



Karol WOJCIECHOWSKI*

Geofizyczne monitorowanie procesu podziemnego zgazowania węgla brunatnego

Streszczenie: Z powodu bezszybowego dostępu do złoża skuteczne przeprowadzenie procesu podziemnego zgazowania węgla brunatnego wymaga ciągłego monitorowania geofizycznego. Odpowiada ono za identyfikację położenia frontu zgazowania, modelowanie powstałej kawerny, określenie wpływu gazogeneratora na warstwy nadkładu i osiadanie terenu, jak również pomaga w wykryciu przypuszczalnych ucieczek gazu. Należy wspomnieć, że środowisko naukowe nie wypracowało optymalnego i standaryzowanego systemu monitorowania procesu podziemnego zgazowania węgla brunatnego. Niniejszy artykuł skupia się na wyborze metody obserwacji zjawiska zgazowania dopasowanej do warunków geologicznych towarzyszących polskiemu węglom brunatnym. Rozpatrywana technologia zgazowania dedykowana jest przede wszystkim pozabilansowym, zawodnionym i zapiaszczonym pokładom węgla brunatnego, występującym w sąsiedztwie utworów ilastych, które za zadanie mają stanowić izolację dla planowanego georeaktora. Wybór metody opiera się na charakterystycznych warunkach panujących w okolicy gazogeneratora, które wywołują lokalne anomalie geofizyczne. Warunki te to przede wszystkim oddziaływanie termiczne gazogeneratora, które wpływa na przewodnictwo elektryczne, porowatość, przepuszczalność, gęstość, czy prędkość rozchodzenia się fal. W efekcie jako najbardziej perspektywiczną metodę wybrano tomografię elektrooporową, która umożliwia niemalże automatyczne monitorowanie procesu. Zaproponowano również metodykę prowadzenia badań, dopasowaną do najbardziej perspektywicznych technologii podziemnego zgazowania węgla brunatnego.

Słowa kluczowe: podziemne zgazowanie, węgiel brunatny, geofizyka, tomografia elektrooporowa, geofizyka otworowa, magnetotelluryka.

Geophysical monitoring of the underground brown coal gasification

Abstract: Effective implementation of the brown coal underground gasification process requires continuous geophysical monitoring due to the shaft free access to deposits. Geophysical monitoring is responsible for identifying the gasification front location, modeling formed caverns, determining the impact of the gasifier at layers of overburden and subsidence, as well as helping to detect possible gas escapes. It should be noted that the scientific community did not develop optimal and standardized systems of brown coal underground gasification monitoring. This paper is focused on selecting the gasification monitoring method adapted to the geological

* Mgr, KGHM CUPRUM sp. z o.o. Centrum Badawczo-Rozwojowe, Wrocław; e-mail: kwojciechowski@cuprum.wroc.pl.

conditions accompanying the Polish brown coals. The considered gasification technology is primarily dedicated to off-balance sheet, water-logged and gritty decks of brown coal, occurring near the loams designed to provide insulation for the planned gasifier. The method choice is based on the specific conditions prevailing in the gasifier area, which cause local geophysical anomalies. These conditions are primarily the thermal impact of gasifier which affects the electrical conductivity, porosity, permeability, density, and the waves propagation speed. As a result, electrical resistivity tomography was chosen as the most perspective method which allows for an almost automatic monitoring process, thus it allows the gasifier's impact on the surroundings to be observed at a relatively low cost. The research methodology, adapted to the most promising technology of brown coal underground gasification was also proposed.

Keywords: underground coal gasification, lignite, geophysics, monitoring, cross borehole electrical resistivity tomography, magnetotellurics

Wprowadzenie

Podziemne zgazowanie węgla stało się tematem zaawansowanych badań i analiz, których celem jest powstanie instalacji przemysłowych, z przynajmniej dwóch powodów. Pierwszy, o którym należy wspomnieć, to wprowadzona w 1992 r. Ramowa Konwencja Narodów Zjednoczonych w Sprawie Zmian Klimatu, która była początkiem międzynarodowej współpracy dotyczącej ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Efektem konwencji było podpisanie tzw. Protokołu z Kioto przez 192 państwa (w tym Polskę). Drugim istotnym powodem są aspekty ekonomiczne, które wskazują niższą cenę gazu syntezowego otrzymywanego ze zgazowania od obowiązujących cen gazu ziemnego. Wzmoczone zainteresowanie Polski procesem podziemnego zgazowania węgla wydaje się być rzeczą naturalną, wynikającą z chęci dywersyfikacji źródeł energii, jak i zaangażowania się w badania nad rozwojem czystych technologii węglowych (w ramach Europejskiego Instytutu Innowacji i Technologii). Podziemne zgazowanie węgla to nie tylko niższe emisje gazów cieplarnianych, ale również szerokie zastosowanie otrzymywanego produktu, zaczynając od produkcji prądu a kończąc na produkcji syntetycznego paliwa odrzutowego. Mobilność instalacji podziemnego zgazowania pozwala na zastosowanie tej technologii w rejonach, gdzie występują pozabilansowe (dla wydobycia tradycyjnego) pokłady węgla (głównie brunatnego), jak i złoża o ograniczonej dostępności (np. złożo pod Legnicą).

Dostępnych technologii podziemnego zgazowania węgla jest kilka, jednak wszystkie wiążą się ze zminimalizowanym dostępem do złoża, na którym przeprowadzane jest zgazowanie. Ogranicza to możliwość monitorowania i sterowania trwającym procesem, które jest dla niego kluczowe. W zależności od warunków panujących w podziemnym gazogeneratorze dobiera się parametry (np. stężenie) mediów zgazowujących. Zastosowanie metod geofizycznych pozwala na rozwiązanie licznych trudności napotykaných w trakcie procesu podziemnego zgazowania, takich jak: zlokalizowanie frontu zgazowania, modelowanie powstałej kawerny, wpływ gazogeneratora na warstwy nadkładu i osiadanie terenu czy identyfikacja przypuszczalnych ucieczek gazu. Należy wspomnieć, że środowisko naukowe nie wypracowało optymalnego i standaryzowanego systemu monitorowania procesu podziemnego zgazowania. Niniejszy artykuł skupia się na wyborze metody obserwacji zjawiska zgazowania dobranej do warunków geologicznych towarzyszących polskim węglom brunatnym i przedstawia metodykę jego prowadzenia.

1. Metoda eksploatacji

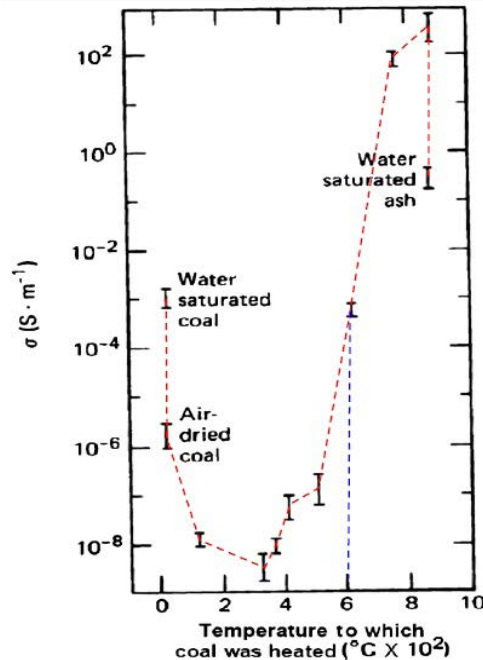
Podziemne zgazowanie węgla może być realizowane różnymi metodami, w zależności od dostępu do złoża i skuteczności danej metody w konkretnych warunkach. Podziemne gazogeneratory tworzy się w dwóch technologiach:

- szybowej (opływowa – chodnikowa) – stosowana w funkcjonujących bądź nieczynnych kopalniach głębinowych, polegająca na zgazowaniu fragmentów pokładu między istniejącymi chodnikami. W Polsce pierwsze badania procesu podziemnego zgazowania węgla kamiennego tą metodą zostały przeprowadzone w ramach projektu HUGE realizowanego w doświadczalnej kopalni Barbara w Mikołowie przez Główny Instytut Górnictwa. Ostatnio (w 2014 roku) rozpoczęto również eksperyment podziemnego zgazowania metodą szybową w kopalni KWK Wieczorek.
- bezszybowej (otworowa – ciśnieniowa) – polegająca na wykonaniu przynajmniej dwóch otworów wiertniczych sięgających pokładu węgla. Jeden otwór wykorzystywany jest do wtłaczania pod ciśnieniem czynnika zgazowującego, a drugi służy do odbioru syngazu, powstałego w efekcie zgazowania. W badaniach polowych i analizach teoretycznych rozważano różne warianty i geometrie prowadzenia procesu. Dla warunków polskich, na potrzeby tego opracowania, przyjęto jedną z najstarszych technologii zgazowania, tj. siatkę otworów eksploatacyjnych i zasilających (ang. LVW). Metoda bezszybowa jest metodą najbardziej perspektywiczną w przypadku wykorzystania pokładów węgla brunatnego.

Dobór metody monitorowania geofizycznego w dużej mierze zależy od warunków występowania i parametrów złoża węgla brunatnego rozpatrywanego do eksploatacji metodą podziemnego zgazowania. W związku z brakiem konkretnych i jednomyślnie przyjętych wytycznych dotyczących złóż węgla brunatnego kwalifikujących się do procesu, na potrzeby artykułu założono własne kryteria, tj. minimalną miąższość pokładu wynoszącą 1 m, a głębokość jego zalegania przekraczającą 150 metrów.

2. Warunki panujące w sąsiedztwie gazogeneratorsa i jego wpływ na parametry fizyczne skał

Dla doboru metody monitorowania przebiegu procesu kluczowym zagadnieniem są warunki panujące w okolicy gazogeneratorsa. Wpływ tych warunków na konkretne parametry fizyczne skał determinuje wybór metody odpowiednio dobranej pod kątem detekcji powstałych anomalii. Temperatura panująca w gazogeneratorsie osiąga nawet 1000°C i powoduje spękania czy zmiany mineralne obrazujące się wahaniami w wartościach porowatości i przepuszczalności. Oprócz temperatury w trakcie procesu zmienia się nasycenie gazem i wodą. Czynniki te wpływają na takie parametry jak: gęstość, przewodność elektryczna czy prędkość rozchodzenia się fal. Największe anomalie wywołane wpływem temperatury odznaczają się na wartościach oporu. Poniżej 600°C węgiel traci wodę, przez co jest mniej przewodni od węgla nasyconego. Powyżej 600°C węgiel potrafi być 100 000 razy lepiej konduktywny od węgla nasyconego wodą (np. od 0,001 S/m do 100 S/m). Przy temperaturze powyżej 300°C zaczyna zachodzić piroliza, skutkiem której względna zawartość pozostałości węglowej wzrasta co wyraźnie wpływa na przewodność elektryczną.



Rys. 1. Zmiana przewodności elektrycznej węgla pod wpływem temperatury (Mellors i in. 2014)

Fig. 1. Change in conductivity of coal under the influence of temperature (Mellors et al. 2014)

3. Perspektywiczne metody do zastosowania w ramach monitorowania procesu podziemnego zgazowania węgla brunatnego

Po przeanalizowaniu światowych doświadczeń w zakresie monitorowania przebiegu procesu podziemnego zgazowania węgla, wytypowano i zestawiono najbardziej perspektywiczne metody, które można zastosować do jego obserwacji:

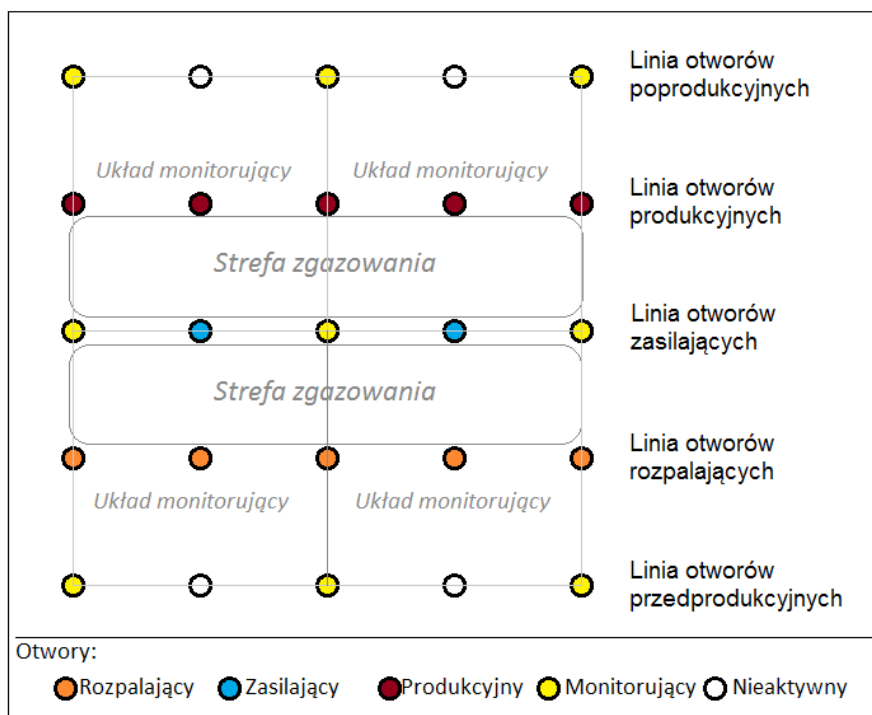
- Mikrogravimetria: skuteczna metoda obrazująca rozkład defektów masy powstały na skutek zgazowania. Niestety, jej zasięg głębokościowy jest silnie ograniczony, z tego powodu zastosowanie jej dla warunków towarzyszących podziemnemu zgazowaniu węgla brunatnego jest dyskusyjne. Istnieje możliwość zastosowania grawimetrów otworowych, jednak wymagana gęstość siatki skutkuje możliwością rozszczelnienia gazogeneratora tworząc dużą liczbę przypuszczalnych dróg migracji gazu. W przypadku takiego rozwiązania kolejnym negatywnym aspektem byłyby koszty związane z wierceniami. Same pomiary są czasochłonne i wiążą się z dużymi kosztami prac, dlatego metoda ta byłaby nieskuteczna do ciągłego monitorowania procesu. Istnieje jej inne, potencjalne wykorzystanie w ramach obrazowania wpływu podziemnego gazogeneratora na warstwy znajdujące się nad nim, jednak do samego monitorowania georeaktora zaleca się wybór innej metody.

- Magnetotelluryka: dobra metoda do wykorzystania przy badaniach związanych z podziemnym zgazowaniem węgla brunatnego. Spowodowane jest to dużą zmianą oporności na skutek oddziaływania temperatury. Dzięki temu pomiary powinny identyfikować położenie gazogeneratora, zwłaszcza biorąc pod uwagę wpływ warunków panujących w jego okolicy, czyli rosnącą przewodność elektryczną rozgrzanego węgla. Zasięg jego oddziaływania powinien być również wykryty z powodu wysychania utworów otaczających. Należy również wspomnieć o negatywnych stronach metody magnetotellurycznej. Jedną z nich jest brak możliwości identyfikacji pokładów węgla brunatnego (w nienaruszonym stanie), ponieważ jego oporność jest podobna do tej, którą posiadają towarzyszące im. Zdecydowanie większym problemem jest jednak rozdzielczość tej metody. Stanowi ona od 5 do 20% zasięgu głębokościowego, czyli dla wyidealizowanego przypadku, na głębokości 150 m rozdzielczość będzie wynosić między 7,5m a 30m. Biorąc pod uwagę małą miąższość pozabilansowych pokładów węgla brunatnego jest ona niewystarczająca. Już w latach 80. XX wieku, przeprowadzone badania wykazały niską efektywność tej metody dla pokładów zlokalizowanych głębiej niż 100 metrów. Można ją jednak zastosować, aby zidentyfikować wpływ i zasięg oddziaływania gazogeneratora na warstwy nadkładu, w tym na warstwy wodonośne.
- Sejsmoelektryka: w trakcie procesu podziemnego zgazowania węgla brunatnego sygnał sejsmoelektryczny powstaje na granicy gazogeneratora (wypełnionego gazem) a warstwami materiału skalnego. Im większa jest zmiana parametrów elektrycznych, tym lepsza jest reakcja. Ponieważ zachodzi duża zmiana właściwości elektrycznych pomiędzy skałami otaczającymi gazogenerator a gazem znajdującym się w jego wnętrzu, to wytwarzany jest gradient reakcji (od wysokiego przewodnictwa do bardzo niskiego). Dzięki tym zależnościom metoda ta jest w stanie wskazać położenie gazogeneratora, jego rozmiar i kształt. Jest to jedna z najnowszych metod geofizycznych, której początki na świecie sięgają roku 2006, a w Polsce pierwsze pomiary w poszukiwaniu cieków wodnych wykonano w 2010 r. Metoda została wykorzystana przy pilotażowej instalacji podziemnego zgazowania w Australii. Projekt zlokalizowany jest w Bloodwood Creek, a prowadzi go Australijska firma Carbon Energy. Z powodu znacznej różnicy w warunkach geologicznych Polski i Australii (choćby różnica w wilgotności utworów) metoda ta wymaga specjalistycznej analizy. Nie nadaje się ona również do ciągłego monitorowania, ponieważ wymaga czasochłonnych i kosztownych pomiarów.
- Mikrosejsmika: rozważania teoretyczne, dotyczące wykorzystania tej metody do monitorowania procesu podziemnego zgazowania, bazują na rejestracji zjawisk mikrosejsmicznych występujących w trakcie eksploatacji złóż węgla. Grupą takich zdarzeń są pojawiające się zawały stropu, wywołane wpływem temperatury i formującej się kawerny w trakcie procesu. Zjawiska te powinny z największą intensywnością pojawiać się w samym gazogeneratorze, ale również mogą pojawić się w warstwie izolacyjnej, dzięki czemu mogą nieść informacje o jej stanie. Monitorowanie mikrosejsmiczne dla procesu podziemnego zgazowania jest badane głównie w Wielkiej Brytanii, ponieważ eksperymenty tam przeprowadzone są zorientowane na zgazowanie węgla kamiennego, występującego w mniej sprężystych warunkach. Dla węgla brunatnego metoda ta wydaje się mniej skuteczna z powodu jego większej

plastyczności. Decydującą rolę powinien odegrać również tłumiący charakter utworów otaczających polskie pokłady węgla brunatnego. Detekcja mikrozwłask w takim środowisku powinna być zdecydowanie trudniejsza od tych występujących w pokładach węgla kamiennego na głębokości około 600 m. Należy jednak przyglądać się badaniom brytyjskim, gdyż monitorowanie potencjalnych zawałów stropu występujących w trakcie podziemnego zgazowania węgla jest jednym z istotniejszych aspektów.

- Tomografia elektrooporowa: modele teoretyczne wykazują olbrzymią efektywność tej metody w monitorowaniu podziemnego zgazowania węgla. Wynika to z jej wrażliwości na zmiany saturacji (gaz/woda) i zmiany temperatury, czyli kluczowe czynniki towarzyszące procesowi. Dostarcza ona przekrój oporności, który uwydatnia oddziaływania termiczne. Dzięki temu metoda ta zapewnia dużą skuteczność przy identyfikacji gazogeneratora czy jego wpływu na otaczające warstwy. Uwzględniając możliwość niemalże automatycznego monitorowania w skali dnia czy nawet godzin, przy minimalnym wzroście kosztów, należy uznać tę metodę jako wysoce perspektywiczną przy monitorowaniu podziemnego zgazowania węgla.

Każda z przytoczonych metod wymaga osobnej analizy dla konkretnych instalacji i warunków im towarzyszących. Można jednak wstępnie wytypować metody najbardziej perspektywiczne. Dla podziemnego zgazowania węgla brunatnego na terenie Polski taką



Rys. 2. Siatka otworów dla podziemnego zgazowania metodą LVW z uwzględnieniem układu monitorującego

Fig. 2. The lattice of boreholes for the LVW method of underground gasification in view of the monitoring system

metodą może być tomografia elektrooporowa. Jej największym atutem jest możliwość ciągłej obserwacji rozwoju gazogeneratora i przemieszczającego się frontu zgazowania. Dodatkowymi zaletami są niski koszt i możliwość identyfikacji zasięgu oddziaływania termicznego. Alternatywnymi metodami są sejsmoelektryka i magnetotelluryka, jednak możliwość ich zastosowania jest silnie zdeterminowana przez warunki panujące w instalacji docelowej.

4. Metodyka prowadzenia monitorowania

Monitorowanie procesu podziemnego zgazowania węgla brunatnego powinno opierać się na metodzie tomografii elektrooporowej. Przy jej zastosowaniu główne koszty związane są z utworzeniem siatki otworów na aparaturę pomiarową wokół instalacji. W celu minimalizacji kosztów, zamiast odwiertów służących tylko do monitorowania, można wykorzystać już istniejące otwory produkcyjne. Dla metody LVW (pionowych odwiertów zasilających i produkcyjnych) przewiduje się gęstą siatkę, dla której maksymalna odległość między otworami wynosi 30 metrów. W ramach monitorowania wykorzystać należy te z nich, które są już wyłączone z procesu zgazowania, gdyż front przemieścił się poza ich zasięg.

Skuteczność kontroli procesu podziemnego zgazowania węgla brunatnego wymaga monitorowania w celu obserwacji samego gazogeneratora, jak również jego stropu i spągu. Z tego powodu zaleca się rozmieszczenie elektrod na całej długości warstw izolujących, tak aby pomiar uwzględniał pokład węgla oraz poziom nad- i podwęglowy.

Podsumowanie

W niniejszym artykule wskazano najbardziej perspektywiczne metody geofizyczne, które można zastosować do obserwacji procesu podziemnego zgazowania węgla brunatnego. Wytypowano również efektywną metodę do tego celu. Jest to tomografia elektrooporowa. Zapewnia ona dużą skuteczność przy identyfikacji granic gazogeneratora, jak również umożliwia ciągły podgląd procesu. Dodatkowo pozwala obserwować wpływ gazogeneratora na otaczający ośrodek i cechuje się stosunkowo niskimi kosztami. Jako alternatywna metoda wybrana została sejsmoelektryka, która jednak wymaga adaptacji do warunków, jakie towarzyszą polskim węglom brunatnym. Również jako alternatywna, mniej dokładna metoda, wytypowana została magnetotelluryka. Pozostałe metody (np. mikrograwimetria) mogą służyć do badań pomocniczych, jednak trudno je wykorzystać do ciągłego monitorowania procesu podziemnego zgazowania.

Literatura

- Mellors i in. 2014 – Mellors, R., Yang, X., White, J.A., Ramirez, A., Wagoner, J. i Camp, D.W. 2014. Advanced geophysical underground coal gasification monitoring. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 21(4), s. 487–500.
- Burton i in. 2005 – Burton, E.J., Friedmann, J.R., i Upadhye, R. 2005. *Best Practices in Underground Coal Gasification*. Livermore: Wyd. Lawrence Livermore National Laboratory.
- Kotyrbka i in. 2015 – Kotyrbka, A., Kortas, Ł. i Stańczyk, K. 2015. Imaging the Underground Coal Gasification Zone with Microgravity Surveys. *Acta Geophysica* 63(3), s. 634–651.
- Bartel i in. 1984 – Bartel, L.C., Davidson, G.S., Jacobson, R.D. i Uhl, J.E. 1984. Results from Using the CSAMT Technique to Monitor the Tono UCG Experiment. *In Situ* 9(3), s. 293–328.
- Revil i in. 2015 – Revil, A., Jardani, A., Sava, P. i Haas, A. 2015. *The Seismoelectric Method: Theory and Application*. Hoboken: Wyd. Wiley-Blackwell.
- Britten, J.A., i Thorsness, C.B. 1989. A model for cavity growth and resource recovery during underground coal gasification. *In Situ* 13, s. 1–53.