

Obecny stan i kierunki rozwoju technologii podziemnego zgazowania węgla w świecie

Current status and development trends of underground coal gasification technology in a global context



Prof. dr hab. inż. Józef Dubiński*)



Dr inż. Aleksandra Koteras*)

Treść: Podziemne zgazowanie węgla (PZW) jest to technologia zgazowania pokładów węgla *in-situ*, czyli bezpośrednio w miejscu ich zalegania. Koncepcja PZW jest bardzo podobna do technologii zgazowania węgla na powierzchni, gdzie gaz syntezowy, będący produktem zgazowania, jest wytwarzany w skutek tych samych reakcji chemicznych. Prowadzone w świecie i w kraju badania nad PZW wykazały jednak, że pełna kontrola przebiegu procesu zgazowania jest trudna w realizacji. W artykule przedstawione zostały informacje dotyczące obecnego stanu, realizacji projektów i kierunki rozwoju technologii PZW w ujęciu światowym. Opisane zostały również wyzwania dla komercyjnego stosowania technologii PZW na podstawie dotychczasowych osiągnięć.

Abstract: Underground coal gasification (UCG) is a gasification process applied to in situ coal seams. The concept of UCG is very similar to surface gasification when syngas is produced through the same chemical reactions. However, studies of UCG have shown that the development of a controllable process is difficult. This paper reviews the status, key concepts and trends in the UCG technology development around the world, discusses the challenges it faces, and summarizes the international approach and technical advances made in the UCG technology.

Słowa kluczowe:

podziemne zgazowanie węgla, zgazowanie węgla *in-situ*, czysta energia, technologie przetwórstwa węgla

Key words:

underground coal gasification (UCG), in situ coal gasification, clean energy, coal processing technologies

1. Wprowadzenie

Zgodnie z danymi Międzynarodowej Agencji Energetycznej węgiel pokrywa obecnie 40 % światowego zapotrzebowania na energię elektryczną. Jest on jednocześnie źródłem energii pierwotnej, na które zapotrzebowanie rosło najszybciej w ostatnich latach. Głównym tego powodem był niewątpliwie silny wzrost gospodarczy w dynamicznie rozwijających się krajach świata, których gospodarka opiera się na węglu, takich jak: Chiny, Indie i inne. Węgiel jest bowiem najtańszym źródłem energii, a jego bogate zasoby mogłyby zaspokoić światowe zapotrzebowanie na ten surowiec jeszcze przez 150 lat [8]. Już w XXI wieku globalne zużycie węgla wzrosło z 4762 mln ton w 2000 r. do 7697 mln ton w 2012 r., co stanowi 60% wzrost, czyli średni wzrost o 4% rocznie. W okresie od 2005 r. do 2012 r., tylko same Chiny instalowały każdego dnia ponad 150 MW mocy wytwórczych opartych na węglu [8].

Dużym wyzwaniem dla paliw kopalnych, a szczególnie dla węgla, są rosnące wymagania wobec ochrony środowiska przyrodniczego, a w szczególności ochrony klimatu. Biorąc pod uwagę światowe tendencje w wykorzystaniu paliwa węglowego oraz analizując prognozy w tym zakresie, które wyraźnie wskazują na dominującą rolę węgla w najbliższych dziesięcioleciach, kluczowym staje się opracowanie technologii czystszej i bardziej efektywnego wykorzystania zarówno samego węgla jak i jego zasobów. Spalanie węgla stanowi bowiem o 29,5 % emisji gazów cieplarnianych na świecie [8]. Modernizacja istniejących elektrowni węglowych, budowa nowych bloków o wysokiej sprawności energetycznej, to wyzwania dla współczesnego przemysłu elektroenergetycznego. Nadal jednak kluczowym wyzwaniem dla środowisk nauki i przemysłu, pozostaje opracowanie nowych technologii wykorzystania węgla i ich komercjalizacja. Jednym z kierunków w tym zakresie są czyste technologie węglowe, a w tym technologia podziemnego zgazowania węgla (PZW).

*) Główny Instytut Górnictwa w Katowicach

2. Charakterystyka technologii podziemnego zgazowania węgla

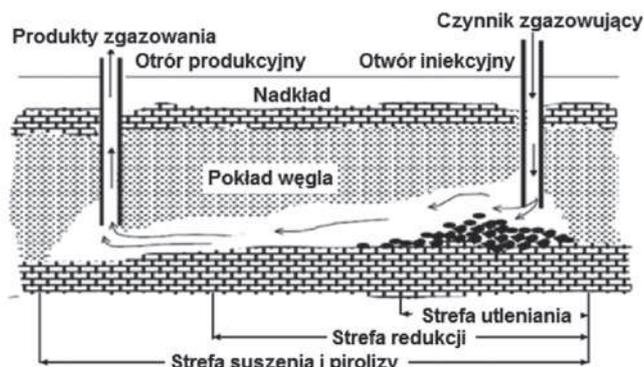
Węgiel od wielu już lat jest podstawowym nośnikiem energii wykorzystywanym w elektrowniach dla produkcji prądu elektrycznego, a w ciepłowniach dla produkcji ciepła. Przy takim zastosowaniu węgla podstawowym procesem jego konwersji na inną formę energii jest jego spalanie. Należy jednak pamiętać, że węgiel posiada znacznie szersze możliwości jego wykorzystania, w tym także w złożonych procesach chemicznych. Schemat wyróżniający podstawowe procesy bazujące na paliwie węglowym i powstające w ich wyniku produkty przedstawia rysunek 1 [11].

Jak widać, jednym z podstawowych procesów wykorzystania węgla jest jego zgazowanie, w wyniku którego uzyskiwane są takie produkty, jak: gaz syntezowy i opałowy czy też substytut gazu ziemnego.

Podziemne zgazowanie węgla (PZW) tym różni się od zgazowania w powierzchniowych reaktorach zgazowania, że proces zgazowania ma miejsce bezpośrednio w złożu, a więc w pokładzie węgla zalegającym pod ziemią. Proces ten jest metodą bezpośredniej konwersji węgla do gazu syntezowego bez konieczności wydobycia węgla klasycznymi technikami górniczymi. Technologia PZW polega na tym, że węgiel znajdujący się w polu podziemnego georeaktora jest poddawany działaniu takich mediów zgazowujących, jak powietrze, tlen, para wodna czy też ich mieszanina, w wyniku czego dochodzi do silnej reakcji endotermicznej, a więc wymagającej wysokiej temperatury, podczas której powstaje mieszanina składająca się głównie z takich gazów jak: H_2 , CO , CO_2 oraz CH_4 . Procentowy udział poszczególnych składników w otrzymanym produkcie gazowym zależy, między innymi, od warunków termodynamicznych, w jakich prowadzony jest sam proces zgazowania oraz od zastosowanych czynników zgazowujących. W praktyce podziemne zgazowanie węgla jest procesem dużo trudniejszym i bardziej skomplikowanym niż mogłoby się to wydawać, stąd ciągle jeszcze wymaga prac badawczych i większej liczby eksperymentów w skali demonstracyjnej, zanim stanie się w pełni komercyjną i dostępną technologią.

Proces PZW rozpoczyna się od zapalenia pokładu węgla na początku otworu generatorowego. Po wytworzeniu się przódka ogniowego następuje kolejny, ważny etap procesu jakim jest doprowadzenie w to miejsce czynnika zgazowującego, co powoduje rozpoczęcie procesu zgazowania.

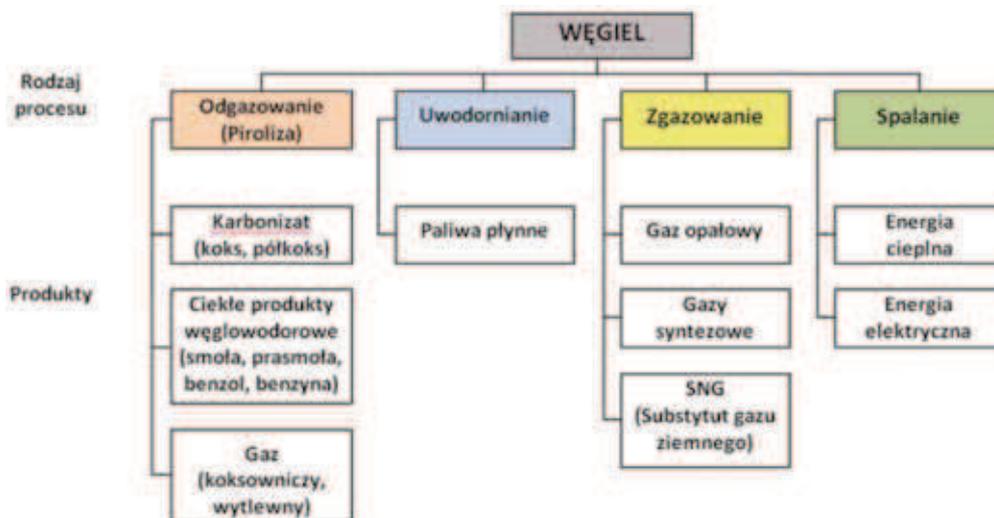
W miarę jego rozwoju, wysokotemperaturowy front zgazowania przemieszcza się stopniowo wzdłuż otworu spełniającego rolę kanału odprowadzającego gazowe produkty zgazowania [10]. Właśnie taki model rozwoju procesu podziemnego zgazowania pokładu węgla przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Koncepcja podziemnego zgazowania węgla oraz strefy reakcji w kanale zgazowania [14]

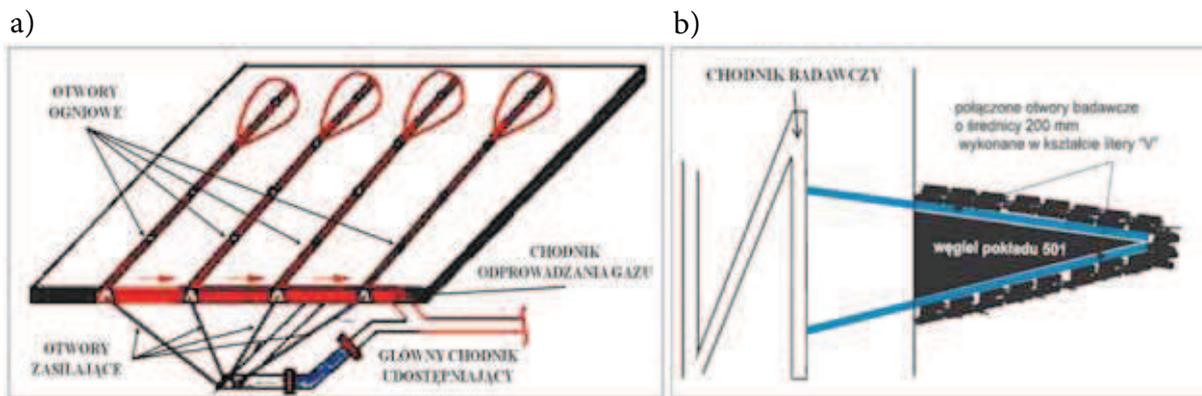
Fig. 2. Conception of in situ underground coal gasification process and coal gasification reaction zones [14]

Technologia podziemnego zgazowania węgla wyróżnia jego dwa podstawowe warianty, różniące się sposobem udostępnienia pokładu węgla przeznaczonego do zgazowania, określane mianem metody szybowej i bezszybowej. Metoda szybowa, jak wskazuje sama jej nazwa, polega na udostępnieniu pokładu węgla szybem. Georeaktor stanowi tutaj wydzielony fragment pokładu, do którego poprzez otwory wiertnicze podawane są media zgazowujące i odbierane produkty zgazowania. Zarówno jedne, jak i drugie są transportowane na powierzchnię odpowiednimi rurociągami zainstalowanymi w wyrobiskach dołowych i szybie. Natomiast, w metodzie bezszybowej, w celu zgazowania pokładu węgla udostępnienie georeaktora polega na wykonaniu z powierzchni otworów wiertniczych stanowiących odpowiednio kanały zasilające i produkcyjne, które są połączone kanałem łączącym wykonanym w zgazowywanym pokładzie węgla. Ten wariant technologii PZW jest obecnie szerzej rozwijany, głównie ze względu na mający miejsce w ostatnich latach wyraźny postęp w wierzeniach kierunkowych. Schematy ideowe metod PZW przedstawiono na rysunkach 3 i 4.



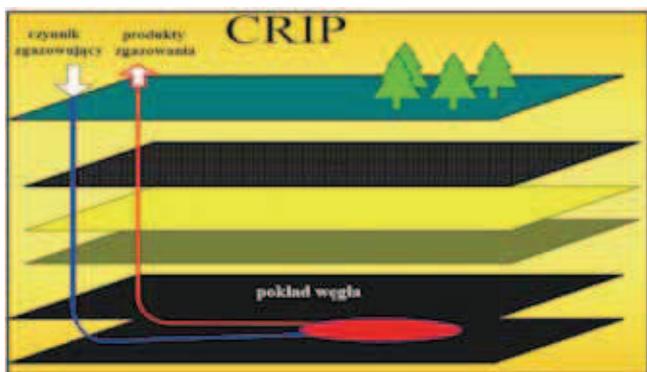
Rys. 1. Podstawowe procesy i produkty wykorzystania węgla [11]

Fig. 1. Basic processes and products of coal utilization [11]



Rys. 3. Metoda szybowa na przykładzie metody ślepych otworów – a, oraz schematu zastosowanego dla potrzeb zgazowania pokładu 501 w KWK Wieczorek – b [17]

Fig. 3. Example of shaft method - blind holes method – a, and the scheme used for the gasification of seam no. 501 in Wieczorek coal mine – b [17]



Rys. 4. Metoda bezszybowa PZW na przykładzie metody CRIP [20]

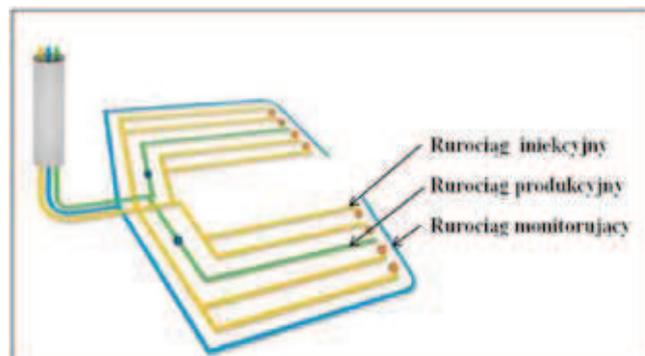
Fig. 4. Shaftless method of UCG based on CRIP method [20]

Analizując możliwości podziemnego zgazowania węgla przy wykorzystaniu bezszybowego – otworowego wariantu udostępnienia złoża do zgazowania należy zwrócić uwagę na wiodące obecnie i szeroko rozwijane technologie zgazowania. Należy do nich bez wątpienia technologia CRIP (ang. *Controlled Reacting Ignition Point*) opracowana w USA w latach 1980÷1990 przez Lawrence Livermore National Laboratory, która wykorzystuje metodę wierceń kierunkowych i umożliwia zasilanie generatora PZW czynnikiem zgazowującym w ściśle określonym punkcie pokładu, za pomocą giętkiego przewodu stalowego. W miarę jak spadają parametry otrzymywanego gazu, punkt zasilania jest przesuwany, co umożliwi dalsze zgazowanie pokładu [22].

Nieco inną technologią jest opracowana, na bazie doświadczeń radzieckich przez firmę Ergo Exergy, technologia ϵ UCG (ang. *ϵ Underground Coal Gasification*), z sukcesem zastosowana w projekcie podziemnego zgazowania węgla w Chinchilla. Metoda ta szeroko wykorzystuje wiele nowoczesnych metod wiertniczych, w tym precyzyjnych otworów kierunkowych, jak i konwencjonalnych otworów pionowych i pochyłych, przy jednoczesnym zastosowaniu różnych mediów zgazowujących, dobieranych optymalnie do warunków prowadzonego procesu [21]. Najprościej mówiąc, w technologii ϵ UCG udostępnianie pokładu węgla wykonywane jest poprzez wywiercenie dwóch otworów pionowych, z których jeden jest otworem zasilającym, a drugi produkcyjnym. Otwory te łączy się otworem kierunkowym, usytuowanym w zgazowywanym pokładzie węgla.

Nową technologią jest technologia SWIFT (ang. *Single Well Integrated Flow Tubing*), która opracowana została przez

Portman Energy w 2012 roku i opatentowana w 2013 roku. Technologia ta wykorzystuje jeden pionowy otwór zarówno do iniekcji mediów zgazowujących, jak i dla odbioru produktów zgazowania. Technologia ta polega na zastosowaniu pojedynczej osłony do umieszczonych wewnątrz rurociągów. Przestrzeń zostaje wypełniona gazem obojętnym, co umożliwia monitorowanie ewentualnych wycieków oraz zapobiegania korozji i transmisji ciepła [22] Ogólny schemat tej technologii przedstawiony został na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat technologii SWIFT, na podstawie: [16]

Fig. 5. Scheme of SWIFT technology (Single Well Integrated Flow Tubing), based on: [16]

3. Światowe doświadczenia w zakresie technologii PZW

Jeśli ograniczymy się do procesu pozyskiwania gazu z węgla to należy zauważyć, że sama idea tego procesu zrodziła się ponad 200 lat temu, i była szeroko wykorzystywana zarówno w Europie jak i Ameryce [3]. Lata 60-te XIX wieku to już intensywny rozwój technologii pozwalających wykorzystać gaz z węgla. W 1883 roku przez angielskiego przemysłowca i chemika Ludwiga Monda została opracowana metoda zgazowania węgla powietrzem [19]. W zdecydowanie późniejszych latach, podczas II wojny światowej, proces zgazowania był szeroko stosowany do konwersji węgla przy zastosowaniu syntezy Fischera-Tropscha. W kolejnych latach proces gazyfikacji węgla wykorzystywano w celu jego konwersji w wodór, a następnie do produkcji amoniaku i nawozów, czy też w innych gałęziach przemysłu chemicznego. Skala możliwych zastosowań produktów procesu zgazowania węgla jest szeroka. Gaz syntezowy o wysokiej zawartości H_2 i CO

jest cennym surowcem przemysłu chemicznego dla różnych rodzajów i typów syntez chemicznych. Przemysł energetyczny wykorzystuje proces zgazowania węgla stosunkowo od niedawna, głównie za sprawą wprowadzenia technologii ze zastosowaniem bloku gazowo-parowego zintegrowanym ze zgazowaniem paliwa węglowego (ang. *Integrated Gasification Combined Cycle* (IGCC)) [3].

Powracając do technologii podziemnego zgazowania węgla należy podkreślić, że pierwsze koncepcje przeprowadzenia zgazowania węgla w warunkach złożowych zostały przedstawione już w 1868 roku przez Carla Wilhelma Siemens, który przed Chemical Society of London sugerował taką możliwość. Idea ta została rozwinięta kilka dekad później, między innymi, przez słynnego uczonego, rosyjskiego chemika Dimitri Mendelejewa. Pierwsze lata XX wieku to, między innymi, opatentowanie zgazowania węgla jako metody wykorzystania jego niewydobywalnych zasobów przez Anasona Bettsa w latach 1909÷1910 oraz pierwsze plany przeprowadzenia eksperymentu podziemnego zgazowania w kopalni w Wielkiej Brytanii [2, 3], który jednak z powodu wybuchu I wojny światowej nie doszedł do skutku. Koniec lat 20. ubiegłego wieku i lata późniejsze to intensywne prace nad technologią podziemnego zgazowania węgla w dawnym ZSRR, gdzie eksperymenty były prowadzone, między innymi, w basenie Podmoskiewskim (1933) i Donieckim, gdzie w 1935 roku powstała również pierwsza instalacja pilotowa. W latach 50. XX wieku w ZSRR działało już pięć instalacji przemysłowych. Obecnie pracują tylko dwie: Južno-Abinskaja na Syberii i Angren w Uzbekistanie, gdzie roczna produkcja gazu osiąga 1,5 mld m³. W latach 40. i 50. XX wieku technologię PZW zaczęto rozwijać w USA, przy czym szczególnie intensywne prace były prowadzone w latach 1973÷1989 w Lawrence Livermore National Laboratory, gdzie wykonano testy i próby w kilku zagłębieniach węglowych. W drugiej połowie XX wieku badania nad technologią PZW oraz praktyczne próby jej zastosowania miały miejsce również w wielu innych krajach świata, a mianowicie: Belgii, Maroko, Wielkiej Brytanii, Francji, Hiszpanii, Nowej Zelandii, Australii, Indiach, RPA i Polsce. Powstała nawet w 1988 roku Europejska Grupa Robocza ds. PZW.

W Polsce do badań nad technologią podziemnego zgazowania węgla przystąpiono już w latach końca lat 40-tych ubiegłego wieku. W 1948 roku polscy inżynierowie, na zasa-

dach partnerskich, zostali włączeni do badań nad PZW prowadzonych w Belgii. Dalsze badania w latach 50-tych i dalszych były kontynuowane w ówczesnym Zakładzie Górniczym Głównego Instytutu Górnictwa, gdzie dla ich prowadzenia utworzono specjalny Dział Zgazowania Podziemnego [6].

Obecnie technologia podziemnego zgazowania węgla i jej dalszy rozwój jest obiektem zainteresowania wielu węglowych gospodarek świata i pracujących dla nich instytucji naukowo-badawczych. Wśród krajów zainteresowanych tą technologią należy wymienić głównie Australię, ale także Nową Zelandię, RPA, Chiny, USA, Polskę, kraje Europy Wschodniej, Indie, Indonezję, Wietnam, Pakistan i Wielką Brytanię, która niedawno wydała wiele pozwoleń także na wykorzystanie technologii PZW poza lądem [20]. Miejsca przeprowadzonych prób podziemnego zgazowania węgla na świecie i zrealizowane w tym zakresie projekty przedstawione zostały na rysunku 6. Osiągnięcia w zakresie technologii PZW zostaną przedstawione w kolejnym rozdziale na przykładzie doświadczeń wybranych krajów.

3.1. Chińska Republika Ludowa

Chiny mogą pochwalić się długą historią badań i prac nad rozwojem technologii PZW, a także prowadzonymi w tym zakresie projektami pilotowymi. Międzynarodowa organizacja UCG Association szacuje, że na terenie Chin zlokalizowanych jest Obecnie około 30 projektów PZW, znajdujących się w różnych fazach przygotowań. Chińskie źródła literaturowe podają natomiast, że obecnie na terenie Chin działać może nawet ponad 50 instalacji PZW [4]. Chińskie doświadczenia w zakresie PZW, poza opisanymi już wcześniej próbami, koncentrują się głównie wokół stworzonego w 1980 roku, na zasadzie konsorcjum naukowo-przemysłowego, Programu Podziemnego Zgazowania Węgla. Wśród wiodących jednostek naukowo-badawczych znalazły się, między innymi: China University of Mining and Technology w Pekinie (UCG Engineering Research Center of Coal Industry), China University of Mining and Technology w Xuzhou (Underground Coal Gasification and Clean Coal Energy Research Institute).

Do głównych projektów PZW należy zaliczyć instalację należącą do Xinwen Coalmines Group w Lai-wu w prowincji Shandong oraz instalację w kopalni węgla brunatnego



Rys. 6. Światowe próby PZW, na podstawie: [2]

Fig. 6. UCG Projects Worldwide, based on: [2]

Gonygon w Wulanchabu położonej w Północnej części Mongolii Wewnętrznej.

Pierwsza z tych instalacji działa od 1998 roku. Dzienna produkcja gazu ze zagazowania węgla wynosi 50 000 m³. Otrzymany gaz zostaje oczyszczony i następnie wykorzystywany do celów gospodarczych. Zagazowanie jest prowadzone w pokładzie węgla o grubości do 2 m, zalegającym na głębokości 300 m. Teren nad goereaktorem jest obszarem zabudowanym. Proces zagazowania jest prowadzony głównie przez dostarczanie powietrza, okresowo z dodatkiem tlenu, poprzez 2 otwory iniekcyjne zlokalizowane w odległości 300 m od siebie. Otwór produkcyjny znajduje się pomiędzy otworami iniekcyjnymi. Przybliżony skład chemiczny gazu otrzymywanego w procesie zagazowania to: H₂ – 43 %; N₂ – 12 %; CO – 10 %; CH₄ – 14 %; CO₂ – 21 %. Wartość opałowa gazu nie przekracza 10 MJ/m³ [4].

Xinwen Coalmines Group w prowincji Shandong posiada 5 instalacji do podziemnego zagazowania węgla, które dostarczają gaz do 25 000 gospodarstw domowych w okolicy kopalń. W kopalniach Suncun i E³zhuang gaz jest wykorzystywany do wytwarzania energii elektrycznej przy użyciu 4 jednostek wytwórczych o mocy znamionowej 400 kW na jednostkę [4].

Z kolei instalacja w kopalni węgla brunatnego Gonygon w Wulanchabu bazuje na gazyfikacji pokładu węgla o miąższości 12÷20 m, położonego na głębokości około 200 m. Proces zagazowania odbywa się przez otwory wywiercone z powierzchni, które są zlokalizowane w odległościach od 12 do 20 m. Ilość otrzymanego gazu oscyluje w granicach 150 000 m³/dobę, a jego kaloryczność to 5 MJ/m³. Obecnie prowadzone są prace mające na celu osiągnięcie wielkości produkcji gazu około 1 mln m³/dobę. Gaz uzyskany z gazyfikacji jest używany głównie do produkcji energii elektrycznej w silnikach gazowych. System produkcji jest stale doskonalony poprzez stałe monitorowanie podstawowych parametrów technologicznych procesu zagazowania i oczyszczania gazu.

W ostatnim okresie notuje się w Chinach chęć realizacji wielu nowych projektów. Do jednego z nich należy, między innymi, zatwierdzony przez rząd chiński projekt podziemnego zagazowania węgla w zagłębiu Haoqin, w środkowej Mongolii, która należy do Zhengzhou Coal Industry Group (Zhengmei Group). Projekt ten ma być realizowany wspólnie z firmą Carbon Energy, która na bazie swojej technologii ma stworzyć instalację demonstracyjną. Przedmiotowe zagłębie węglowe obejmuje swym zasięgiem około 184 km², a jego zasoby szacowane są na 3,1 mld ton węgla [5].

3.2. Republika Południowej Afryki

Duże zainteresowanie technologią podziemnego zagazowania węgla obserwowane jest w ostatnim okresie również w RPA. Jednak należy zauważyć, że inicjatywy w zakresie PZW nie są w tym rejonie świata nowością. Pierwsze próby zagazowania były już prowadzone w latach 60. XX wieku przez firmę Sasol. Do sukcesów tej firmy należą pierwsze próby zagazowania węgla do cieczy – CTL (*Coal to Liquid*). Obecnie Sasol i Eskom podejmują próby usprawnienia technologii PZW w celu podniesienia jej efektywności. Pierwsza instalacja PZW – projekt Majuba (rys. 7), ruszyła w RPA w 2007 roku, a jej budowę poprzedził szereg projektów badawczych prowadzonych od 2002 roku, mających na celu weryfikację możliwości wykorzystania PZW do produkcji energii. Pozytywne wyniki tych badań doprowadziły do budowy instalacji pilotażowej, która pozwoliła z początkiem 2007 roku na osiągnięcie wydajności 5000 Nm³/godz. gazu uzyskiwanego w procesie PZW [18]. Obecnie instalacja ta pozwala na produkcję wysokiej jakości gazu syntezowego, który używany jest do wytwarzania energii w istniejącym

bloku 4110 MW. Eskom planuje w tym rejonie budowę do 2020 roku nowego bloku 2100 MW [21].



Rys. 7. Instalacja PZW w elektrowni Majuba w Mpumalanga
Fig. 7. Majuba UCG project at the Majuba power station in Mpumalanga

3.3. Australia

Jednym z najbardziej znanych i rozpoznawalnych w świecie projektów PZW jest instalacja pilotowa w miejscowości Chinchilla, uruchomiona przez australijską firmę Linc Energy, która bazuje na technologii dostarczonej przez Ergo Exergy. W latach 1999÷2002 były tam prowadzone próby podziemnego zagazowania węgla. Instalacja obejmowała 9 otworów iniekcyjnych i produkcyjnych oraz 19 otworów monitorujących i prowadzona była na złożu węgla położonym na średniej głębokości około 140 m. [15]. Prowadzone próby trwały 30 miesięcy, w czasie których zagazowanych zostało około 35 000 ton węgla, osiągając maksymalną produkcję gazu na poziomie 80 000 Nm³/godz. [15]. W kolejnych latach trwały prace nad rozbudową instalacji podziemnego zagazowania węgla wraz z demonstracyjnymi instalacjami do produkcji paliw syntetycznych w technologii Gas-to-Liquids (GTL) o kolejne, dodatkowe trzy moduły. W 2007 roku uruchomiono trzeci z modułów, który pozwolił na produkcję paliw syntetycznych z wykorzystaniem technologii GTL na bazie otrzymanego ze zagazowania węgla gazu syntetycznego. Moduł ten jest już jednak wyeksploatowany. Obecnie działa już moduł 4, który produkuje syngaz. Firma Linc Energy połączyła technologię GTL z uzyskiwanym ze zagazowania węgla gazem. W rezultacie, otrzymany ze zagazowania gaz syntetyczny jest poddawany konwersji chemicznej do ropy syntetycznej metodą syntezy GTL Fischer-Tropsch.

Wśród innych działających w Australii instalacji należy wymienić instalację pilotową Bloodwood Creek firmy Carbon Energy Ltd. Instalacja Bloodwood Creek pozwoliła na udaną produkcję gazu syntezowego już w 2008 roku, wykorzystując przy tym metodę (CRIP). W trwającej 100 dni próbie osiągnięto poziom zagazowania węgla około 150 ton/dziennie. Po tym sukcesie uruchomiono kolejne dwa moduły instalacji oraz wybudowano blok energetyczny o mocy 5 MW [13]. Niewątpliwym sukcesem tego projektu było włączenie w 2012 roku wygenerowanej na bazie syngazu energii elektrycznej do sieci energetycznej [na podstawie danych UCG Association].

3.4. Federacja Rosyjska

Rosja ma duże doświadczenia związane z badaniem i rozwojem technologii podziemnego zagazowania węgla. Jak już wspomniano intensywnie badania i pierwsze próby zagazowania

w skali pilotowej w warunkach naturalnych przeprowadzone zostały na węglu brunatnym (Mosbas) oraz na węglach bitumicznych (Donbas, Kuzbas) w byłym Związku Radzieckim, już w latach 20. i 30. ubiegłego wieku. W latach 1935÷1941 na terenie obecnej Rosji realizowanych było 9 projektów pilotażowych podziemnego zgazowania węgla w zagłębiach Mosbasu, Donbasu i Kuzbasu. Z kolei w latach 1946÷1996 działało 5 instalacji przemysłowych i prowadzono 2 próby pilotowe, wśród których 4 obejmowały zgazowanie węgla brunatnego, a 3 – węgla bitumicznych. Działania te zaskutkowały uzyskaniem 50 mld m³ gazu oraz zgazowaniem 15 mln ton węgla [9]. Po tym okresie ma miejsce w Rosji dominacja gazu ziemnego, co hamuje rozwój technologii PZW i raczej niewiele działa się w tym zakresie. Należy jednak odnotować, że w 2013 roku australijska firma Linc Energy i rosyjska Yakut Minerals podpisały umowę na zbadanie możliwości uruchomienia wspólnego projektu PZW w Autonomicznym Regionie Chukotka. Projekt będzie mógł być realizowany po wybraniu lokalizacji i rozpoznaniu złoża odpowiedniego dla technologii PZW [12].

4. Bariery i wyzwania dla podziemnego zgazowania węgla

Analiza światowych projektów PZW i uzyskanych na tej podstawie doświadczeń pozwala spojrzeć krytycznie na ten proces, z którym wiąże się wiele nadziei w zakresie bardziej efektywnego wykorzystania bogatych zasobów tego surowca, a tym samym sformułować pewne bariery stojące przed technologią PZW oraz wyzwania dla ich pokonania. Technologia podziemnego zgazowania węgla wymaga bowiem nie tylko bardzo dobrego przygotowania technicznego projektu, budowy instalacji czy też samego prowadzenia procesu, ale także wymaga uwzględnienia wszystkich czynników środowiskowych mogących mieć wpływ na sam przebieg procesu, jak również jego wpływ na różne elementy środowiska. Pierwszym i kluczowym czynnikiem warunkującym prawidłowy przebieg procesu i jego bezpieczeństwo są warunki geologiczne wybranej lokalizacji georeaktora i jego otoczenia. Wśród podstawowych kryteriów geologicznych opisujących złożę odpowiednio do zastosowania technologii PZW należy wymienić [7]:

- ogólną charakterystyką złoża: typ złoża opisaną przez jego budowę geologiczną, liczbę pokładów nadających się do zgazowania i ich sumaryczną grubość oraz rodzaj nadkładu,
- charakterystykę pokładu węgla przeznaczonego do zgazowania: tj.: jego grubość i upad,
- budowę petrologiczną pokładu węgla przeznaczonego do zgazowania, charakteryzującą parametry jakościowo-chemiczne istotne z uwagi na jakość powstających produktów zgazowania (m.in. zawartość wilgoci, popiołu, części

- lotnych, zawartość siarki, wartość opałowa, zawartość pierwiastków szkodliwych),
- właściwości strukturalne oraz teksturalne skał otaczających pokład węgla przeznaczony do zgazowania, w tym parametry opisujące: litologię skał stropowych i spągowych, ich cechy strukturalno-teksturalne, budowę petrograficzną w aspekcie zapewnienia szczelności georeaktora PZW oraz wyniki analizy zmian parametrów skał pod wpływem wysokich temperatur powstających w georeaktorze PZW,
- zaburzenia tektoniczne, a w tym ich położenie w stosunku do georeaktora PZW (problem bezpieczeństwa PZW związany z możliwością migracji produkowanych gazów strefami uskoku),
- zaburzenia sedymentacyjne definiujące ciągłość pokładu węgla (wymycia, ścienienia, rozszczepienia pokładu), mogące mieć wpływ na przebieg procesu PZW,
- warunki hydrogeologiczne złoża określone przez parametry opisujące właściwości hydrogeologiczne skał i determinujące ich przepuszczalność, takie jak porowatość, szczelinowatość, przepuszczalność, odsączalność czy też wodochłonność; są one niezwykle istotne, zwłaszcza w aspekcie możliwości migracji ubocznych produktów zgazowania,
- zagrożenia naturalne mogące wystąpić w miejscu PZW – takie jak: sejsmiczne, tąpniętami, metanowe, pożarowe, wodne.

Analizując doświadczenia światowe w tym zakresie zostały opracowane kryteria dla właściwego wyboru miejsca lokalizacji georeaktora PZW. W tabeli 1 przedstawiono te kryteria w odniesieniu do podstawowych wybranych parametrów.

Inną grupą barier dla prowadzenia PZW są uwarunkowania środowiskowe, czyli te które mogą wynikać z potencjalnego wpływu procesu na poszczególne elementy środowiska przyrodniczego. Źródła tych zagrożeń są ściśle związane z warunkami zalegania złoża, wyrobiskami górnictwami, atmosferą kopalnianą oraz powierzchnią nad georeaktorem. Ogólny schemat obrazujący zależność między produktami procesu PZW, a elementami środowiska naturalnego został przedstawiony na rys. 8 [1].

Wśród podstawowych zagrożeń dla środowiska przyrodniczego należy wskazać możliwość zanieczyszczenia wód podziemnych. Produktami ubocznymi zgazowania węgla są bowiem liczne zanieczyszczenia, do których zaliczyć należy przede wszystkim związki aromatyczne takie jak: benzen, toluen, etylobenzen, ksyleny, fenole oraz wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne. Istnieje również wysokie ryzyko uwalniania się znacznych ilości metali ciężkich z popiołów powstających w trakcie prowadzenia procesu. Wysokie temperatury panujące w reaktorze podczas prowadzenia zgazowania oraz znaczne rozgrzanie górotworu może istotnie wpływać na wzrost przepuszczalności skał, ułatwiając tym samym

Tablica 1. Podstawowe kryteria dla podziemnego zgazowania węgla, według różnych opracowań
Table 1. Basic criteria for underground coal gasification according to various studies

Parametr	Andrew Beath z CSIRO Exploration & Mining	Peter Sallans z Liberty Resources Limited	Armitage M. i Burnard K. (warunki europejskie):
Głębokość	100÷600 m	100÷1400 m	600÷1200 m
Miąższość	ponad 5 m	ponad 3 m	> 2 m
Zawartość popiołu	> 60%;	> 60%	–
Nieciągłości, zaburzenia pokładu	minimalne	minimalne	filar ochronny od opuszczonych zrobów w pracujących kopalniach: 500 m
Poziomy wodonośne	całkowita izolacja	całkowita izolacja	pionowa odległość do zbiorników wód podziemnych: 100 m

Środowisko / Proces PZW	Górotwór	Wyrobiska	Atmosfera	Powierzchnia
Przestrzeń	Deformacje warstw skalnych	Deformacje obudowy		Deformacje powierzchni terenu
	Zmiany struktury skal	Zawały		
	Zmiany stanu naprężeń			
Temperatura	Zmiana własności skal		Temperatura atmosfery	
	Zmiana składu mineralnego (chemicznego) skal		Inicjal zapłonu	
Produkty zgazowania	Węglowodory (skażenia wód podziemnych)		Gazy szkodliwe	Gazy szkodliwe
			Gazy wybuchowe	Skażenia wód powierzchniowych

Rys. 8. Zagrożenia dla poszczególnych elementów środowiska wynikające z procesu PZW [7]

Fig. 8. Threats to individual (respective) elements of the environment resulting from the UCG process [7]

migrację zanieczyszczeń do warstw wodonośnych. Wysoka mobilność zanieczyszczeń w otoczeniu georeaktora spowodowana jest występowaniem wielu różnych naturalnych oraz sztucznie wytworzonych spękań górotworu, powstających pod wpływem działania czynników termicznych i mechanicznych związanych z procesem PZW [10]. Do kluczowych zagadnień będących wyzwaniem dla komercjalizacji technologii należą również: kontrola przebiegu procesu zgazowania, jego optymalizacja i efektywność poparta efektami ekonomicznymi.

5. Wnioski

1. Węgiel pokrywa obecnie 40 % światowego zapotrzebowania na energię elektryczną, a bogate zasoby węgla kamiennego i brunatnego w świecie mogą być gwarantem dla stabilnego pozyskiwania energii jeszcze przez wiele dziesięcioleci.
2. Coraz bardziej powszechny jest pogląd, że węgiel jako specyficzny surowiec nie powinien być wykorzystywany wyłącznie w celach energetycznych czy też ciepłowniczych poprzez jego spalanie, posiada bowiem ogromny niewykorzystany dotychczas potencjał innych zastosowań energochemicznych, do których kluczem są procesy jego konwersji, takie jak zgazowanie czy też uwodornienie.
3. Światowe doświadczenia wskazują, że technologia podziemnego zgazowania węgla jest jedną z najbardziej przyszłościowych opcji pełniejszego wykorzystania jego zasobów, szczególnie tych, które nie są osiągalne ze względów technicznych i ekonomicznych dla klasycznych technologii eksploatacji pokładów węgla.
4. Pomimo wielu już lat doświadczeń przeprowadzonych w różnych częściach świata, technologia podziemnego zgazowania węgla nie jest jeszcze w pełni dojrzała do jej powszechnego zastosowania w skali przemysłowej.
5. Istnieje wiele uwarunkowań wynikających, między innymi, z budowy geologicznej złoża, lokalizacji miejsca zgazowania, uwarunkowań technicznych i środowiskowych, które decydują zarówno o bezpieczeństwie i pełnej kontroli procesu PZW, jak i o opłacalności tego przedsięwzięcia w skali przemysłowej.
6. Przed środowiskiem naukowym i przemysłowym stoi jeszcze wiele wyzwań, których realizacja stwarza niepo-

wtarzalną szansę dla na powstanie efektywnej i bezpiecznej technologii XXI wieku służącej pozyskiwaniu energii z pokładów węgla.

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. Baron R., Kabiesz J., Koterak A.: Wybrane aspekty ryzyka środowiskowego związanego z procesem podziemnego zgazowania węgla [w]: „Zagrożenia i technologie” pod red. J. Kabiesz, 2013.
2. Bhutto A. W., Bazmi A. A., Zahedi G.: Underground coal gasification: From fundamentals to applications, Progress in Energy and Combustion Science 39, 2013, 1.
3. Breault R. W.: Gasification Processes Old and New: A Basic Review of the Major Technologies, Energies 2010, 3(2).
4. Chuantong L., Jiu H.: Experimental Study on Running of Underground Coal Gasification Power Generation System [w]: materiały konferencyjne: International Conference on Coal Science and Technology, IEA Clean Coal Centre, Nottingham, 2007.
5. Creamer Media: Carbon Energy signs UCG deal in China, 8th May 2013, dostęp w dniu: 29.05.2014.
6. Dubiński J., Stańczyk K., Cybulski K., i inni: Podziemne zgazowanie węgla – doświadczenia światowe i eksperymenty prowadzone w KD Barbara. Polityka Energetyczna, tom 13, zeszyt 2, 2010.
7. Frejowski A., Myszkowski J.: Wybrane kryteria geologiczne determinujące zastosowanie dostępnych technologii górniczych dla podziemnego zgazowania węgla kamiennego, [w]: „Zagrożenia i technologie” red. J. Kabiesz, Główny Instytut Górnictwa, 2012.
8. International Energy Agency: Medium-Term Coal Market Report 2013 - Executive Summary, OECD/IEA, 2013 dostępne w internecie, dostęp w dniu: 04.06.2014
9. Kreymin E.: International UCG Practices Overview: New Russian Method and Its Engineering Solutions, Joint-stock company “Gazprom

- promgaz”, Online: http://archive.zeuslibrary.com/ucg2011/presentation-s/02Kreynin_Gazprom_Presentation.pdf, dostęp w dniu: 20.05.2014.
10. *Kapusta K., Stańczyk K.*: Uwarunkowania i ograniczenia rozwoju procesu podziemnego zgazowania węgla w Polsce. *Przemysł Chemiczny* 2009, 88/4
 11. *Karcz A., Ściżko M.*: Energochemiczne przetwórstwo węgla do paliw ciekłych. *Wiadomości Górnicze*, nr 2, Katowice 2007.
 12. *Kiryukhina Y.*: Australian company to launch innovative coal-to-gas project in Russia, *Russia Beyond The Headlines*: August 15, 2013 RBTH Asia Pacific, Online: dostęp w dniu 29.05.2014.
 13. *Neville A.*: Underground Coal Gasification: Another Clean Coal Option, *Electric Power, Business and Technology for the Global Generation Industry*, 07/01/2011 JD, www.powermag.com, dostęp w dniu 20.05.2014.
 14. *Self S., Reddy B., Rosen M.*: Review of underground coal gasification technologies and carbon capture, *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 2012.
 15. *Shafirovich E., Varma A.*: Underground Coal Gasification: A Brief Review of Current Status, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2009, 48 (17).
 16. *Stojcevski A., Harish Kumar RN, Devamanokar Lakshmanan Udayakumar, Maung Than Oo A.*: Underground Coal Gasification: an alternate, Economical, and Viable Solution for future Sustainability, *International Journal of Engineering Science Invention*, Vol. 3, Issue 1, 2014
 17. *Strugała A., Czaplicka-Kolarz K., Ściżko M.*: Projekty nowych technologii zgazowania węgla powstające w ramach Programu Strategicznego NCBiR, „*Polityka Energetyczna*”, tom 14, zeszyt 2, s. 375-390.
 18. *Van der Riet M.*: Underground coal gasification., Eskom Research and Innovation Department, Online: <http://www.ee.co.za>, dostęp w dniu 24.05.2014.
 19. Wikipedia za: Google book: *Mond Gas. R.D. Wood & Co.* Retrieved 14 Nov 2012.
 20. <http://www.ucgassociation.org>
 21. http://ergoexergy.com/about_us_ourb_projects_eskom.htm
 22. <http://en.wikipedia.org>

