwencji na kształt przestrzeni wyeksploatowanej [2]. Zaburzenia tektoniczne, nieciągłe (uskoki, spękania) naruszają także szczelność nadkładu i wpływają na przebieg poeksploatacyjnych obniżenia powierzchni.

Przy obecnym stanie wiedzy na temat podziemnego zgazowania można wskazać warunki, w których jego realizacja powinna być uwieńczona sukcesem oraz takie, które wykluczają stosowanie tej metody. Można także wskazać warunki, w których możliwość jej stosowania wymaga badań i wyjaśnienia (tabl. 2).

4. Problemy stosowania PZW w złożach węgla brunatnego i racjonalnego wykorzystania jego złóż

Warunki stosowania PZW w polskich złożach węgla brunatnego są bardzo trudne ze względu na cechy ich budowy geologicznej i związany z tym uwarunkowania hydrogeologiczne. Utwory wodonośne występują w bezpośrednim sąsiedztwie pokładów węgla. Stanowią je osady piaszczyste w trzeciorzędowej serii węglonośnej, pod powęglowe i nad

Tablica 2. Kryteria kwalifikacji pokładów węgla do podziemnego zgazowania
Table 2. Eligibility criteria for coal seams in underground coal gasification

Cechy złóż pokładów i węgla		Wymagane	Niewyjaśniona przydatność	Nieprzydatne
Właściwości węgla	stopień uwęglenia (typ węgla)	31÷32	33, 34 i wyższe	
	zawartość popiołu	do 30 %		
	wilgotność	do 15 %	15÷20 %	ponad 20 %
	zawartość siarki	do 1 %	ponad 1 %	
Cechy pokładu	miąższość	ponad 2 (1,5m)	1,0÷1,5 (2) m	poniżej 1,0 m
	przerosty płonne	brak	dopuszczalny maksymalny udział przerostów i ich miąższość	
	skały otaczające	nieprzepuszczalne mulowce, ilowce piaskowce małoporowate,	wpływ przeobrażeń termicznych skał ilastych, węglanowych na przebieg i efektywność procesu (straty ciepłe)	porowate piaskowce, piaskowce zawodnione
Miąższość nadkładu nieprzepuszczalnego dla gazów		ponad 100 m	10÷100 m	poniżej 10 m
Zuskokowanie		brak uskoków	uskoki w odległości 50 ÷ 300 m	sieć uskoków co 50 m

węglowe, oraz obecne w nadkładzie zawodnione osady czwartorzędowe, często piaski i żwiry wodnolodowcowe. Wodonośne osady czwartorzędowe wypełniają również rynny erozyjne i paleodoliny nieraz wcięte głęboko, nawet poniżej pokładów węgla. Stanowią one często Użytkowe Poziomy Wodonośne oraz często Główne Zbiorniki Wód Podziemnych (rys. 3).

Doświadczenia eksploatacji węgla metodą PZW wskazują, że stopień wykorzystania węgla w procesie zgazowania wynosi: ok. 80 % w przestrzeni roboczej i poniżej 80 % w przestrzeni złoża [12, 1]. Udział produktów palnych w uzyskiwanym gazie stanowi ok. 70 ÷ 80% według dotychczasowych doświadczeń eksploatacji. Łącznie wykorzystanie zasobów złoża wynosi wobec tego do około 50 %, to jest znacznie mniej niż w przypadku eksploatacji odkrywkowej. Zatem ze względu na wymagania racjonalnego wykorzystania zasobów złóż jako nieodnawialnego składnika środowiska przyrodniczego złoża dostępne dla eksploatacji odkrywkowej nie powinny być przeznaczane do gazyfikacji.

Czynnikami, który praktycznie uniemożliwia stosowane PZW jest bardzo duża naturalna wilgotność węgla wynosząca

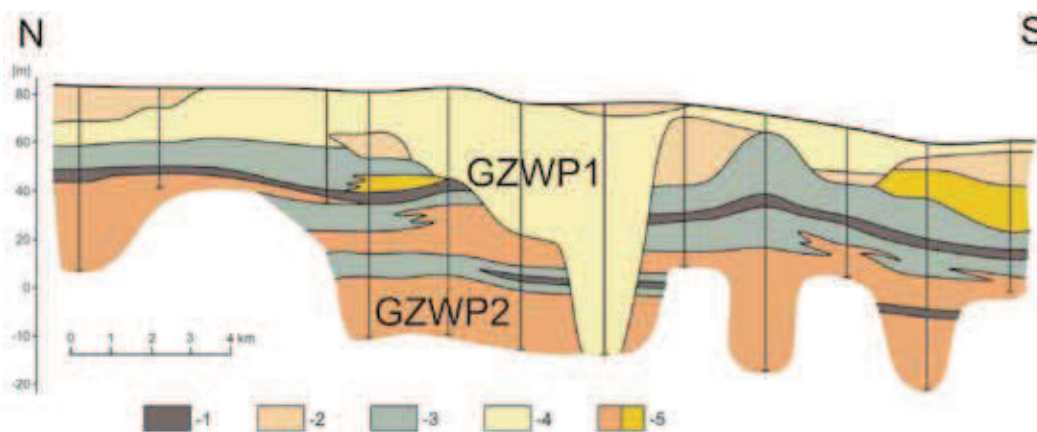
około 50 %. Próby podziemnego zgazowania takiego węgla w basenie dniewrowskim nie zostały uwieńczone sukcesem [12]. Można jednakże rozpatrywać możliwości stosowania PZW w przypadku gdy węgiel została w sposób naturalny przynajmniej częściowo osuszony [15].

5. Problemy stosowania PZW w złożach węgla kamiennego i racjonalnego wykorzystania jego złóż wielopokładowych

W złożach węgla kamiennego, w Górnoląskim, Lubelskim i Dolnośląskim Zagłębiu Węglowym wiele czynników ogranicza lub nawet wyklucza możliwość stosowania PZW (tab. 3).

Jako podstawowe kryteria kwalifikacji pokładów do PZW przyjęto:

- minimalną miąższość węgla w pokładzie 1,5 m,
- typ węgla 31-33,
- odległość od zawodnionych utworów leżących na serii węglonośnej 100 m,



Rys. 3. Typowe warunki występowania złóż węgla brunatnego (złożo Trzcianka)

1 – węgiel brunatny, 2 – gliny zwałowe, 3 – iły i mulki trzeciorzędowe, 4 – zawodnione piaski i żwiry oraz piaski czwartorzędowe, 5 – piaski trzeciorzędowe (a – głównych poziomów wodonośnych, b – podrzędnych poziomów wodonośnych) GZWP – Główne Zbiorniki Wód Podziemnych

Fig. 3. Natural conditions for lignite deposit occurrence (Trzcianka lignite deposit)

1 – lignite, 2 – quaternary boulder clays, 3 – tertiary clays and silts, 4 – quaternary waterbearing sands and gravels, 5 – tertiary waterbearing sands (a – main, b – subordinated), GZWP – main protected aquifers

Tablica 3. Czynniki ograniczające lub wykluczające (przy obecnym stanie wiedzy) możliwość stosowania PZW [25], uzupełnione)

Table 3. Factors excluding or limiting the possibilities of the UCG process application, acc. to [25]

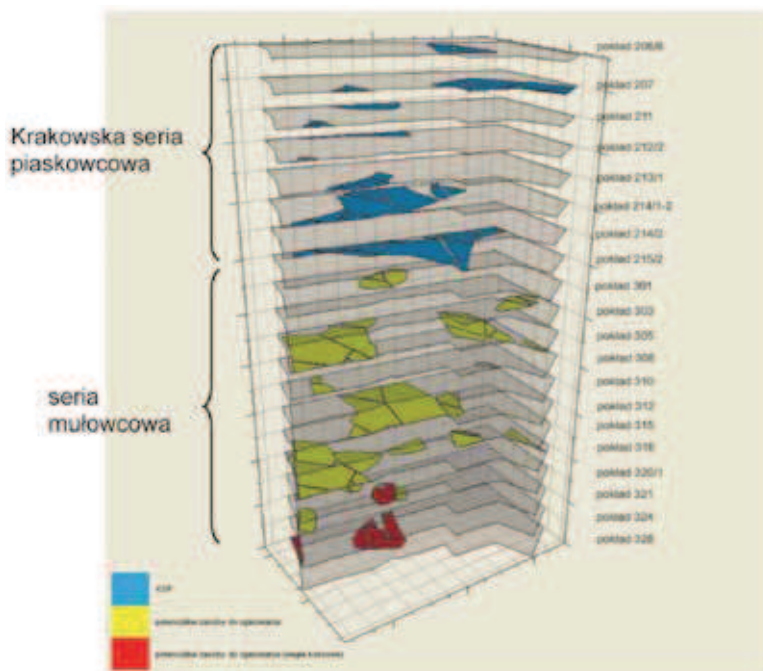
Zagłębie	Czynniki ograniczające	Czynniki wykluczające	Uwagi
DZW	niewielki udział węgla typu 32-33		nie wyjaśniona możliwość zgazowania węgla koksowych i antracytu
	zaburzenia tektoniczne		
	zagrożenia wyrzutami węgla i skał		niewyjaśniony wpływ CO ₂ w gazach złożowych na przebieg PZW
LZW	niewielkie fragmenty odosobnionych pokładów o miąższości ponad 1,5 m, liczne przerosty płonne w pokładach	pokłady położone blisko stropu serii węglonośnej pod nadkładem zawodnionych utworów jurajskich i kredowych	rozpatrywane mogą być pokłady na głębokości ponad 800 m
	częściowo pokłady typu 33 i wyższe,		
GZW	pokłady o miąższości ponad 1,5 m w serii mułowcowej (warstwy załęskie i brzeskie) blisko położone w stosunku do siebie i innych o miąższości mniejszej. Blisko siebie położone pokłady w warstwach siódłowych (w górnośląskiej serii piaskowcowej) bez dostatecznej wzajemnej izolacji	Pokłady w krakowskiej serii piaskowcowej (grupy 100 i 200) ze względu na wysoką przepuszczalność piaskowców i występowanie w ich obrębie użytkowych poziomów wodonośnych)	
	metanonośność pokładów ponad 2 m ³ /t _{csw} , zwykle poniżej pokładu 328 oraz pod nadkładem mioceńskim		nie wyjaśniony wpływ metanonośności węgla na przebieg jego podziemnego zgazowania
	częste bardzo silne zuskokowanie		często przyczyna pozostawiania niewybranych resztek pokładów
	znaczny udział węgla koksowych (typ 34 – 35) zwłaszcza w pokładach głęboko położonych		nie wyjaśniona możliwość zgazowania węgla koksowych

- odległość od głównych uskoków przynajmniej 50 m,
- minimalne zasoby parceli nienaruszonej uskokami spełniającej wyżej wymienione warunki które powinny zapewnić efektywne wykorzystanie złoża 3-5 mln t; przy miąższości pokładu 2 m odpowiada to przeciętnie powierzchni około 1,5 mln m² (1,5 km²).

Na podstawie szczegółowej analizy map pokładowych stwierdzono, że powyższe warunki spełnia tylko niewielka część zasobów. W niezagospodarowanych złożach

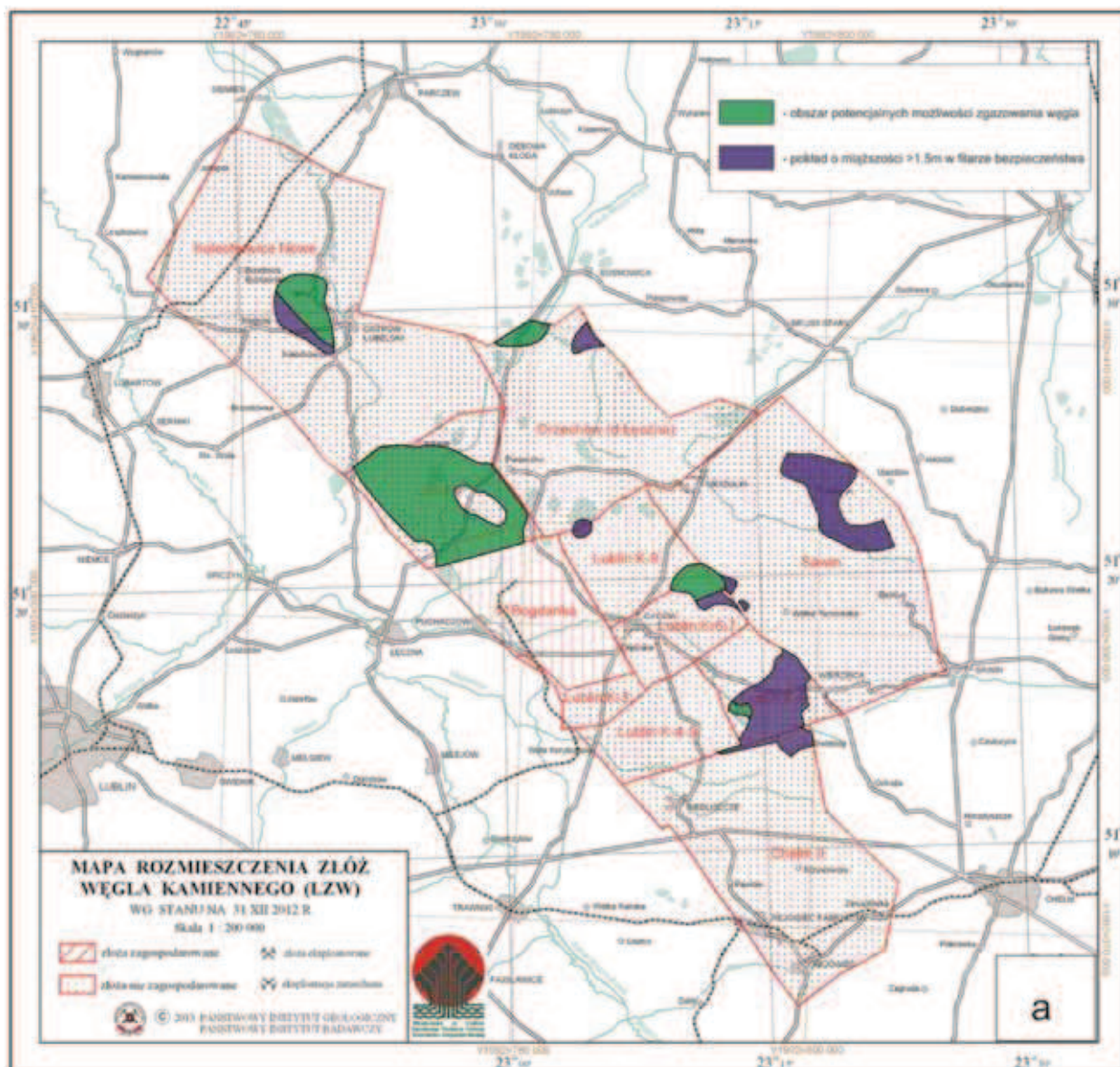
w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym stanowią one 16 %, a w Zagłębiu Lubelskim 10,3 % zasobów bilansowych, to jest odpowiednio 1,197 i 0,878 mld t. W Dolnośląskim Zagłębiu Węglowym brak zasobów spełniających kryteria dla stosowania PZW.

W GZW i LZW części pokładów przydatne do PZW rozrzucone są w pionie i poziomie, nie tworzą zwartych kompleksów (rys. 4, 5). Rozproszenie to powoduje, że w przypadku stosowania PZW znaczna część zasobów w pokładach



Rys. 4. Rozmieszczenie zasobów potencjalnie przydatnych do zgazowania w niezagospodarowanym złożu Studzienice (oprac. A. Wątor)

Fig. 4. Spatial distribution of coal seam resources suitable for the UCG in Studzienice coal deposit (elab. A. Wątor)



Rys. 5. Rozmieszczenie zasobów węgla przydatnych do podziemnego zgazowania w pokładzie 382 w LZW [wg. 31]
 Fig. 5. Areas potentially useful for the UCG in the undeveloped LCB deposits of seam no. 382 [acc. to 31]

o mniejszej miąższości nie będzie mogła być wykorzystana. Stosowanie PZW uniemożliwi racjonalne zagospodarowanie całości zasobów złoża. Zastosowanie PZW za pomocą otworów wierconych z powierzchni, w złożu wielopokładowym spowoduje niewielkie wykorzystanie zasobów. W złożu udostępnionym wyrobiskami górniczymi, może znacznie utrudnić wykorzystanie zasobów nie przydatnych do PZW konwencjonalnymi metodami górniczymi z powodu konieczności pozostawiania filarów ochronnych w otoczeniu partii złoża eksploatowanych metodą ogniwą.

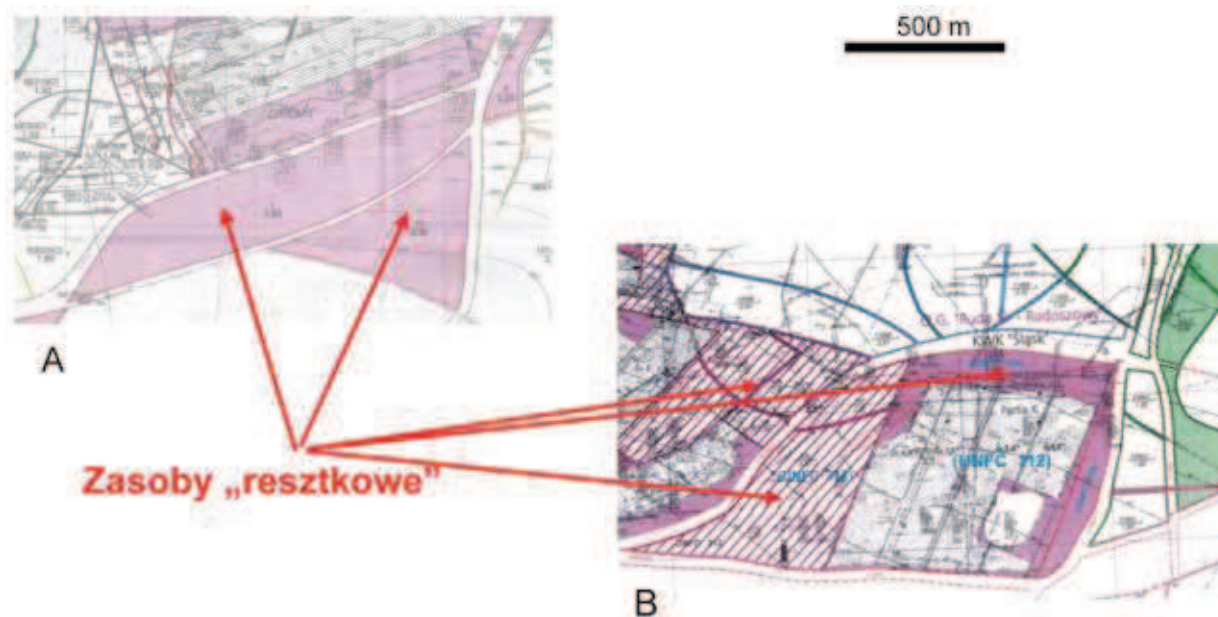
PZW nie zapewnia racjonalnego wykorzystania zasobów węgla w złożach wielopokładowych i z tego względu nie powinno być stosowane. Nie wyklucza to możliwości eksploatacji węgla metodą zgazowania podziemnego w tych przypadkach, gdy nie naruszy to możliwości racjonalnego wykorzystania pozostałych zasobów.

Sugerowana była także i wiązano z tym duże nadzieje, możliwość podziemnego zgazowania węgla pozostawionego w likwidowanych kopalniach w resztkach niewybranych pokładów o dużej miąższości. Są to znaczne zasoby wynoszące w GZW około 3,1 mld t [26], formalnie skreślone z bilansu

zasobów. Występują one jednak w odosobnionych, rozproszonych, nie wielkich fragmentach. Ponadto znajdują się one w górotworze naruszonym przez eksploatację. Pozostają one często w kontakcie hydraulicznym z sąsiadującymi czynnymi kopalniami co stwarza zagrożenie rozplywem produktów zgazowania [29].

W złożach zagospodarowanych, nie przewidziane do eksploatacji fragmenty pokładów, których zasoby kwalifikowane są jako nieprzemysłowe są zwykle małe, oddzielone od reszty pokładu albo dużymi uskokami (rys 6), albo są silnie tektonicznie zaburzone (co jest powodem niekwalifikowania ich zasobów jako przemysłowych). Przeciętnie zasoby takich fragmentów wynoszą 0,03 – 1,48 mln t (średnio 0,6 mln t) rzadko wynoszą ponad 3 mln t (ok. 5%) i tylko wyjątkowo dochodzą do 5 mln t. [37, 7].

W złożach, których eksploatacja została zaniechana przydatne do zgazowania może być tylko około 7% pozostawionych zasobów to jest 0,086 mld t. Warunki występowania „resztek” pokładów, w otoczeniu starych zrobów, często silnie ich zuskokowanie (rys. 7) w zasadzie wykluczają możliwość ich eksploatacji metodą podziemnego zgazowania.

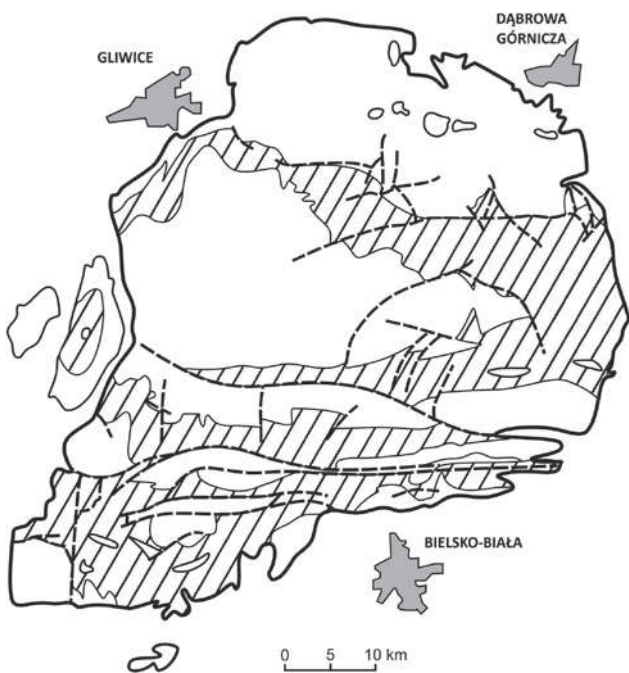


Rys. 6. Typowe warunki występowania zasobów resztkowych

A – zasoby tracone w parcelach oddzielonych uskokami, B – zasoby tracone w otoczeniu pól ścianowych i strefach zuskokowanych

Fig. 6. Natural conditions for remaining resources occurrence

A – resources in fault-separated blocks, B – resources surrounding longwall panels and faulted zones



Rys. 7. Obszar występowania pokładu 510 w GZW na głębokości 1000 ÷ 1500 m (zaszrafowany)

Fig. 7. Area (dashed) of occurrence of the seam no. 510 at the depth of 1000 ÷ 1500 m in the Upper Silesian Coal Basin

6. Możliwości stosowania PZW za pomocą otworów wiertonych z wyrobisk górniczych (metodą „hybrydową”)

Duże nadzieje wiąże się z możliwością stosowania metody górniczo-wiertniczej (hybrydowej) do eksploatacji węgla metodą podziemnego zgazowania [8]. Stanowi ona propozycję oryginalnego nowatorskiego podejścia do eksploatacji złóż

węgla kamiennego sposobem podziemnego zgazowania. Myślą przewodnią jest możliwość jej stosowania do eksploatacji głęboko położonych pokładów węgla, znajdujących się w szczególności na głębokości poniżej 1000 m, które mogą być niedostępne dla eksploatacji tradycyjną metodą podziemną, „szybową” (z powodu zagrożeń naturalnych lub przyczyn ekonomicznych).

Zasadnicze znaczenie na głębokości ponad 1000 m mają zasoby w pokładach grubych o miąższości ponad 1,5 m. W pokładach takich znajduje się w GZW około 60 % zasobów. Występują one przede wszystkim w górnoląskiej serii piaskowcowej w warstwach ruźkich i siodłowych, przede wszystkim na obrzeżeniu niecki głównej i w południowej części GZW. Na uwagę zasługują w szczególności bardzo grube pokłady, wstępujące na dużym obszarze, np. 405 i 510 (rys. 7). W przeważającej ilości poniżej 1000 m występują węgle koksowe (typ 34-35) stanowiące 88 % zasobów prognostycznych. Wyjaśnienie możliwości ich zgazowania w złożu (*in situ*) ma istotne znaczenie dla prognoz powodzenia stosowania „hybrydowej” metody PZW (tabl. 4).

Tablica 4. Szanse i trudności stosowania metody hybrydowej ilustruje uproszczona analiza SWOT

<p>S – Mocne strony: Duże zasoby w GZW w pokładach o miąższości ponad 1,5 m, nienaruszone przez wcześniejszą z eksploatację;</p>	<p>W – Słabe strony Niski stopień rozpoznania złoża; Trudność wykonania otworów wiertniczych o dużej głębokości z wyrobisk górniczych; Niewyjaśniona możliwość zgazowania węgla typu 34-35; Konieczność utrzymania wyżej położonych wyrobisk udostępniających i odwadniania górotworu</p>
<p>O – Szanse Udostępnienie złoża na wyższych poziomach wyrobiskami górniczymi;</p>	<p>T – Zagrożenia Wysoka metanonośność pokładów; Możliwość dalekiej migracji toksycznych produktów gazowych;</p>

7. Wnioski

Analiza warunków geologicznych polskich zagłębi węglowych (GZW, LZW i DZW) wykazała, że stwarzają one ograniczenia, a niekiedy barierę dla bezpiecznego stosowania PZW.

Przy obecnym stanie wiedzy, z punktu widzenia racjonalnego wykorzystania zasobów, wielopokładowych złóż węgla kamiennego, które można eksploatować w sposób tradycyjny, stosowanie metody podziemnego zgazowania nie jest wskazane ze względu na:

- ograniczone wykorzystanie zasobów,
- stwarzane zagrożenia przez migrację toksycznych produktów zgazowania, PZW może być stosowne tylko w szczególnych przypadkach.

W złożach węgla brunatnego zasadniczą barierę dla stosowania podziemnego zgazowania jest duża wilgotność naturalna węgla.

Zagadnieniami kluczowymi dla wyjaśnienia możliwości szerszego zastosowania PZW jest wyjaśnienie:

- zasięgu i dróg migracji toksycznych gazów w górotworze,
- możliwości zgazowania „in situ” węgla koksowych typu 34-35 i wyższych,
- możliwości zgazowania w złożu węgla brunatnego o dużej wilgotności.

Praca została wykonana w ramach Zadania Badawczego nr 3 pt. „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”.

Literatura

1. *Arens V. Ž.*: Skvazinnaja dobytca poleznych iskopajemych. Nedra. Moskva 1986
2. *Bartke T. C., Gunn R. D.*: The Hanna, Wyoming underground coal gasification field test series. In: Underground gasification: the state of the art. AIChE Symp. Ser. V. 79, Nr 226, 1983, p. 4÷14
3. *Bednarczyk J.*: Rozwój technologii podziemnego zgazowania węgla i perspektywy jej przemysłowego wdrożenia. *Górn. i Geoinż.* r. 31, z. 3, 2007
4. *Bialecka B.*: Estimation of coal resources for UCG in the Upper Silesian Coal Basin, Poland. *Nat. Resources Research.* V.17, nr 1, 2008a p. 21÷28
5. *Bialecka B.*: Podziemne zgazowanie węgla. Podstawy procesu decyzyjnego. Prace GIG, Katowice 2008b
6. *Bialecka B.*: An assessment of prospective reserves for underground coal gasification in Poland. In: Deep mining challenges. International Mining Forum 2009. CRC Press/Balcema. London et al. 2009 p. 157÷168
7. *Cebula C., Słota M., Wrana A.*: Inwentaryzacja resztek pokładów węgla, oraz analiza mechanizmów ich powstawania na przykładzie kopalni „Piekary”. *Wiad. Górnicze*, nr 2, 2012 s. 74÷79
8. *Czaja P., Klich J., Tajduś A.*: Metoda pozyskiwania pierwotnych nośników energii ze złóż węgla kamiennego na drodze odmetanowania i zgazowania in situ. *Polityka Energetyczna* t. 16, z. 3, 2013a, s. 83÷98
9. *Czaja P., Kwaśniewski K., Polak K., Rózkowski K.*: Podziemne zgazowanie węgla (PZW) – instalacja badawcza Chinchilla w Australii. *Przeł. Górn.* nr 2, 2013b, s. 131÷138
10. *Drzewiecki J.*: Kryteria technologiczne i środowiskowe podziemnego zgazowania węgla. Opracowane technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej. *Mat. Arch. GIG*, Katowice 2011
11. *Dubiński J., Rogut J., Czaplicka K., Tokarz A.*: Coal mine of 21st: In situ producer of energy, fuels and chemicals. In: New technological solutions in underground mining. International Mining Forum 2006. Taylor&Francis. London, 2008, p.1÷13
12. *Fyodorov N. A., Kreinin E. V., Zvygiantsev K. N.*: Underground coal gasification and its application in world practice. In: Energy resources of the world. 27th nt. Geol. Congress. Coll 02 Reports vol. 2, 1984, p.121 – 133. P.O.Nauka. Moscow
13. *Green M.*: Underground coal gasification, state of the art. *Clean Coal Conf.* Bedewo, Poland 2008
14. *Hajdo S., Klich J., Ptak K.*: Uwarunkowania podziemnego zgazowania węgla – 100 lat rozwoju metody. *Górn. i Geoinż.* R. 34, z. 4, 2010 s. 225÷235
15. *Hajdo S., Herbich P.*: Uwarunkowania technologiczno-złożowe i środowiskowe kwalifikacji złóż węgla brunatnego do podziemnego zgazowania. *Przeł. Górn.* Nr 2, 2013, s. 148÷158.
16. *Hyder Z.*: Site characterization, sustainability evaluation and life cycle emissions assessment of underground coal gasification. Blacksburg, Virginia 2012
17. *Kasztelawicz Z., Ptak K., Zajczkowski M.*: Szanse i zagrożenia podziemnego zgazowania węgla. *Przeł. Górn.* Nr 1-2, 2009, s. 8÷11
18. *Kidybiński A., Siemek J.*, red. Podziemne magazyny gazu w zaniechanych kopalniach węgla. GIG, Katowice 2006
19. *Kler W.R.*: Izuczenije i geologo-ekonomiczkaja ocenka kaczestwa uglej pri geologorazwiedocznych rabotach. Nedra. Moskva 1975
20. *Kowol K.*: Szanse i perspektywy podziemnego zgazowania węgla. Szkoła Ekspl. Podziemnej. Symp. i Konf. IGSMiE PAN, 1997
21. *Kozłowski B., Grębski Z.*: Odmetanowanie górotworu w kopalniach. Wyd. Śląsk, Katowice 1982
22. *Magda R.*: Ekonomiczne aspekty podziemnego zgazowania węgla – na przykładzie złoża Seelyville w stanie Indiana. *Polit. Energet.* T. 15, z. 1, 2012, s. 21÷34
23. *Magda R., Franik T., Woźny T., Zalucki J.*: Próba oszacowania kosztów procesu podziemnego zgazowania węgla kamiennego *Polit. Energet.* t. 15, z. 2, 2012, s. 71÷85
24. *Nieć M.*: Uwarunkowania geologiczne eksploatacji otworowej złóż kopalin stałych i podziemnego zgazowania węgla. Szkoła Ekspl. Podziemnej. Symp. i Konf. IGSMiE PAN nr 74, 2009, s. 73÷84
25. *Nieć M.*: Geologiczne bariery i ograniczenia dla podziemnego zgazowania węgla. *Biul PIG* 448, 2012, s. 183÷194
26. *Nieć M., Młynarczyk M.*: (w druku) – Gospodarowanie zasobami węgla kamiennego w Polsce.
27. *Orlov G. V., Katajev A. B.*: Opredielenije treszczinowatosti ugolnogo plastu pri podziemnoj gazifikacji uglej. *Geologija, metody poiskov i razwiedki mioestorozdienij twirodych gorjuczich iskopajemych.* Ekspres. Inform. Min. Geol. SSSR, wyp.9, Moskva 1988
28. *Palarski J., Wirth H., Karaś H.*: Koncepcja eksploatacji złóż węgla brunatnego z zastosowaniem technologii zgazowania termicznego. Szkoła Ekspl. Podziemnej. Symp. i Konf. IGSMiE PAN nr 74, 2009, s. 41÷53
29. *Palarski J., Stozik G., Jendrus R.*: Wpływ deformacji górotworu na warunki ochrony powierzchni oraz zasobów użytkowych wód podziemnych przy podziemnym zgazowaniu węgla. *Mat. Konf. XII dni miernictwa górniczego i ochrony terenów górniczych.* Brenna, 2013, s. 406÷417
30. *Salamon K., Kobiesz J.*: Wybrane aspekty zagrożeń związanych z próbami podziemnego zgazowania węgla. *Przeł. Górn.* nr 12, 2013, s. 23÷31
31. *Sermet E., Górecki J.*: Ocena potencjału zasobowego złóż Lubelskiego Zagłębia Węglowego do podziemnego zgazowania węgla. *Górn. Odkrywk.* r. 55, nr 2-3, 2014, s. 80÷84
32. *Sobolewski A., Chmielniak T., Topolnicka T., Giesa N.*: Dobór węgla do zgazowania w ciśnieniowym reaktorze fluidalnym. *Karbo*, r. 58, nr 1, 2013, s. 28÷38
33. *Stańczyk K.*: Czyste technologie użytkowania węgla, Wyd. GIG, Katowice 2008
34. *Szłazak N.*: Uwarunkowania wentylacyjne i zabezpieczenia pożarowe w procesie podziemnego zgazowania węgla w gazogeneratorze wykonanym w podziemnych wyrobiskach kopalni. Raport końcowy, AGH, Kraków. Nie pub. 2013

35. *Szufflicki M., Malon A., Tymiński M.*: Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg. stanu na 31.XII.2012 r. PIG- PIB, Warszawa 2011
36. Underground gasification: the state of the art. AICHE Symp. Ser. V. 79, nr 226, 1983
37. *Turek M., Lubosik Z.*: Identyfikacja resztkowych parcel pokładów węgla kamiennego. Wiad. Górnicze, nr 3, 2008, s. 182÷189
38. *Wolkowicz S., Smakowski T., Speczik S.*: red. Bilans perspektywicznych zasobów kopalin Polski. PIG-PIB, Warszawa 2011
39. *Wong F.T., Mead S.W.*: Water quality monitoring at the Hoe Creek test site: review and preliminary conclusions. Underground gasification: the state of the art. AICHE Symp. Ser. V. 79, nr 226, 1983 s. 154÷173

