

Piotr Mocek, Eugeniusz Jędrzyk, Krzysztof Stańczyk, Zakład Oszczędności Energii i Ochrony Powietrza, Główny Instytut Górnictwa

Podziemne zgazowanie węgla

- główne kierunki, stan prac i techniczne aspekty realizacji

W artykule omówiono stopień zaawansowania prac nad podziemnym zgazowaniem węgla w kierunku wytwarzania gazu na potrzeby energetyczne lub jako surowiec służący do wytwarzania substytutu gazu ziemnego. Przedstawiono wybrane zagadnienia związane z wdrażaniem tej technologii w warunkach krajowych: jej rozwój technologiczny, ograniczenia techniczne, zagrożenia środowiskowe i główne uwarunkowania ekonomiczne. Aktualne prace techniczne skupiają się na realizacji technologii w skali demonstracyjnej.

Podziemne zgazowanie węgla (PZW) prowadzone jest bezpośrednio w złożu, do którego podawany jest roztwór czynnika zgazowującego zawierający głównie H_2O , O_2 i N_2 . Produktem głównym jest gaz surowy o niskiej lub średniej wartości opałowej (od 3,5 do 12 MJ/m³n). Metoda PZW jest w szczególności analizowana dla pokładów węgla, których eksploatacja metodami konwencjonalnymi jest niemożliwa ze względów geologicznych (pokłady resztkowe, pokłady głęboko zalegające) lub też zbyt kosztowna. Wytwarzanie gazu w procesie podziemnego zgazowania węgla (PZW) nie osiągnęło jeszcze pełnej dojrzałości przemysłowej, a opanowanie tej technologii wymaga dalszych prac badawczych [1]. PZW jest trudną metodą konwersji węgla, co wynika przede wszystkim z możli-

wości wystąpienia skażeń środowiska przez wydzielone gazy, jak również powstałe w procesie substancje organiczne. Dodatkową trudnością jest zapewnienie bezpieczeństwa środowiskowego po procesie i upewnienie się, że z powstałej kawerny nie będą wyciekać substancje organiczne i nieorganiczne. Pomimo wymienionych trudności prace związane z wykorzystaniem głęboko zalegających lub trudnodostępnych złóż węgla są realizowane w świecie w szerokim zakresie [2-7]. Jednym z kierunków prowadzonych badań jest poszukiwanie optymalnych metod wykorzystania energii wytworzonego w procesie gazu [7-18]. Składniki gazu z PZW można wykorzystać do dalszej konwersji chemicznej, bądź bezpośrednio wykorzystywać do wytwarzania ciepła i energii elektrycznej. Uzyskanie w procesie

PZW gazu o wysokiej wartości opałowej wymaga: odpowiedniej lokalizacji georeaktora, zasilania instalacji czynnikiem zgazowującym o odpowiednim stosunku H_2O/O_2 , sprawnych w długotrwałej eksploatacji aparatów odpowiedzialnych za oczyszczanie gazu, czy wydzielenie pożądanego składnika z ich mieszaniny. Stosowane współcześnie technologie podziemnego zgazowania przy ciśnieniach zbliżonych do ciśnienia hydrostatycznego występującego na głębokości zalegania złoża, umożliwiają uzyskanie gazu o wartości opałowej wynoszącej około 12 MJ/m³n przy znacznej zawartości CH_4 i CO_2 . Pozwala to na jego separację i wydzielenie w postaci średniego gazu o dobrych parametrach energetycznych [7]. Efektywną metodą wykorzystania gazu z procesu PZW o stosunkowo wysokim zanieczyszczeniu,

pochodzącego ze zgazowania w mieszaninie: powietrze, tlen, para wodna jest przemiana energii chemicznej w warunkach urządzeń energetycznych do energii elektrycznej i ciepła użytkowego [8].

■ Badania krajowe

Podziemne zgazowanie węgla w Polsce bada się z przerwami od lat 50. [9-13]. Obecnie prowadzone są prace na instalacjach uwzględniających nowego rodzaju materiały rurociągów, istotne zmiany w sposobie współpracy urządzeń potrzeb własnych i sposoby sterowania procesem. Wprowadza to istotny postęp zarówno w obszarach konwersji węgla w złożu, oczyszczania gazu, jak i dla kontroli tego procesu. Wprowadzane są w praktyce wiercenia do złoża w tym wiercenia kierunkowe [14] i nowe technologie pomiarowe w obszarze reaktora i instalacji energochemicznej [15]. Wdraża się również coraz więcej nowych metod pomiaru w obszarze otaczającym georeaktor i w zakresie badań oddziaływań z otoczeniem. W ramach prowadzonych prac badawczych przeprowadzono działania typowe dla wdrażania każdej nowej technologii. Były to zatem badania w małej skali laboratoryjnej [16], w wielkiej skali laboratoryjnej zarówno podziemne, jak i naziemne oraz w skali poligonu doświadczalnego [17] i istniejącego, doświadczalnego zakładu górniczego [18].

Badania w skali pilotowej prowadzono w 2014 r. w funkcjonującym zakładzie górniczym. W ramach realizacji połączono rurociągi prowadzone w istniejącej infrastrukturze podziemnej z wierceniami do złoża węgla w pokładzie o miąższości około 5 m. Warunki istniejącej kopalni umożliwiły prowadzenie szeregu prac niemożliwych dla zgazowania otworami prowadzonymi z powierzchni [15]. Na rys. 1 widoczna jest instalacja zgazowania naziemnego w KWK Wieczorek, gdzie prowadzono zgazowanie o wydajności

projektowej do 600 kg/h i szczytowej mocy termicznej gazu surowego do 2500 MWth.

Prace badawcze ukończono planowym zagaszeniem georeaktora w grudniu 2015 r. i pracami badawczymi związanymi z oceną pozostałości w złożu. Główne zakładane strumienie bilansowe przeprowadzonego procesu zgazowania podano na rys. 2.

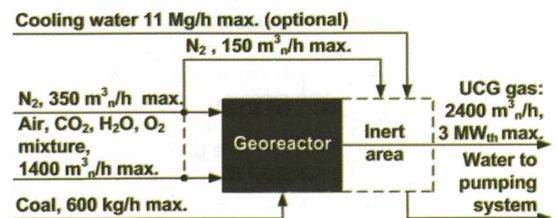
■ Stan techniczny

Wiodącą współczesną metodą zgazowania podziemnego jest zgazowanie ciśnieniowe [18]. Realizuje się je poprzez wiercenie kierunkowe z powierzchni. Warunki termodynamiczne procesu ciśnieniowego umożliwiają uzyskanie średniego gazu o składzie chemicznym, który w stosunkowo prosty sposób można dopasować do potrzeb odbiorcy, jak i stabilność mechaniczną otworów w górotworze [19]. Badania PZW w takich warunkach są głównym kierunkiem prac prowadzonych w GIG. W celu efektywnego przekształcenia węgla w gaz należy zrealizować powiązane ze sobą części techniczne instalacji. Przedstawia je w sposób schematyczny rys. 3.

Część urządzeń PZW związana z przygotowaniem czynnika zgazowującego jest zespołem dostępnych na rynku, dobrze poznanych i dopracowanych rozwiązań technicznych. Rurociągi doprowadzające czynnik zgazowujący prowadzone są z wykorzystaniem technologii wierzeń kierunkowych. W zakresie wykonania wierzeń kierunkowych w kraju funkcjonują firmy o odpowiednim doświadczeniu wierniczym. Nie realizowały one jednak odwiertów dla potrzeb zgazowania z powierzchni, dlatego też w celu realizacji tej części technologii planowana jest współpraca z partnerami zagranicznym. W zakresie funkcjonalizacji georeaktora głównym i dotychczas nietestowanym w kraju elementem technologii jest cofanie czoła płomienia po wyczerpaniu złoża do nowej, nieprzereagowanej partii pokładu. Technika ta polega na doprowadze-

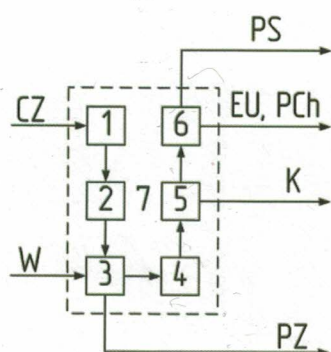


Rys. 1. Fragment instalacji PZW KWK „Wieczorek” wg technologii GIG w części naziemnej (fot. autora)



Rys. 2. Główne strumienie bilansowe procesu zgazowania prowadzonego w funkcjonującym zakładzie górniczym [15]

niu rurociągu substratów wraz z odpowiednimi dyszami na końcu wybiegu zgazowywanego złoża i odpowiednim skracaniu dyszy wypływowej. Cofanie czoła płomienia w praktyce opiera się na upalaniu końcówki rurociągu w wyniku wysokotemperaturowego spalania w atmosferze tlenu. Częstotliwość skracania czoła płomienia określana zostaje w oparciu o analizę składu produktów zgazowania. W części związanej z odbiorem produktów zgazowania wymagającym dopracowania elementem technologii jest zabudowa i długotrwała eksploatacja urządzeń ciśnieniowych sterujących procesem. Szczególnym problemem jest agresywne oddziaływanie produktów gazowych i wydzielanie się z tych produktów kondensatu smołowego [20]. Jeżeli chodzi o oczyszczanie gazu z procesu spalania w urządzeniach energetycznych i sterowania

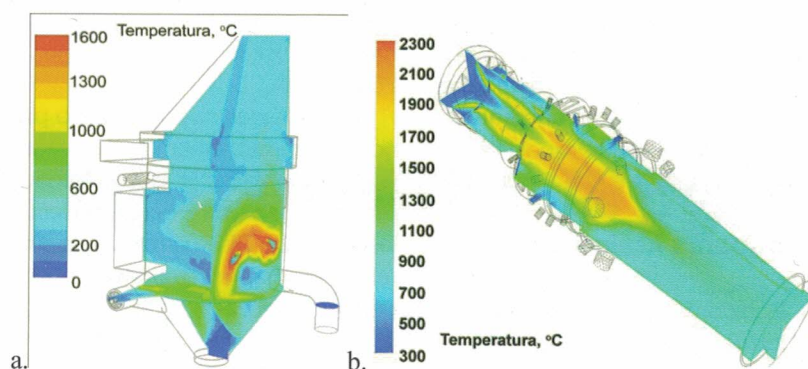


Rys. 3. Schemat strukturalny głównych strumieni substancjalnych i elementów procesu podziemnego zgazowania. Oznaczenia: CZ - czynnik zgazowujący; W - dopływ węgla w złożu i wody złożowej; PZ - pozostałość w złożu; K - kondensat do oczyszczenia; EU - energia użyteczna; PCh - produkty chemiczne; PS - produkty spalania i dopalania. Numeracja: 1 - przygotowanie czynnika zgazowującego, w tym tlenownia i kompresor; 2 - przesył i sterowanie nadawcą czynnika zgazowującego; 3 - zgazowanie podziemne; 4 - przesył produktów zgazowania i reakcje w rurociągu odbiorczym; 5 - oczyszczanie i kondycjonowanie gazu PZW; 6 - konwersja masy, masy i energii lub energii gazu PZW; 7 - sterowanie procesem (źródło: opracowanie własne)

procesem posiadane są odpowiednie doświadczenia umożliwiające realizację tej części instalacji.

Urządzenia oczyszczania do stopnia umożliwiającego energetyczne wykorzystanie są rozwijane w GIG w kierunku spalania atmosferycznego lub spalania w warunkach podwyższonego ciśnienia. Na rys. 4 zamieszczone zostały przykładowe wyniki badań w zakresie modelowania i projektowania spalania w doświadczalnej komorze atmosferycznej (a) i w komorze ciśnieniowej (b) prowadzone w Laboratorium Energetyki Procesowej GIG.

Często, jako główny blokujący wdrożenie technologii PZW argument podawana jest trudność w sterowaniu procesem. Z doświadczeń własnych wynika, że złożoność sterowania nie wybiega poza typowe zagadnienie sterowania procesem w zgazówkach



Rys. 4. Wyniki modelowania urządzeń spalania gazu PZW z naniesionymi obliczonymi rozkładami temperatury. a. Komora atmosferyczna do testów spalania gazu [21]; b. Wariant komory spalania turbiny gazowej TB5000 zasilanej gazem ze zgazowania węgla (źródło: dane niepublikowane autora)

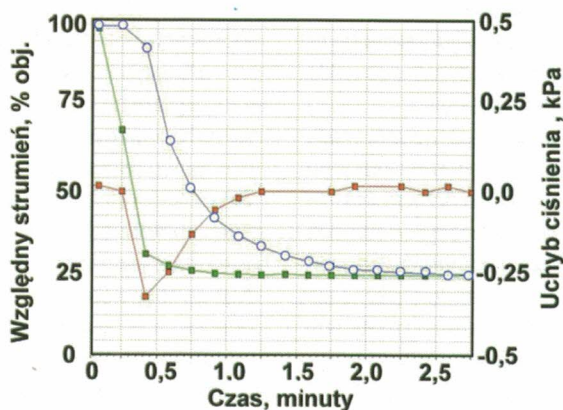
konwencjonalnych. Przykładem jest uzyskany na funkcjonującej instalacji GIG [15] przebieg odpowiedzi dynamicznej georeaktora (ciśnienia gazu PZW) na zmianę nastaw parametrów urządzenia przedstawiony na rys. 5.

Wskazać można dwa główne zagadnienia techniczne związane ze sterowaniem procesem. Pierwszym z nich jest konieczność zapewnienia w przestrzeni georeaktora niewielkiego podciśnienia względem warstw otaczających. Zabezpiecza to otoczenie georeaktora przed wyptywem ciekłych produktów PZW do otoczenia. Kolejny istotny problem eksploatacji georeaktora stanowi konieczność zapewnienia

warunków zgazowania w warunkach termodynamicznych charakteryzujących się małą skłonnością do wydzielania sadzy zarówno w georeaktorze, jak i w przestrzeni rurociągów odbiorczych. Z odpowiednich proporcji czynnika zgazowującego w danym ciśnieniu wynikają wyższe stopnie wykorzystania węgla w złożu i mniejsze problemy z zatykaniem rurociągów odbiorczych gazu.

■ Zagadnienia ekonomiczne

Istnieją dwa obszary wpływające na efektywność kosztową prowadzenia



Rys. 5. Przykładowa odpowiedź georeaktora na zmianę nastawy strumienia czynnika zgazowującego w funkcji czasu: --- - przebieg uchybu regulacji ciśnienia za georeaktorem; --- - względny strumienia podawanego powietrza; --- - względny strumienia gazu PZW (źródło: wyniki badań własnych)

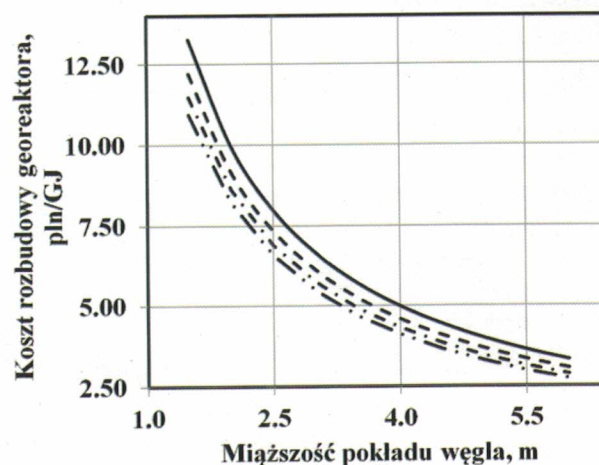
Tab. 1. Analiza rentowności dla nominalnych warunków (cena sprzedaży: energia elektryczna - 160 pln/MWh; ciepło - 40 pln/GJ; opłata za emisję CO₂ - 10 euro/Mg; cena gazu PZW 4,44 pln/GJ) [15]

Lp.	Wielkość	Jednostka	Wariant		
			A	B	C
			kamienny - zgazowanie atmosferyczne, 21,03 MWel brutto	kamienny - zgazowanie pod ciśnieniem hydrostatycznym, 21,41 MWel brutto	brunatny - zgazowanie pod ciśnieniem hydrostatycznym, 21,07 MWel brutto
1.	Koszt inwestycji	mln pln	182,76	184,17	180,78
2.	Suma kosztów stałych	mln pln/r.	25,28	25,46	25,02
3.	Suma kosztów zmiennych	mln pln/r.	22,62	20,34	19,40
4.	Łączne koszty eksploatacyjne	mln pln/r.	47,89	45,80	44,42
Dochody ze sprzedaży					
	Wytwarzanie - Energia elektryczna	MWh/r.	60391	61258	60470
	Wytwarzanie - Ciepło	GJ/r.	1123943	1144378	1126213
	Dochód ze sprzedaży energii elektrycznej	mln pln/r.	9,66	9,80	9,68
5.	Dochód ze sprzedaży ciepła	mln pln/r.	44,96	45,78	45,05
6.	Zysk roczny	mln pln/r.	6,73	9,78	10,30
7.	Prosty okres zwrotu	lata	27,17	18,84	17,55

procesu. Pierwszym z nich jest realizacja zgazowania, jako zakładu konwersji węgla do gazu (zakładu wydobywczego), w tym koszt rozbudowy georeaktora. Drugi to efektywność funkcjonowania zakładu energetycznej lub energochemicznej konwersji gazowych produktów procesu. Dla zgazowania mieszaniną tlenu i powietrza w złożu o różnych miąższościach o długości wybiegu pojedynczego reaktora podziemnego wynoszącej 1500 m podano koszt MW dla instalacji projektowanej na 15 lat funkcjonowania. Wyniki dla zaktualizowanych cen z 2016 r. przedstawione zostały na rys. 6.

Efektywnie można spalać tylko gaz, którego cena u odbiorcy nie jest większa, niż cena węgla energetycznego. W ramach prac badawczych prowadzono analizę efektywności inwestycji w kilku przypadkach urządzeń. Dla współspalania węgla i gazu z PZW w kotle fluidalnym, dwupaliwowym określono główne czynniki kosztowe, których część przedstawiono w tab. 1.

Proces zwrotu inwestycji w szerokim zakresie zmienności parametrów tej instalacji dyskutowany jest w [8]. Minimalna wartość tego parametru wynosi 10.5 r. [8].



Rys. 6. Koszt rozbudowy georeaktora w przeliczeniu na GJ energii w surowym gazie PZW. Obliczono dla zaktualizowanych na 2016 r. kosztów wierceń kierunkowych dla średnicy rurociągu odbiorczego georeaktora -150 mm, przy zgazowaniu podziemnym roztworem H₂O + O₂ pod ciśnieniem hydrostatycznym.

Dla różnych miąższości i mocy elektrycznej brutto bloku energetycznego zasilanego gazem PZW: - - - - miąższość 300 m; N=24 MWel; - - - - 600 m; N=58,6 MWel; - - - - 900 m; N=95,7 MWel; - - - - 1200 m; N=133,1 MWel (oprac. własne)

Wnioski

Przedstawiono stan badań nad procesem przemysłowego PZW w Polsce. W omówionych obszarach zagadnienie można podsumować następującymi wnioskami:

1. Na obecnym etapie prac po realizacji instalacji demonstracyjnej wskazane są badania w instalacji pilotowej o skali ok. 20 MWel. Realizację

tego etapu hamują w głównej mierze warunki ekonomiczne realizacji tego typu inwestycji energetycznych, niska cena energii oraz uwarunkowania lokalizacyjne georeaktora.

2. W celu podniesienia opłacalności ekonomicznej rozwiązania należy oczekiwać redukcji kosztów w utworach geologicznych i opracowywać technologie zwiększające dyspozycyjność i efektywność powtór-

nego wykorzystania i oczyszczania rurociągów.

3. Aby efektywnie procesować węgiel w drodze PZW należy prowadzić proces w miąższości pokładu powyżej 3 m. To z kolei wskazuje na wykorzystanie złóż głęboko zalegających.

4. Zwiększenie potencjału wykorzystania gazowych produktów PZW wymaga analizy skojarzonego wytwarzania energii i substancji chemicznych.

5. Przemysłowa aplikacja technologii PZW jest nadal obciążona ryzykiem technicznym. Głównym problemem na obecnym stopniu realizacji procesu w Polsce jest realizacja zgazowania z powierzchni poprzez wiercenie kierunkowe przy ciśnieniu niewiele mniejszym niż ciśnienie hydrostatyczne na głębokości zalegania złoża. Istotnym zagadnieniem jest również opracowywanie metod korekty położenia frontu zgazowania i pomiarów parametrów termodynamicznych oraz składu substancjalnego w otoczeniu georeaktora.

Publikacja została sfinansowana w ramach pracy statutowej prowadzonej w Głównym Instytucie Górnictwa w 2016 r. pod numerem: 11310086-321.

Literatura

- [1] Imran M., Kumar D., Kumar N., Qayyum A., Saed A., Bhatti M.S.: *Environmental concerns of underground coal gasification. Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014, 31, 600-610.
- [2] Mocek P., Zamiar R., Jachimczyk R., Gowarzewski R., Świądrowski J., Gil I., Stańczyk K.: *Selected issues of operating 3 MW underground coal gasification installation. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, 2015, 17, 427-434.
- [3] Osborne Ed. D.: *The coal handbook: Towards Cleaner Production: Coal Production 1. Woodhead Publishing Series*, 2013.
- [4] Yong C., Jie L., Zhangqing W., Xiaochun Z., Chenzi F., Dongyu L., Xuan W.: *Forward and reverse combustion gasification of coal with production of high-quality syngas in a simulated pilot system for in situ gasification. Applied Energy* 2014, 131, 9-19.
- [5] Wiatowski M., Stańczyk K., Świądrowski J., Kapusta K., Cybulski K., Krause E., Grabowski J., Rogut J., Howaniec N., Smoliński A.: *Semi-technical underground coal gasification (UCG) using the shaft method in Experimental Mine "Barbara". Fuel* 2012, 99, 170-179.
- [6] Yang L., Zhang X., Liu S., Yu L., Zhang W.: *Field test of large-scale hydrogen manufacturing from underground coal gasification (UCG). International Journal of Hydrogen Energy* 2008, 33, 1275-1285.
- [7] Swan Hills Synfuels. *Swan Hills In-situ coal gasification technology development final outcomes report. Alberta Innovates - Energy and Environment Solutions Report* 2012.
- [8] Mocek P., Stańczyk K.: *Analiza techniczno-ekonomiczna pilotowej elektrociepłowni zasilanej gazem PZW i węglem. Energetyka* 4(2016)244-248.
- [9] Dziunikowski K.: *Doświadczenia nad podziemnym zgazowaniem węgla w laboratoryjnym gazogeneratorze. Komunikat GIG nr 182(1956)*.
- [10] Dziunikowski K.: *Podstawy interpretacji procesów fizykochemicznych w podziemnym zgazowaniu węgla powietrzem i ich obraz w przeprowadzonych doświadczeniach. Komunikat GIG nr 246(1960)*.
- [11] Rauk J.: *Zależność wartości opałowej i składu gazu z podziemnego zgazowania węgla kamiennego od wilgotności gazu. Prace GIG, Komunikat nr 305 (1962)*.
- [12] Rauk J.: *Badanie temperatury i stopnia odgazowania calizny węglowej w podziemnym zgazowaniu węgla kamiennego. Prace GIG, Komunikat nr 336 (1964)*.
- [13] Rauk J.: *Optymalne wymiary generatora przy podziemnym zgazowaniu węgla powietrzem. Prace GIG, Komunikat nr 660 (1976)*.
- [14] *Gaz niekonwencjonalny w Polsce - prawo, środowisko i społeczeństwo. Raport fundacji Czysta Energia za rok 2013.*
- [15] Mocek P., Zamiar R., Jachimczyk R., Gowarzewski R., Świądrowski J., Gil I., Stańczyk K.: *Selected issues of operating 3 MW underground coal gasification installation. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, 17(2015)427-434.
- [16] Stańczyk K., Smoliński A., Kapusta K., Świądrowski J., Wiatowski M., Kotyba A.: *Dynamic experimental simulation of hydrogen oriented underground gasification of lignite. Fuel* 11(2010)3307-3314.
- [17] M. Wiatowski, K. Kapusta, J. Świądrowski, K. Cybulski, M. Ludwik-Pardała J. Grabowski, K. Stańczyk *Technological aspects of underground coal gasification in the Experimental "Barbara" Mine, FUEL* 159 (2015) 454-462.
- [18] Wiatowski M., Stańczyk K., Świądrowski J., Kapusta K., Cybulski K., Krause E., Grabowski J., Rogut J., Howaniec N., Smoliński A.: *Semi-technical underground coal gasification (UCG) using the shaft method in Experimental Mine "Barbara". Fuel*, 2012, 99, 170-179.
- [19] Mocek P., Gil I.: *Process analysis of underground coal gasification in existing and abandoned mine. Chemik*, 69(2015)827-839.
- [20] Mocek P., Gil I.: *Przesył gazu z podziemnego zgazowania węgla. Przegląd Górniczy* 2(2013)107-115.
- [21] Mocek P., Gil I.: *Komora spalania gazów o niskiej wartości opałowej. Energetyka Gazowa* 2016. Tom I. 263-273. ISBN 978-83-64497-03-2.