

Krzysztof STAŃCZYK*, Józef DUBIŃSKI*, Krzysztof CYBULSKI**, Marian WIATOWSKI***, Jerzy ŚWIĄDROWSKI****, Krzysztof KAPUSTA*****, Jan ROGUT***, Adam SMOLIŃSKI*****, Eugeniusz KRAUSE**, Jacek GRABOWSKI***

Podziemne zgazowanie węgla – doświadczenia światowe i eksperymenty prowadzone w KD Barbara

STRESZCZENIE. Podziemne zgazowanie węgla (PZW), którego koncepcja powstała na początku ubiegłego wieku w Anglii, jest metodą pozyskiwania energii z węgla bezpośrednio w miejscu jego zalegania (*in situ*) poprzez doprowadzenie czynnika zgazowującego do zapalnego złoża i odbiór wytworzonego gazu na powierzchni. W porównaniu do metod zgazowania w reaktorach powierzchniowych, PZW jest procesem dużo bardziej złożonym i trudnym w realizacji. W artykule przedstawiono obecny stan rozwoju technologii podziemnego zgazowania węgla oraz plany firm zaangażowanych w rozwój tych technologii. Przedstawiono również wybrane wyniki badań uzyskanych w koordynowanym przez Główny Instytut Górnictwa projekcie badawczym *Hydrogen Oriented Underground Coal Gasification for Europe* (HUGE).

SŁOWA KLUCZOWE: węgiel, zgazowanie podziemne, eksperymenty, technologie

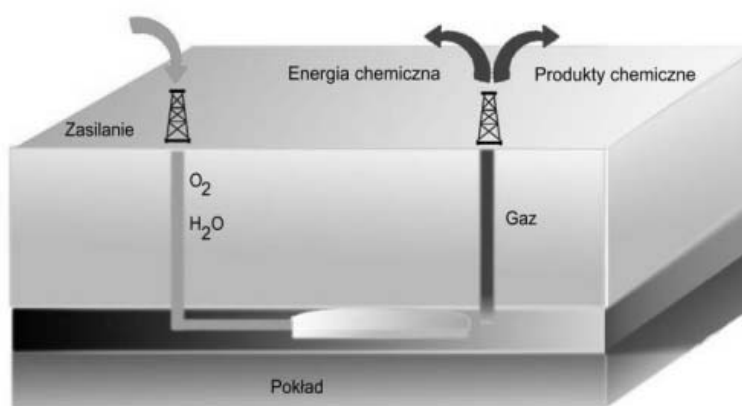
1. Idea podziemnego zgazowania węgla

Podziemne zgazowanie węgla (ang. *Underground Coal Gasification* – UCG) jest metodą konwersji węgla do gazu syntezowego *in situ*, będącą odpowiednikiem procesów zgazo-

* Prof. dr hab. inż., ** Doc. dr hab. inż., *** Dr inż., **** Mgr inż., ***** Mgr, ***** Dr – Główny Instytut Górnictwa, Katowice, e-mail: k.stanczyk@gig.eu

wania prowadzonych w reaktorach powierzchniowych według dobrze opisanych technologii. Podczas procesu UCG, podobnie jak w przypadku tradycyjnych metod zgazowania, węgiel reaguje w podwyższonej temperaturze z czynnikiem zgazowującym, którym najczęściej jest powietrze, tlen, para wodna lub ich mieszanina [1, 2]. Produktem końcowym jest mieszanina gazów składająca się głównie z H_2 , CO, CO_2 oraz CH_4 . Udziały poszczególnych składników w gazie zależą od warunków termodynamicznych prowadzenia procesu oraz od zastosowanego czynnika zgazowującego.

Pierwszym etapem prowadzenia podziemnego zgazowania węgla jest tworzenie tzw. reaktora podziemnego. Reaktor podziemny stanowi poddawany zgazowaniu odcinek pokładu węgla, którego środek przecina kanał łączący otwór zasilający czynnikiem zgazowującym z otworem produkcyjnym, transportującym produkty zgazowania po zainicjowaniu procesu. Ideę procesu podziemnego zgazowania węgla z zastosowaniem odwiertów z powierzchni przedstawiono na rysunku 1 [3].



Rys. 1. Idea procesu podziemnego zgazowania węgla z zastosowaniem odwiertów z powierzchni [3]

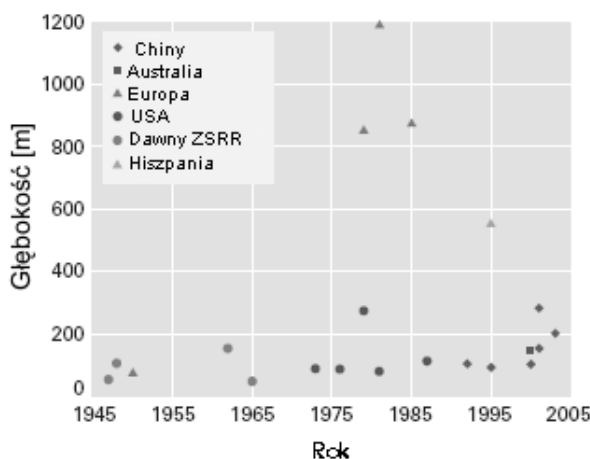
Fig. 1. An idea of underground coal gasification process by use of wells drilling [3]

W zależności od sposobu udostępnienia pokładu węgla wyróżnia się dwie metody przygotowania reaktora: metodę szybową i metodę bezszybową. Metoda szybowa polega na udostępnieniu pokładu węgla szybem, a czynnik zgazowujący jak i produkt zgazowania transportowane są wyrobiskami górniczymi. Metoda ta, choć historycznie pierwsza, obecnie uważana jest za nieekonomiczną i mało perspektywiczną, choć interesującą do zastosowania w zamykanych kopalniach. Większość obecnie prowadzonych w świecie badań w zakresie UCG skupia się na metodzie bezszybowej, której rozwój w ostatnich latach był możliwy dzięki postępowi w dziedzinie wierceń kierunkowych [4]. W metodzie bezszybowej, przygotowanie reaktorów polega na wykonaniu wierceń kanałów zasilających i produkcyjnych z powierzchni, a następnie połączeniu ich kanałami łączącymi.

2. Światowe doświadczenia w podziemnym zgazowaniu węgla

Badania nad podziemnym zgazowaniem węgla prowadzone są w świecie od początku XX wieku. Do dnia dzisiejszego przeprowadzono ponad 50 eksperymentów UCG, w tym ponad 30 w USA [1]. W Stanach Zjednoczonych pierwsze eksperymenty UCG miały miejsce we wczesnych latach sześćdziesiątych i trwały do połowy lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku. Do najlepiej udokumentowanych należą próby UCG przeprowadzone w Centralii (3 próby w latach 1981–1983), Hannie (15 prób w latach 1973–1979 i 2 próby 1987–1988) i Hoe Creek (6 prób w latach 1976–1979). W Europie eksperymenty z podziemnym zgazowaniem węgla prowadzono w latach 1982–1999. Do najważniejszych eksperymentów zaliczyć należy próbę przeprowadzoną w Hiszpanii w latach 1992–1999 przez konsorcjum belgijsko-hiszańsko-brytyjskie, a finansowane przez Komisję Europejską. Zakończony sukcesem eksperyment prowadzony na głębokości 550 m, wykorzystujący metodę wierceń kierunkowych oraz metodę CRIP (*Continues Retraction Injection Point*) dowiódł wykonalności procesu UCG na dużych głębokościach. W Europie eksperymenty UCG prowadzono również we Francji, Belgii oraz Polsce (w Głównym Instytucie Górniczym od lat pięćdziesiątych do siedemdziesiątych ubiegłego wieku). W Związku Radzieckim pierwsze próby UCG przeprowadzono w roku 1933. W latach 1960–1980 prowadzono eksploatację w skali przemysłowej, produkując rocznie około 1,5 mld m³ gazu [3]. W próbie zainicjowanej w Uzbekistanie (Angren) w roku 1955 i biegnącej do dnia dzisiejszego, zgazowano łącznie już ponad milion ton węgla [5].

Próby UCG prowadzone w krajach byłego ZSRR dotyczyły pokładów płytko zalegających (rys. 2). Duże znaczenie w rozwoju technologii mają również doświadczenia



Rys. 2. Światowe próby UCG realizowane do roku 2005 i głębokość prowadzenia procesu [2]

Fig. 2. World trials of UCG till 2005 and the depths of the trails [2]

prowadzone w Chińskiej Republice Ludowej, gdzie od roku 1984 wykonano wiele prób w skali pilotowej. Obecnie w Chinach prowadzone są prace na czterech instalacjach pilotowych, gdzie w sposób kompleksowy próbuje się rozwiązać zagadnienie zgazowania węgla, oczyszczania i wykorzystania gazu, a nawet sekwestracji powstałego w procesie dwutlenku węgla. W ramach projektu Chinchilla realizowanego w Australii od roku 1998 przeprowadzono udaną próbę zgazowania podziemnego prowadzonego technologią UCG.

Najnowsze wyniki badań oraz stan zaawansowania technologii podziemnego zgazowania węgla w świecie przedstawiono na konferencji Global UCG Summit, która odbyła się w Londynie w październiku 2009 roku. Poniżej pokrótce omówiono przedstawione tam wybrane wystąpienia. Pierwsze z nich dotyczyło powstałej w ubiegłym roku publikacji [6] omawiającej światowe doświadczenia w podziemnym zgazowaniu węgla oraz trendy zarówno w badaniach, jak i rozwoju technologii. Jest to ciekawe i przydatne kompendium wiedzy, omawiające szczegółowo wszystkie istotne aspekty procesu.

Firma Linc Energy [7] przedstawiła australijski projekt podziemnego zgazowania węgla ukierunkowanego na produkcję gazu syntezowego i wytwarzanie paliw ciekłych. Takie rozwiązanie bazuje na wcześniejszych eksperymentach prowadzonych w Australii od 1998 roku. Realizacja projektu jest obecnie na etapie wyboru miejsca i projektowania instalacji przemysłowej o wydajności 20 000 baryłek na dobę.

Firma Alberta Energy Technologies [8] przedstawiła plany kanadyjskie dotyczące rozwoju technologii podziemnego zgazowania węgla. Biorąc pod uwagę fakt, że węgiel w Kanadzie zalega prawie wyłącznie w Albercie, tam prowadzi się głównie badania nad nowymi technologiami węglowymi. Obecnie realizowany jest pilotowy projekt zgazowania podziemnego węgla w złożu na głębokości 1400 metrów. Stwierdzono, że wydobywanie węgla z tak dużych głębokości ma sens jedynie przy zastosowaniu technologii zgazowania. Alberta Energy Technologies współpracuje z uniwersytetem w Calgary, gdzie prowadzone są prace związane z modelowaniem procesu. Obie instytucje uważają, że modelowanie procesu ma ogromne znaczenie w rozwoju technologii i pozwoli na szybkie jej zaawansowanie [9].

Indyjski projekt podziemnego zgazowania węgla rozpoczął się w 2004 roku [10]. Początkowo wybrano 15 miejsc do ewentualnej realizacji projektu, z czego 5 miejsc uznano za nadające się do tego procesu. Z tych pięciu miejsc, spełniających kryteria do realizacji projektu, wybrano miejscowość Vastan w południowym Gujaratcie. W pobliżu wybranej lokalizacji znajduje się ciepłownia opalana torfem. W następnym etapie scharakteryzowano lokalizację pod względem stratygraficznym, litograficznym, hydrologicznym jak również określono głębokość zalegania złoża i jego grubość oraz właściwości mechaniczne, porowatość i przepuszczalność. Obecnie projekt jest na etapie zaawansowanego projektowania inżynierskiego z równoległym uzyskiwaniem pozwoleń środowiskowych i rozwiązywaniem zagadnień własności gruntów i obowiązujących przepisów górniczych.

W Republice Południowej Afryki [11] realizowany jest projekt podziemnego zgazowania węgla przez firmę African Carbon Energy. Projekt ten podobnie jak projekt indyjski opiera się na zastosowaniu metody wierceń LVW *Linked Vertical Well*, to jest połączonych pionowych odwiertów. Jednym odwiertem odbiera się wytworzone gazy, natomiast czynnik

zgazowujący podaje się otworami stopniowo oddalając się od miejsca odbioru gazu. Firma ma gotowy projekt techniczny i zabiega o fundusze na realizację inwestycji. Harmonogram realizacji projektu firmy African Carbon Energy przewiduje wykonanie infrastruktury projektu w ciągu następnych 9–12 miesięcy, demonstrację działania instalacji w roku 2010 oraz pracę instalacji przemysłowej w latach 2011–2013.

3. Opis projektu podziemnego zagazowania węgla o akronimie HUGE

Główny Instytut Górnictwa realizował w latach 2007–2010, współfinansowany ze środków Funduszu Badawczego Węgla i Stali (RFCS) projekt o akronimie HUGE (ang. *Hydrogen Oriented Underground Coal Gasification for Europe*), który dotyczył podziemnego zgazowania węgla ukierunkowanego na otrzymywanie gazu o wysokiej zawartości wodoru. Oprócz Głównego Instytutu Górnictwa, pełniącego w projekcie rolę koordynatora, konsorcjum projektu tworzyli partnerzy z Holandii, Wielkiej Brytanii, Niemiec, Czech, Belgii i Ukrainy i były to następujące instytucje: Delft University of Technology, UCG Partnership Ltd, Universität Stuttgart, Institute of Chemical Process Fundamentals, Institut Scientifique de Service Public, National Mining University. W projekcie brały też udział dwa krajowe instytuty naukowe: Instytut Górnictwa Odkrywkowego „Poltegor” i Politechnika Śląska oraz firmy sektora paliwowo-energetycznego, tj. Kompania Węglowa S.A. oraz BOT Górnictwo i Energetyka S.A.

W projekcie prowadzone były badania procesu podziemnego zgazowania węgla w dynamicznym georeaktorze w celu wytwarzania wodoru. Proces był kontrolowany poprzez dynamiczne zmiany temperatury i ciśnienia podawanych do reakcji gazów. Nowością tego projektu było prowadzenie go w zmiennych ciśnieniach i temperaturach, co powodowało adsorpcję i desorpcję powstałych produktów bezpośrednio w złożu węgla, a zatem pozwalało na ich częściowy rozdział *in situ*.

W ramach projektu przeprowadzono próbę podziemnego zgazowania w skali półtechnicznej, w pokładzie zalegającym na głębokości około 30 m. Próba ta poprzedzona była szeregiem eksperymentów laboratoryjnych oraz doświadczeń w reaktorze powierzchniowym. Wyniki projektu HUGE pozwolą wyjaśnić szereg nowych, dotąd niebadanych aspektów procesu PZW, dotyczących przede wszystkim możliwości wpływu na skład gazu, wykorzystując określone zjawiska fizykochemiczne w obrębie przestrzeni i w otoczeniu reaktora podziemnego.

4. Wyniki badań w projekcie HUGE

Przeprowadzono 6 wielogodzinnych eksperymentów w reaktorze powierzchniowym, *ex situ*, w którym symulowane były warunki procesu podziemnego. Zasadniczymi celami doświadczeń w reaktorze *ex situ* było:

1. Opanowanie inicjacji procesu zgazowania węgla w bloku węglowym.
2. Zbadanie przebiegu zgazowania węgla w bloku węglowym w zależności od zastosowanego czynnika zgazowującego (powietrze, tlen, para wodna i ich mieszanina w dowolnym stosunku) oraz natężenia przepływu środków utleniających.
3. Zbadanie możliwości wpływu na skład powstającego gazu za pomocą zmiany parametrów termodynamicznych (p , T).
4. Określenie wpływu skał otaczających na skład gazu oraz zbadanie ich zachowania pod wpływem warunków panujących w reaktorze.

Na rysunkach 3 i 4 pokazano zdjęcie zabudowanego reaktora wraz z ze zdjęciem przykładowego bloku węgla stosowanego w symulacyjnych eksperymentach powierzchniowych.



Rys. 3. Zdjęcie reaktora powierzchniowego

Fig. 3. A photo of the ex-situ reactor



Rys. 4. Blok węgla stosowany w eksperymentach powierzchniowych

Fig. 4. Coal block used in experiments

Eksperymenty prowadzono stosując jako czynnik zgazowujący tlen lub powietrze naprzemiennie z parą wodną. Zgazowywany węgiel pochodził z KWK Bielszowice, KWK Piast oraz z KWB Bełchatów. Temperatura procesu zgazowania dochodziła do 1100°C. Proces prowadzono w cyklach, testując różne sposoby podawania czynnika zgazowującego. Średni skład uzyskanego w procesie gazu przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1. Średni skład gazu uzyskanego w procesie zgazowania węgla w reaktorze *ex situ* [%]

TABLE 1. Average gas content from coal gasification [%]

Etap eksperymentu	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆
I	23,09	25,46	42,51	3,23	0,02
II	28,17	25,02	36,09	5,53	0,01
III	50,61	12,35	14,25	15,11	0,39

W trakcie procesu zgazowania, jak też po jego przeprowadzeniu, wykonano badanie za pomocą georadaru w celu określenia przydatności tej metody do obserwacji powstającej w złożu węgla kawerny.

Z badań prowadzonych w reaktorze powierzchniowym wyciągnięto następujące wnioski:

- ✧ w warunkach prowadzonych eksperymentów część węgla kamiennego (około połowa) ulega koksovaniu, a nie zgazowaniu;
- ✧ z objętości powstałej kawerny wynika, że około 40% próbki węgla zostało przeprowadzone w produkt gazowy;
- ✧ wyniki badań techniką georadaru są zbieżne z wynikami obserwacji wyglądu kawerny po eksperymencie i potwierdzają przydatność tej techniki do obserwacji przebiegu eksperymentu;
- ✧ średnie stężenie wodoru w cyklu zgazowania tlenowego dla węgla kamiennego wyniosło 14,62%, przy maksymalnym stężeniu 54,4%;
- ✧ średnie stężenie wodoru w cyklu zgazowania parą wodną dla węgla kamiennego wyniosło 54,25%, a maksymalne stężenie 63,9%;
- ✧ optymalny stosunek realizacji obu cykli jest silnie uzależnione od geometrii reaktora i zmienia się w trakcie procesu;
- ✧ średnie stężenie wodoru w cyklu zgazowania tlenowego dla węgla brunatnego wyniosło 25,4%, a maksymalne stężenie 37,0%.

Przeprowadzono 16 dniową próbę podziemnego zagazowania węgla w Kopalni Doświadczalnej (KD) Barbara w pokładzie 310, usytuowanym na głębokości około 30 metrów. Parametry procesu w próbie podziemnej były następujące:

- ✧ przestrzeń georeaktora: 15 m x 5 m x 1,5 m,
- ✧ czynniki zgazowujące: tlen, powietrze,
- ✧ czynnik ochronny: azot,
- ✧ prędkość zgazowania substancji węglowej: około 30–40 kg/godz.,
- ✧ ilość wytworzonego gazu: 120–150 m³ gazu/godz.,
- ✧ całkowita ilość zgazowanego węgla: 12–15 ton.

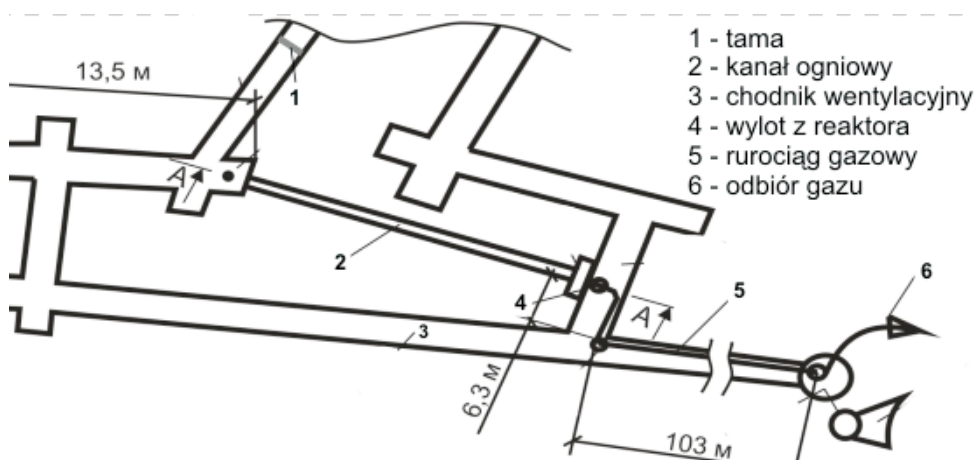
Charakterystykę węgla z KD Barbara poddanego zgazowaniu przedstawiono w tabeli 2.

Schemat georeaktora pokazano na rysunku 5. Szkic usytuowania georeaktora oraz rozmieszczenia urządzeń monitorujących proces przedstawiono na rysunku 6.

TABELA 2. Charakterystyka węgla z KD Barbara poddanego zgazowaniu

TABLE 2. Ultimate and technical analysis of coal from Barbara mine

Parametr	Analiza techniczna			Analiza elementarna				Wartość opałowa MJ/kg
	wilgotność [%]	części lotne [%]	popiół [%]	C [%]	H [%]	N [%]	S [%]	
Wartość	5,2	30,5	15,9	62,3	4,1	0,96	0,8	23,9



Rys. 5. Schemat georeaktora podziemnego

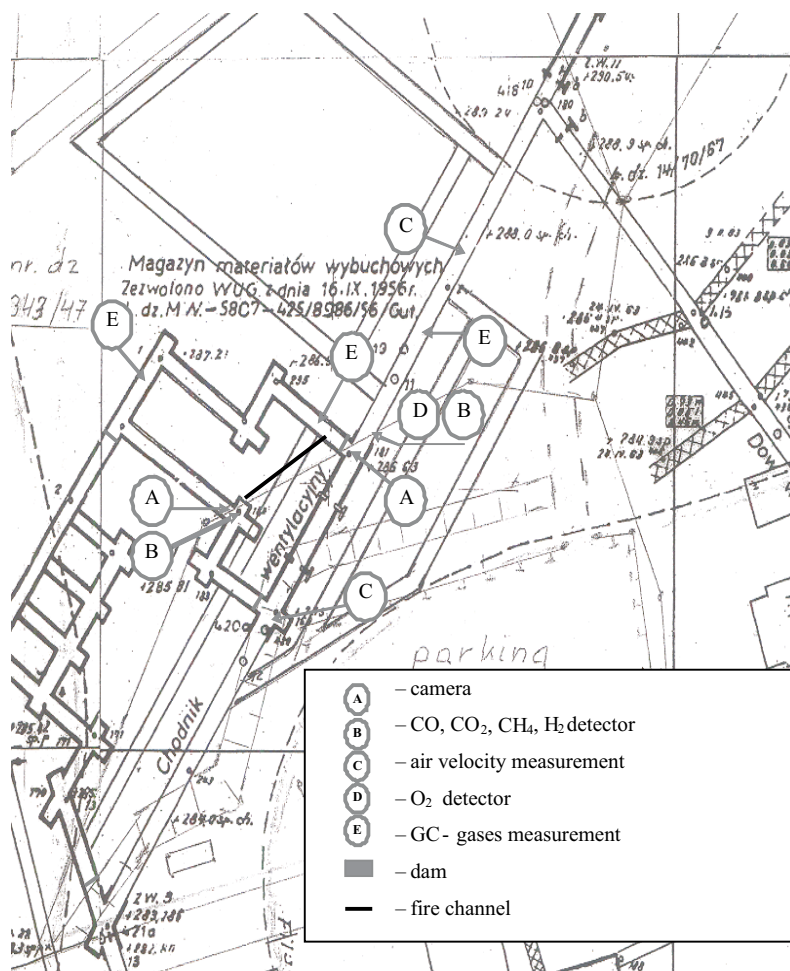
Fig. 5. A scheme of underground georeactor

W procesie uzyskano palny gaz o wartości opałowej w przedziale: 2,5–10 MJ/ m³ i o następującym składzie: wodór 10–40%, tlenek węgla 20–30%, metan 2–3%, dwutlenek węgla 10–15%, tlen 1–2%.

5. Wnioski

Pomimo wielu lat doświadczeń przeprowadzonych w różnych częściach świata, technologia podziemnego zgazowania węgla nie dojrzała jeszcze do zastosowania w pełni przemysłowego.

Należy podejmować projekty z tematyki podziemne zgazowanie węgla, gdyż w wielu państwach świata zaangażowanie w projekty PZW znacznie wyprzedza Europę. Technologia ta może w przyszłości stać się kluczową technologią wydobywania węgla, zwłaszcza z głęboko zalegających pokładów.



Rys. 6. Szkic usytuowania georeaktora oraz rozmieszczenia urządzeń monitorujących proces

Fig. 6. A scheme of georeactor placement and monitoring system

Wyniki badań wykonanych w powierzchniowym reaktorze *ex situ* w KD Barbara pozwoliły na zaprojektowanie reaktora podziemnego i zaplanowanie eksperymentów w warunkach rzeczywistych.

Próba przeprowadzona w warunkach rzeczywistych przebiegła pomyślnie i nauczono się jak bezpiecznie sterować procesem, jak dobrać media zgazowujące i jak można wpływać na jakość produktu. Próba ta była prowadzona w przestrzeni otamowanej.

Otrzymany produkt gazowy o wartości opałowej wynoszącej 2,5–10 MJ/m³ był palny i spalał się w pochodni w całym czasie trwania eksperymentu. Stwierdzono, że maksymalna zawartość wodoru w otrzymanym gazie wyniosła 40%.

Najważniejszym i najtrudniejszym problemem podczas prowadzenia eksperymentu były sprawy bezpieczeństwa (mieszanka wybuchowych gazów) oraz sprawy zanieczyszczenia środowiska (problem zanieczyszczenia wód).

Literatura

- [1] STAŃCZYK K., ŚWIĄDROWSKI J., KAPUSTA K., 2006 – Zgazowanie węgla jako sposób ochrony powietrza. Ochrona Powietrza w teorii i praktyce t. I, Zabrze.
- [2] DTI, 2005 – Review of the feasibility of underground coal gasification in the UK, DTI/Pub 04/1643, Didcot, Oxfordshire, UK, Harwell International Business Centre, 46 pp.
- [3] STAŃCZYK K., BIAŁECKA B., KAPUSTA K., HANKUS A., ŚWIĄDROWSKI J., 2005 – Rozwój gospodarki wodorowej w oparciu o węgiel kamienny. Praca statutowa, Główny Instytut Górnictwa (ident. sn130030).
- [4] DTI, 2005 – Directional Drilling in Coal, Great Britain.
- [5] BURTON E., FRIEDMANN J., UPADHYE R., 2006 – Best practices in underground coal gasification. Draft. US DOE contract no W-7405-Eng-48. Livermore, CA, USA, Lawrence Livermore National Laboratory, 119 pp.
- [6] COUCH G.R., 2009 – Underground coal gasification. CCC/151, July 2009, IEA Clean Coal Centre, Londyn.
- [7] PETERS J., 2009 – Examine the Key Requirements for the Successful Deployment of UCG on a Commercial Scale. Global UCG Summit, London, October 2009.
- [8] NGUYEN D., 2009 – The Strategic Importance of Underground Coal Gasification with Carbon Capture and Storage in Alberta. Global UCG Summit, London, October 2009.
- [9] CHEN Z., 2009 – Modeling and Simulation of Deep UCG Projects. Global UCG Summit, London, October 2009.
- [10] SHARMA R., 2009 – Experiences in UCG. Global UCG Summit, London, October 2009.
- [11] BRAND J., 2009 – Project Planning and Modeling of UCG Projects. Global UCG Summit, London, October 2009.

Krzysztof STAŃCZYK, Józef DUBIŃSKI, Krzysztof CYBULSKI, Marian WIATOWSKI,
Jerzy ŚWIĄDROWSKI, Krzysztof KAPUSTA, Jan ROGUT, Adam SMOLIŃSKI,
Eugeniusz KRAUSE, Jacek GRABOWSKI

Underground coal gasification – world experience and experiments performed in experimental mine Barbara

Abstract

The idea and objectives of underground coal gasification process is presented. World experience in the past and particularly in the present state as well as plans of companies dealing with UCG for the future is shown. The plans of work in the UCG in different countries are shortly described and discussed. The aims and a short description of project cofounded by RFCS, titled Hydrogen Oriented Underground Coal Gasification for Europe (HUGE) is presented. Results of the project, from ex-situ reactor constructed for simulation underground conditions are presented and discussed. Also some

results from underground trial are presented. The trial performed in underground seam was successful and we learned how to control the process safely, how to chose gasification media and how influence on the quality of gas composition. The experiment has been performed in dammed space. The obtained gas product of heating value 2.5–10 MJ/m³ was combustible during the whole sixteen days experiment. It was found that there is possible to obtain up to 40% of hydrogen in UCG process. The most important issues in UCG are safety problems (avoiding of gases explosion) and environmental issues (mainly water contamination).

KEY WORDS: coal, underground gasification, experiments, technologies

