

Podziemne zgazowanie węgla kamiennego – aspekty środowiskowe, zdrowotne, społeczne i ekonomiczne

Underground coal gasification – environmental, health, social and economic aspects



Mgr Aleksandra Tokarz*)



Dr inż. Jacek Grabowski*)



Mgr inż. Dariusz Nowak*)

Treść: Proces podziemnego zagazowania węgla podobnie jak tradycyjne górnictwo węglowe powinien być prowadzony zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju. Artykuł stanowi przegląd najważniejszych kwestii związanych ze wszystkimi aspektami zrównoważonego rozwoju, na który składają się aspekty środowiskowe, społeczne i ekonomiczne podczas procesu zgazowania węgla.

Abstract: The process of underground coal gasification just as traditional coal mining must be performed in accordance with the principles of sustainable development. This paper is an overview of key issues related to all aspects of sustainable (environmental, economic and social) development of underground coal gasification process.

Słowa kluczowe:

podziemne zgazowanie węgla (PZW), zrównoważony rozwój, georeaktor

Key words:

underground coal gasification (UCG), sustainable development, georeactor

1. Wprowadzenie

Człowiek przez ostatnie stulecia przyczynił się do znacznej degradacji środowiska, co spowodowało nasilenie się szeregu niekorzystnych, często nieodwracalnych procesów. W ciągu ostatnich lat nastąpiła zmiana w świadomości na rzecz ochrony środowiska oraz zrównoważonego gospodarowania zasobami naturalnymi. W celu poprawy skuteczności wydobycia i przetwarzania węgla kamiennego posłużono się technologią podziemnego zgazowania węgla. Czynnikiem, które powinny przekonać nasz kraj do rozwoju technologii zgazowania węgla są niedobory tradycyjnych paliw energetycznych, konieczność ochrony środowiska oraz względy ekonomiczne.

Podziemne Zagazowanie Węgla (PZW) jest procesem, który może być prowadzony zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju. Na zasady zrównoważonego rozwoju składa się konkurencyjność w stosunku do tradycyjnych metod pozyskiwania energii z paliw kopalnych, polegająca

na efektywnym ekonomicznie wykorzystaniu dostępnych zasobów, redukcji negatywnego wpływu na środowisko (ograniczenie emisji dwutlenku węgla, pyłów, tlenków siarki oraz tlenków azotu powstałych podczas zgazowania węgla, braku wydobycia odpadów na powierzchnię i przeobrażania powierzchni terenu).

Wpływ na środowisko procesu zgazowania węgla *in situ* obejmuje aspekty wizualne, akustyczne, emisję do atmosfery i skutki podziemne. Jak każdy proces dotyczący ekstrakcji geologicznej, warunków geologicznych i hydrogeologicznych istniejące zagrożenie musi być efektywnie zarządzane. Działania te powinny prowadzić do poprawy warunków życia zarówno pracowników z uwzględnieniem bezpieczeństwa pracy, jak i lokalnej społeczności. Wpływ technologii podziemnego zgazowania węgla na środowisko należy analizować od etapu projektowania z uwzględnieniem warunków geologiczno-górnich poprzez etapy realizacji procesu i co najważniejsze do zakończenia eksploatacji i likwidacji działalności georeaktora.

*) Główny Instytut Górnictwa w Katowicach

2. Ocena wpływu technologii podziemnego zgazowania węgla z uwzględnieniem aspektów środowiskowych

2.1. Wpływ technologii podziemnego zgazowania węgla (PZW) na środowisko

Wdrożenie w skali przemysłowej technologii PZW zarówno w czasie realizacji procesu, jak i w okresie wielu lat po jego zakończeniu w porównaniu do procesów prowadzonych konwencjonalnie na powierzchni może spowodować zmiany w środowisku naturalnym.

2.1.1. Zagrożenia w górotworze i oddziaływanie na powierzchnię

Podczas prowadzenia zgazowania węgla, zachodzi zmiana w zakresie chemizmu, pH, właściwości i struktury otaczających skał pod wpływem temperatury przekraczającej 1200 °C w strefie georeaktora. Istnieje niebezpieczeństwo powstawania pożarów oraz wystąpienia drgań i wstrząsów górotworu prowadzących do powstania spękań i stref rozluźnionych mogących mieć wpływ na powstanie wycieku lub nagłych emisji gazu. Ubytek masy złoża węgla, jeżeli nie zostanie odpowiednio zabezpieczony, może przyczynić się do powstania deformacji na powierzchni pod wpływem zaburzenia ciągłości warstw stropowych i zapadania się nadkładu do strefy zgazowanej.

2.1.2. Warunki hydrogeologiczne

Dopływ wód podziemnych do strefy zgazowanej powoduje zagrożenie skażeniem wód podziemnych lub powierzchniowych w wyniku niekontrolowanego przedostania się toksycznych związków do wód [2, 6]. Występowanie skał nieprzepuszczalnych w przestrzeni georeaktora ma zapewnić izolację georeaktora od wpływu wód podziemnych. Wykorzystanie głębokich pokładów węgla zwiększa prawdopodobieństwo istnienia wysokiego ciśnienia hydrostatycznego. Warunki takie pozwalają na zmniejszenie zagrożenia wynikającego z wycieku gazu z georeaktora i na uniknięcie skażenia wód podziemnych w różnych warstwach wodonośnych. Na skutek przerwania ciągłości skał nadkładu może dojść do powstania nowych połączeń hydraulicznych przyczyniających się do ucieczki generowanych gazów i toksycznych produktów z procesu do górotworu.

Proces zgazowania w warunkach *in situ* wymaga mniejszej ilości wody surowej w stosunku do konwencjonalnego wydobycia węgla, część tej wody można wyodrębnić jako kondensat i ponownie wykorzystywać do celów chłodzenia. Woda zużywana na potrzeby procesu pochodzić będzie z głębokich warstw wodonośnych, nienadających się do spożycia przez ludzi lub zwierzęta.

Skażenie wód podziemnych może nastąpić w przypadku, gdy pokład węgla poddany zgazowaniu usytuowany będzie w warstwie wodonośnej lub kiedy warstwa wodonośna występować będzie powyżej pokładu węgla poddanego zgazowaniu i gdy zaistnieje zagrożenie powstaniem osiadania, oraz w przypadku, gdy warstwa wodonośna znajdować się będzie powyżej pokładu węgla poddanego zgazowaniu, ale poza obszarem wystąpienia potencjalnego osiadania. Najbezpieczniejsze warunki zostaną spełnione przy braku warstwy wodonośnej oraz kiedy warstwy wodonośne wystąpią tylko pod pokładem węgla poddanego zgazowaniu [3].

2.1.3. Powstawanie zanieczyszczeń w wodach

Proces PZW generuje gazowe i ciekłe zanieczyszczenia będące produktem procesu zgazowania i pirolizy w powstającej kawernie podczas procesu:

– składniki gazowe, głównie H_2 , CH_4 , CO , CO_2 oraz węglo-

wodory wyższego rzędu, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA), amoniak,

- skondensowane pary (substancje smoliste),
- stała pozostałość procesowa (koks, popiół).

2.1.3.1. Identyfikacja zanieczyszczeń w strefie podziemnego zgazowania węgla

Badania wód podziemnych poddanych działaniom produktów powstałych podczas podziemnego zgazowania węgla wykazały powstawanie zanieczyszczeń pochodzenia organicznego, jak również zanieczyszczeń pochodzenia nieorganicznego:

- zanieczyszczenia pochodzenia organicznego – najczęstszymi zanieczyszczeniami pochodzenia organicznego w wodach podziemnych generowanymi podczas prowadzenia podziemnego zgazowania węgla są związki fenolowe [5, 7]. Fenol wpływa toksycznie na większość mikroorganizmów, już w stosunkowo niskich stężeniach (5–15 mg/l).
- zanieczyszczenia pochodzenia nieorganicznego – składniki popiołu w kawernie, ulegając rozpuszczaniu w wodzie, powodują zwiększanie się całkowitej zawartości substancji stałych składających się w szczególności z jonów wapnia, sodu, siarczanów i wodorowęglanów. Ilość zanieczyszczeń pochodzenia nieorganicznego uzależniona jest od składu węgla i popiołu, temperatury zgazowania i jakości wody naturalnej.

2.1.3.2. Migracja zanieczyszczeń w wodach podziemnych i proces samooczyszczania się wód

Po zakończeniu zgazowania węgla w warunkach *in situ* istnieje zagrożenie przenikaniem wody do kawerny i wymywania zanieczyszczeń z popiołu i kawerny do górotworu [7]. Transport ciekłych zanieczyszczeń zależy od geologicznego otoczenia georeaktora, przepuszczalności otaczających skał i hydrogeologii obszaru. Dlatego ważnym elementem jest określenie wpływu powstałych produktów podczas podziemnego zgazowania węgla na środowisko oraz oszacowanie kinetyki rozpuszczania CO_2 , jak i migracji gazu w złożu [17].

Przeprowadzone badania podczas podziemnego zgazowania węgla wykazują, że ilość zanieczyszczeń zmniejsza się wraz z upływem czasu (tablica 1) i odległością od kawerny (tablica 2). Tablica 1 przedstawia dane zebrane z analizy próbek wody pobranych ze strefy poprocesowej w podziemnym zgazowaniu [7, 8].

Wyniki badań wykazały, że zanieczyszczenia w wodzie składają się głównie z fenoli, węglowodorów aromatycznych, związków heterocyklicznych, kwasów aromatycznych karboksylowych, ketonów, aldehydów, pirydyny, chinoliny, izochinoliny i amin aromatycznych [6]. Malejące stężenie fenoli w wodach podziemnych w zależności od odległości od kawerny i czasu od zakończenia zgazowania przedstawia tablica 2 [7, 8]. Badania symulacyjne prowadzone w Głównym Instytucie Górnictwa wykazały, że prędkość rozprzestrzeniania się fenoli w gruntach słabo przepuszczalnych pozostaje prawie zerowa po upływie 50 lat dla odległości 10 m od granicy georeaktora [13].

W procesie PZW powstają również zanieczyszczenia nieorganiczne, z których najważniejszą grupę stanowią metale ciężkie, amoniak oraz cyjanki. Stężenia zanieczyszczeń, w skład których wchodzi kationy sodu Na^+ , potasu K^+ , magnezu Mg^{2+} i jonu amonowego NH_4^+ oraz anionów, tj jony siarczanowe SO_4^{2-} , aniony wodorowęglanowe HCO_3^- i aniony chlorkowe Cl^- maleją z czasem. Wyjaśnieniem poprawy jakości wód jest adsorpcja, wymiana jonowa oraz reakcje wytrącania, rozcieńczenia i dyspersji podczas przepływu wód podziemnych, jak i w wyniku reakcji biologicznej przemiana-

Tablica 1. Zanieczyszczenia pochodzenia organicznego wód podziemnych podczas podziemnego zgazowania węgla [7, 8]
Table 1. Organic pollution of groundwater during underground coal gasification [7, 8]

Składnik		Zawartość substancji organicznej, mg/l		
		przed zgazowaniem	zaraz po zakończeniu zgazowania	rok od zakończenia zgazowania
Fenole		7	100 000	20
Związki heterocykliczne		nie wykryto	2 200	nie wykryto
Węglowodory aromatyczne	2-pierścieniowe	2	105	9
	3-pierścieniowe	1	22	5
	4-pierścieniowe	nie wykryto	7	nie wykryto
	5-pierścieniowe	nie wykryto	3	nie wykryto
Całkowita zawartość substancji organicznej		10	103	34

Tablica 2. Zmniejszanie się zawartości fenoli w wodach podziemnych wraz z odległością od komory zgazowania i czasu po zakończeniu zgazowania, mg/l [7, 8]

Table 2. The reduction of the content of phenols in groundwater with the distance from the gasification chamber and the time after gasification, mg/l [7, 8]

Czas po zakończeniu zgazowania d	Odległość od komory zgazowania, m		
	3	15	30
3	8	0,09	0,008
83	0,6	0,03	0,004
182	0,09	0,007	<0,001
280	0,04	0,003	<0,001
762	0,02	0,001	<0,001

ny. Procesy biologicznej przemiany pozwalają na końcową destrukcję lub przekształcenie szkodliwych substancji w nieszkodliwe produkty. Tablica 3 przedstawia dane dotyczące wzrostu zanieczyszczeń nieorganicznych w wodach podczas podziemnego zgazowania [7].

Tablica 3. Zanieczyszczenia pochodzenia nieorganicznego wód podziemnych podczas podziemnego zgazowania węgla [7, 8]

Table 3. Inorganic pollution of groundwater during underground coal gasification [7, 8]

Składnik	Zawartość składników nieorganicznych, mg/l	
	przed zgazowaniem	po zgazowaniu
TDS	293	1462
Na ⁺	78	136
Ca ²⁺	8	94
SO ₄ ²⁻	5	625
HCO ₃ ⁻	275	385
Cl ⁻	9	338
NH ₃	7	163
F ⁻	0,2	5,3
B	—	2,2

2.1.4. Zanieczyszczenie powietrza

Na skutek przzerwania ciągłości skał nadkładu może dojść do powstania nowych połączeń hydraulicznych, w wyniku których zachodzić będzie konwekcja ciepła do górotworu oraz migracja powstałych gazów i toksycznych produktów z procesu. Istnieje zagrożenie skażeniem lub zanieczyszczeniem powietrza węglowodorami aromatycznymi, fenolami, amoniakiem w wyniku niekontrolowanej migracji gazu na powierzchnię. Uwalnianie się rtęci, arsenu, seleniu może negatywnie wpłynąć na jakość wody i powietrza w zależności od temperatury reakcji, rodzaju reakcji geochemicznych

zachodzących podczas procesu zgazowania, istniejących dróg migracji na powierzchnię [14].

W przypadku zanieczyszczenia atmosferycznego zagrożenie skażeniem może nastąpić w przypadku, kiedy proces zgazowania przebiegać będzie w poziomych pokładach węgla z występowaniem uskoków lub sieci spękań w pobliżu powierzchni, oraz gdy pokład węgla poddany zgazowaniu będzie silnie nachylony w górotworze bez połączenia z powierzchnią. Najbezpieczniejsze warunki zostaną spełnione, kiedy proces przebiegać będzie w poziomych pokładach węgla bez udziału spękań i uskoków, stanowiących potencjalne drogi migracji do powierzchni [3].

2.1.5. Transport i odpady poprocesowe

W procesie PZW powstaje znacznie mniej odpadów stałych niż w procesach konwencjonalnych. Pozytywnym aspektem jest wyeliminowanie przetwarzania i transportu węgla oraz pozostawienie produktów ubocznych w przestrzeni podziemnej. Popioły powstałe w procesie zgazowania pozostają pod ziemią, przyczyniając się do redukcji emisji oraz ilości odpadów stałych, w tym rtęci i cząstek stałych, w porównaniu do konwencjonalnych elektrowni węglowych [2].

2.2. Analiza zagrożenia podczas procesu podziemnego zgazowania węgla w zależności od głębokości prowadzenia procesu

W celu wyboru miejsca implementacji technologii PZW oraz oszacowania jej wpływu na środowisko i jakość życia należy uwzględnić lokalne warunki geologiczno-górnice i środowiskowe, do których należą:

- minimalna miąższość złoża (od 2 do 5 m),
- jakość węgla (np. zawartość popiołu, smoły, kaloryczność, wilgotność),
- nachylenie pokładu,
- głębokość zalegania złoża (zazwyczaj powyżej 200 m),
- forma i budowa złoża, ocena zaburzenia, ciągłość,

- parametry wytrzymałościowe skał nadkładu,
- parametry termiczne skał otaczających złoża węgla,
- parametry hydrogeologiczne skał otaczających,
- zagospodarowanie powierzchni terenu, gęstość zaludnienia, użytkowanie terenu,
- warunki hydrologiczne i hydrograficzne,
- wielkość dopuszczalnych osiadań,
- zasoby geologiczne złoża i warunki jego wykorzystania,
- odległości do starych zrobów kopalń zamkniętych lub zrobów kopalń eksploatujących metodami konwencjonalnymi.

W związku z powyższym należy przeprowadzić szczegółową analizę górotworu pod względem:

- charakterystyki geologicznej stropu i spągu pokładu węgla docelowego, w tym rozpatrzenie bocznej ciągłości, heterogeniczności, porowatości, przepuszczalności oraz ciągłości ograniczających warstwy nadkładu,
- charakterystyki fizycznej natury pokładu węgla, w tym głębokości, szerokości, miąższości i przepuszczalności, ze szczególnym uwzględnieniem potencjalnego rozmiaru i przestrzennej wielkości objętości kawerny,
- charakterystyki geochemicznej i mineralogicznej pokładu węgla i skały macierzystej w celu oceny potencjalnego zanieczyszczenia,
- przeprowadzenia testów na próbkach z pokładów węgla docelowych, w celu zidentyfikowania powstających gazów,
- identyfikacji i charakterystyki warstw wodonośnych wód podziemnych w górotworze, w tym ich składu chemicznego, kierunku przepływu wód podziemnych i przewodnictwa hydraulicznego,
- analizy laboratoryjnej termicznych i mechanicznych właściwości pokładów węgla docelowych i stratygrafii, w celu przeprowadzenia oceny potencjalnego zagrożenia objawiającego się osiadaniami powierzchni,
- oceny istniejących i potencjalnych stref uskokowych i spękań w celu ustalenia potencjalnych dróg migracji,
- oceny istniejących studni i odwiertów, ich lokalizacja, głębokość i stabilność podczas prowadzenia procesu PZW [3].

Mając na uwadze powyższe uwarunkowania należy stwierdzić, że proces PZW może stwarzać zagrożenie dla środowiska w obrębie występowania złóż:

- zalegających płytko (do 200 m),
- o znacznej miąższości (powyżej 20 m),
- o małej wartości współczynnika nadkładu (poniżej 10),
- w których skały nadkładu charakteryzują się znaczną wodoprzepuszczalnością,
- występujących w obrębie głównych zbiorników wód podziemnych,
- dla terenów zabudowanych i wyposażonych w infrastrukturę liniową.

Negatywne oddziaływanie na środowisko maleje wraz z głębokością zalegania złoża. Dlatego można stwierdzić, że technologia ta nie jest zalecana dla złóż zalegających płytko lub charakteryzujących się znaczną miąższością.

Zaletami prowadzenia głębokiego zgazowania jest zwiększenie odległości od strefy zgazowania do powierzchni. Wzrasta bezpieczeństwo dla środowiska ze względu na istnienie wielu barier, jakie stanowią warstwy skalne i formacje wodonośne. Koncepcja głębokiego zgazowania związana jest również ze zwiększeniem zasięgu i głębokości prowadzenia procesu w stosunku do technologii płytko przebiegającego zgazowania.

2.3. Środki służące zabezpieczeniu georeaktora podczas procesu PZW

2.3.1. Monitorowanie i kontrolowanie przebiegu procesu zgazowania

Elementy pozwalające na zaspokojenie wymogów ochrony środowiska to:

- zgazowanie węgla na głębokościach poniżej 350 m, a główne zasoby dla technologii zalegają poniżej 1000 m. Istniejący nadkład 200 m jest wystarczająco gruby i nieprzepuszczalny, aby nie zaistniała możliwość migracji gazów ku powierzchni,
- utrzymywanie leja depresji wód podziemnych wokół reaktora,
- właściwe rozpoznanie strukturalne i geomechaniczne skał w nadkładzie może znacznie zmniejszyć zagrożenie wynikające z osiadania poprzez identyfikację potencjalnych zagrożeń (np. istnienie nieciągłości warstw w nadkładzie), zgazowanie pokładu na dużej głębokości zmniejszy prawdopodobieństwo powstawania skutków osiadania,
- zapobieganie nadmiernemu powiększeniu się kawerny wokół otworów zasilających podczas prowadzenia procesu ze względu na zagrożenie wystąpienia zakłócenia integralności otworów iniekcyjnych i otworów z produktami w wyniku zapadnięcia się skał [1],
- niedopuszczanie do tworzenia rozległej kawerny po procesie, która mogłaby skutkować powstawaniem osiadania nadkładu i spękań [14].

Etap pooperacyjny jest stanem krytycznym dla zanieczyszczenia wód podziemnych. Ciśnienie i zanieczyszczenie wzrasta, gdy georeaktor zostaje wyłączony z eksploatacji. Dla takiego stanu georeaktora zaleca się:

- minimalizowanie powstawania zanieczyszczeń przy zastosowaniu przyspieszenia schładzania georeaktora i zapobieganiu zwiększania się ciśnienia po zakończeniu zgazowania,
- utrzymywanie przepływu wód podziemnych w kierunku georeaktora poprzez pompowanie wody z pustki za pomocą utrzymywania ciśnienia hydrostatycznego w kierunku obszaru reaktora,
- maksymalizację możliwości usuwania organicznych i nieorganicznych zanieczyszczeń wód podziemnych poprzez pompowanie i likwidację zanieczyszczeń metodami oczyszczania na powierzchni.

Kontrola warunków podczas procesu podziemnego zgazowania węgla może odbywać się przy zastosowaniu:

- monitorowania osiadania w czasie rzeczywistym, gdzie można zarówno śledzić zmiany na powierzchni i przewidywać potencjalne problemy; osiadanie może być monitorowane przy wykorzystaniu konwencjonalnych metod geofizycznych [1, 5, 14],
- wykorzystania otworów badawczych w celu monitorowania ciśnienia i składu chemicznego wody w celu określenia potencjalnego zanieczyszczenia wód gruntowych [1],
- prowadzenia monitoringu, który może zaalarmować operatorów do wczesnych nieprzewidzianych komplikacji w przestrzeni georeaktora i usprawnić sterowanie przebiegiem procesu konwersji węgla,
- zastosowania systemu monitoringu mogącego wykryć ucieczki gazu i pozwalającego na kontrolę i utrzymywanie ciśnienia reaktora poniżej ciśnienia hydrostatycznego,
- prowadzenia regularnej kontroli wody gruntowej i podziemnej w studniach i otworach zlokalizowanych w obszarze oddziaływania procesu PZW.

Prowadzenie stałego monitoringu i obserwacji przebiegu procesu umożliwi kontrolę warunków operacyjnych w geore-

aktorze i zapobieganie wycieku gazu. Zagrożenie wynikające z powstawania zanieczyszczeń oraz jakość produkowanego gazu można oszacować dla potencjalnych lokalizacji procesu.

Celem kontroli i prewencji skażenia wody jest prowadzenie monitoringu strefy procesu i jej otoczenia dla upewnienia się czy zanieczyszczenia mogą migrować ze strefy skażonej. Badania wykazały możliwości stosowania barier hydraulicznych oddzielających skażoną strefę i umieszczanie adsorbujących materiałów dla zatrzymania zanieczyszczeń.

2.3.2. Możliwości uszczelnienia górotworu wokół georeaktora

Warunkiem bezpiecznego dla ludzi i środowiska procesu podziemnego zgazowania węgla jest duża szczelność i wytrzymałość skał znajdujących się w otoczeniu georeaktora. Skały karbońskie rzadko spełniają te wymagania, dlatego należy wziąć pod uwagę zastosowanie prac uszczelniająco-wzmacniających.

Do podstawowych prac izolacyjnych i wzmacniająco-uszczelniających mogących znaleźć zastosowanie dla izolacji górotworu z wyrobisk znajdujących się w najbliższej odległości należą:

- iniekcja wzmacniająco-uszczelniająca górotwór wokół wyrobisk,
- likwidacja i uszczelnienie zbędnych szybów,
- odpowiednie uszczelnienie obudowy szybów i otworów technologicznych,
- wykonanie warstwy wzmacniająco-uszczelniającej z betonu natryskowego o wysokich parametrach technicznych,
- wykonywanie powierzchniowych powłok ochronnych zabezpieczających przed korozyjnym działaniem gazów procesowych,
- budowa tam i korków odcinających,
- zabezpieczenie miejsc krytycznych dla ewentualnej migracji gazów w bariery reakcyjne ukierunkowane na usuwanie wybranych składników gazów procesowych najbardziej niebezpiecznych dla ludzi i środowiska (np. CO).

Sposobami, które można zastosować do uszczelniania i wzmacniania górotworu są:

- iniekcja wzmacniająco-uszczelniająca, przy użyciu materiałów kompozytowych,
- beton natryskowy lub odpowiednio dobrany torkret,
- kotwienie wzmacniające.

2.3.3. Techniki czystej kawerny

Technologia PZW zawiera procedury likwidacji georeaktora, znane jako techniki czystej kawerny. Technika ta jest stosowana do wypłukiwania produktów ubocznych przy prowadzeniu stałego monitorowania w ciągu kilku lat, w celu zapewnienia, że georeaktor nie powoduje zagrożenia dla środowiska. Technika czystej kawerny początkowo wykorzystuje kontrolowany przepływ wody i azotu do reaktora, zatrzymując powstawanie produktów ubocznych. Następnie georeaktor zostaje przepłukany przez kontrolowany przepływ wody mający na celu wydobycie wszystkich pozostałych związków na powierzchnię w celu ich oczyszczenia. Georeaktor poddany zostanie ciągłemu monitoringowi dla zapewnienia braku wzrostu niebezpiecznych dla środowiska związków. W przypadku, gdy zostanie wykryty wzrost stężenia produktów ubocznych, potrzebny będzie sprzęt do dalszego przepłukania kawerny poprocesowej w celu usunięcia tych zanieczyszczeń.

W wszystkich fazach procesu, począwszy od charakterystyki miejsca lokalizacji georeaktora do jego likwidacji, nowe technologie pozwalają na obserwacje i kontrolowanie warunków w georeaktorze i jego otoczeniu nawet na głębokości

1400 m. Możliwe jest monitorowanie ciśnienia, temperatury i podpowierzchniowych naprężeń w czasie rzeczywistym, zapewniając, że reaktor pracuje w pełnym zakresie, przy zmniejszonym ryzyku wpływu na środowisko [4].

3. Ocena wpływu technologii podziemnego zgazowania węgla na zdrowie ludzi i dobro społeczne

3.1. Wpływ technologii PZW na zdrowie ludzkie

Potencjalne zagrożenia dla zdrowia ludzi podczas procesu PZW stanowią zanieczyszczenia atmosfery, wody gruntowej i podziemnej substancjami toksycznymi. Zagrożenie wynikać może z ekspozycji na niebezpieczne substancje, stężenia tych substancji, oraz częstotliwości i czasu trwania ekspozycji.

Określenie zagrożenia wymaga znajomości czynników:

- prawdopodobieństwa, że ludzie będą narażeni na niebezpieczne substancje oraz częstotliwość i czas trwania ekspozycji,
- stężenia, mobilności i trwałości substancji niebezpiecznych w środowisku.

Ocena toksyczności ścieków/odcieków mogących się przedostać z przestrzeni georeaktora do środowiska wiąże się z wykorzystaniem testów toksyczności. Toksyczność ścieków zwykle przedstawia się jako stężenie, przy którym 50% badanych organizmów ginie (LC50-*lethal concentration*) lub najwyższe stężenie, długotrwały efekt przy ciągłej ekspozycji (NOEL- *no observed effects level*).

Trzy rodzaje zagrożeń toksycznych bierze się pod uwagę:

- genotoksyczne, np. rakotwórcze i dziedziczne mutacje,
- układowe, które wpływają ujemnie na funkcjonowanie poszczególnych narządów,
- bioakumulację toksycznych substancji chemicznych.

Metodologia oceny wpływu procesu PZW polega na identyfikacji i charakterystyce środowiska, zdrowia i populacji ludzi, potencjalnie narażonych na zanieczyszczenia generowane podczas procesu. Ważną rolą jest określenie potencjalnych wodnych i gazowych zanieczyszczeń oraz oszacowanie ich stężenia, jak również przeprowadzenie oceny zagrożenia dla zdrowia ludzi.

Głównym źródłem wpływu PZW na zdrowie ludzkie jest skażenie wód podziemnych i powierzchniowych produktami generowanymi podczas procesu i stanowiącymi źródło toksycznych zanieczyszczeń. Kolejne zagrożenie niesie zanieczyszczenie atmosferyczne wynikające z emisji gazowych w wyniku niekontrolowanego uwalniania się gazu do atmosfery.

W przypadku narażenia ludzi na zagrożenie utraty zdrowia, potrzebne są dane demograficzne do oszacowania tego zagrożenia:

- dotyczące populacji: struktura wiekowa, wrażliwość na potencjalne zagrożenia (np. alergie),
- lokalizacja: liczba osób w sąsiedztwie obszaru prowadzenia technologii PZW, drogi ewakuacyjne z tego obszaru,
- źródła wody pitnej i miejsca lokalizacji studni,
- znaczenie wód powierzchniowych dla rekreacji [3].

3.2. Wpływ technologii PZW na dobro społeczne

Jednym z najważniejszych czynników warunkujących rozwój nowych, czystych technologii węglowych, do jakich zalicza się podziemne zgazowanie węgla jest jego akceptacja społeczna. Często używa się również terminu „rozumienie społeczne”. Jest to czynnik bardzo ważny, wskazujący na wzrost poparcia dla tej idei wraz z poziomem wykształcenia (wśród ludzi o niższym wykształceniu częściej decydują

emocje i podświadome skojarzenia). Z badań przeprowadzonych w Wielkiej Brytanii wśród społeczeństwa wysokie obawy odnośnie wpływu technologii na środowisko budziły kwestie zagrożenia pożarowego i eksplozji wynikające z braku kontroli nad procesem zgazowania pod ziemią oraz zagrożenia skażeniem wody gruntowej. Mimo powyższych obaw, technologia PZW postrzegana jest przez społeczeństwo jako potencjalnie bezpieczny dla środowiska i zdrowia proces przetwórstwa węgla do energii i produktów chemicznych. Dodatkowo konsultacje społeczne wykazały, że PZW należy rozważać w połączeniu z przechwytywaniem dwutlenku węgla (CCS-Carbon Capture and Storage) [12].

Z przeprowadzonych dotychczas badań w Polsce pod kątem znajomości i akceptacji nowych technologii w energetyce wynika, że technologia PZW jest najmniej rozpoznawalnym procesem [10]. Ponadto istnieją obawy, że brak wsparcia dla tej technologii ze strony polskiego społeczeństwa może uniemożliwić dalszy rozwój technologii w kraju. Istnieje konieczność prowadzenia konsultacji mających na celu uświadomienie lokalnej społeczności i zmniejszenie istniejących obaw [11]. Opisywany negatywny wpływ na zdrowie i środowisko jest bardzo mało prawdopodobny. Nawet jeśli zostaną wydane pozwolenia w obszarze zamieszkanym, nie przewidyje się zagrożenia dla zdrowia i życia ludzkiego z powodu prowadzonych działań. Podczas etapu poszukiwań nie jest wymagany intensywny transport, będzie on wymagany tylko podczas etapu budowy, do przewożenia sprzętu i wszelkich cięższych pojazdów, które już korzystają z sieci dróg. Odpady poprocesowe pozostają pod ziemią, dlatego niepotrzebny będzie ruch pojazdów do przewożenia i unieszkodliwiania powstałych odpadów [4].

W kryterium możliwości wykorzystania złóż obecnie pozabilansowych, możliwości wybierania pokładów grubych, cienkich, pokładów silnie nachylonych, o dużej gęstości zaburzeń, możliwości wybierania obszarów resztkowych, pokładów głęboko zalegających technologia podziemnego zgazowania pozwala na zwiększenie bezpieczeństwa załogi i zapewnienia komfortu pracy, często prowadzenia procesu bez konieczności udziału człowieka. Eliminacja katastrof górniczych prowadzących do śmierci i kalectwa górników, redukcja ciężkiej pracy pod ziemią, zmniejszenie chorób zawodowych prowadzących do skrócenia życia górników oraz brak konieczności pracy w środowisku potencjalnie niebezpiecznym ma znaczące korzyści gospodarcze i społeczne. Nowe technologie oferują zwiększenie kwalifikacji i standardu życia górników przy wysokich płacach i premiach, stworzenie elity pracowników-techników operatorów górnictwa otworowego i masowego przetwórstwa węgla na wodór i jego pochodne.

3.3. Wpływ technologii na rozwój gospodarczy

Wysoki poziom technologiczny zgazowania węgla w warunkach *in situ* i uniwersalność tej technologii wynika z:

- możliwości zmechanizowania operacji technicznych, prowadzenia automatyzacji i zdalnej kontroli procesu,
- możliwości dostosowania się do zmiennych warunków geologiczno-górnich,
- skuteczności monitorowania i ograniczania występujących zagrożeń naturalnych,
- zapewnienia minimalnych strat złoża, łatwości dostosowania systemu do formy złoża,
- możliwości prowadzenia selektywnej eksploatacji,
- minimalnego udziału kosztów robót przygotowawczych w kosztach wydobycia w stosunku do innych technologii pozyskania węgla.

Wdrażanie nowych rozwiązań technologicznych, do jakich

należy zgazowanie węgla *in situ*, związane jest z :

- rozwojem tego sektora przetwórstwa węgla, promocją regionu, w którym ta technologia jest stosowana,
- wzrostem liczby nowych inwestycji i uzyskaniem dodatkowych środków finansowych przez lokalne władze,
- wzrostem zatrudnienia w przemyśle, budownictwie, nauce i przetwórstwie, głównie w produkcji, montażu, obsłudze i konserwacji urządzeń oraz w usługach prawnych, finansowych i konsultingowych oraz związanej z tym zwiększeniem zamożności lokalnej ludności,
- ograniczeniem zanieczyszczenia środowiska, głównie z redukcją emisji gazów cieplarnianych i pyłów,
- poprawą stanu zdrowia mieszkańców,
- wzrostem bezpieczeństwa górników ze względu na brak konieczności pracy w kopalniach,
- stworzeniem proekologicznego wizerunku regionu,
- promocją regionu w kraju i za granicą,
- rozszerzeniem potrzeby wiedzy, szkoleń i stworzeniem większych możliwości rozwoju,
- wzrostem bezpieczeństwa energetycznego oraz zmniejszeniem importu energii i samodzielności w przypadku wystąpienia zakłóceń w dostawach energii,
- niższymi kosztami energii ze względu na zróżnicowanie źródeł energii i osłabienie pozycji dużych dostawców pozwalając na uniezależnienie kosztów pozyskania i przetwarzania energii w stosunku do konwencjonalnych dostawców energii [10].

4. Ocena wpływu technologii podziemnego zgazowania węgla w ujęciu ekonomicznym

Nowe rozwiązania technologiczne oparte na zgazowaniu węgla stanowią efektywną formę przetwarzania węgla i wytwarzania gazu syntezowego do produkcji energii elektrycznej i ciepła, do otrzymywania wodoru i metanolu oraz paliw płynnych. Rozwój tych działań ma na celu:

- uzyskanie wysokich wydajności wynikających z wykorzystania pozabilansowych pokładów i o niskiej jakości węgla,
- uzyskanie wysokiej sprawności energetycznej,
- zapewnienie wysokiego bezpieczeństwa technicznego i ekologicznego.

4.1. Nakłady inwestycyjne technologii podziemnego zgazowania węgla

Wydatki kapitałowe i koszty operacyjne instalacji PZW wydają się być znacznie niższe niż instalacji powierzchniowej z powodu braku konieczności wydobycia, oczyszczenia i transportu węgla oraz ograniczenia liczby zakładów utylizacji popiołu [2].

Szacowane nakłady inwestycyjne technologii zgazowania przedstawia tabela 4. Połączenie zgazowania z wytwarzaniem produktów chemicznych podczas konwersji węgla (wodór, metanol i paliwa płynne) z jednej strony podnosi nakłady inwestycyjne, ale może być korzystne ze względu na ich wartość [15, 16].

Doświadczenia wynikające z realizacji projektów inwestycyjnych obejmujących podziemne zgazowanie węgla pozwolą na oszacowanie możliwości wdrożenia technologii w Polsce. Z przeprowadzonych analiz wynika, że nakłady kapitałowe na wiercenia i wyposażenie pól eksploatacyjnych stanowią zasadnicze nakłady inwestycyjne. Dodatkowo należy ponieść koszty dostosowania ciągu technologicznego produkcji energii elektrycznej z tradycyjnego gazu ziemnego do parametrów gazu syntezowego pochodzącego z podziemnego zgazowania

Tablica 4. Nakłady inwestycyjne wytwarzania energii dla różnych technologii podziemnego zgazowania węgla [16]
Table 4. Investment expenditure on energy production for various underground coal gasification technology [16]

Dane operacyjne i ekonomiczne	Rodzaj wytwarzanej energii				
	Energia el. bez usuwania CO ₂	Energia el. z usuwaniem CO ₂	Energia el. i paliwa ciekłe w oparciu o zgazowanie węgla	Produkcja wodoru	Energia el. i metanol
Moc elektryczna netto, MWe	598	523	664	-	60,9
Sprawność, %	48,3	41,7		-	-
Zużycie węgla, Mg/godz	223	225	800	152	250
Produkcja energii elektrycznej, MWh/rok	667 608	4 947 011	4 947 011	-	-
Produkcja paliw ciekłych, Mg/rok	-	-	639 090	-	-
Produkcja wodoru	-	-	-	107 446	-
Produkcja metanolu	-	-	-	-	968 948
Czas zużycia instalacji (lata)	20	20	20	20	20
Faza budowy (lata)	3	3	3	3	3
Kapitał obcy, %	80	80	80	80	80
Kapitał własny, %	20	20	20	20	20
Koszty kapitału obcego, %	8	8	8	8	8
Całkowite nakłady inwestycyjne, mln zł	3 668	4 297	8 171	1 881	3 196
Wskaźnik nakładów inwestycyjnych, zł/kW	5 111	6 847	-	-	-
Rozruch, mln zł	214	251	572	132	224

węgla w istniejących elektrowniach gazowych. Efektywność cieplna elektrowni ze względu na niską wartość energetyczną gazu syntezowego powinna wynosić 45–55%, natomiast stopień wykorzystania mocy będzie na wysokim poziomie przy uzyskaniu stałych parametrów gazu rzędu 95% [9].

4.2. Korzyści finansowe

Korzyści finansowe uzyskane z instalacji PZW:

- połączenie zgazowania z wytwarzaniem produktów chemicznych podczas konwersji węgla (wodór, metanol i paliwa płynne) z jednej strony podnosi koszty inwestycyjne, ale może być korzystne ze względu na wartość końcowych produktów procesu,
- wykorzystanie energii zawartej w węglu i redukcja nakładów finansowych związanych z wydobyciem i transportem węgla,
- pozostawienie w górotworze popiołów i pozostałych odpadów poprocesowych oznacza duże oszczędności w porównaniu do usuwania odpadów podczas zgazowania naziemnego,
- redukcja kosztów poprzez zastosowanie przechwytywania CO₂ przyczyniającego się do redukcji emisji gazu,
- szacuje się, że proces zgazowania węgla w warunkach *in situ* w stosunku do konwencjonalnego zgazowania na powierzchni jest bardziej energooszczędny (50% większy), a wraz z rozwojem technologii w najbliższych latach może osiągnąć 70 lub 80%.

Energia cieplna górotworu powstała w wyniku procesu PZW w obszarze georeaktora pozwoli na możliwie efektywne wykorzystanie energii w miejscu jej pozyskania ze względu na:

- mniejsze nakłady inwestycyjne w stosunku do tradycyjnej geotermii,
- brak konieczności wykonywania odwiertów do źródła ciepła, a z wykorzystaniem istniejących odwiertów z procesu zgazowania.

Przyszłe upowszechnienie technologii PZW reprezentującej znaczny potencjał technologiczny uzależnione będzie od:

- relacji cen głównych nośników energii,
- zdolności wytwórców do przedstawienia technologii stwarzającej duży potencjał niezawodności,
- kwestii dotyczących emisji CO₂,
- poziomu wsparcia ze strony środków unijnych dla nowych technologii.

5. Wnioski

Wszystkie sposoby przetwarzania energii pierwotnej na energię elektryczną, mają swoje strony pozytywne i negatywne, zarówno w aspekcie oddziaływania na środowisko, bezpieczeństwo i zdrowie ludzi oraz bezpieczeństwo dostaw energii. Nowoczesne technologie oferują możliwe rozwiązania problemów środowiskowych, a dalsze ich rozwijanie pozwala na redukcję zagrożenia i zmniejszanie emisji z instalacji energetycznych. Ze względu na charakter technologii PZW w stosunku do innych technologii eksploatacji pokładów węgla kamiennego brakuje wiarygodnych informacji o podstawowych jej aspektach technologicznych, ekonomicznych i społecznych, w tym związanych z bezpieczeństwem ekologicznym. Proces zgazowania węgla *in situ* ma ogromne znaczenie, zwłaszcza na rynkach wschodzących, które są w trakcie budowy dużej skali elektrowni węglowych oraz ze względów bezpieczeństwa dostaw gazu zarówno do zastosowań domowych, jak i przemysłowych.

Podziemne zgazowanie węgla w porównaniu z konwencjonalnymi metodami eksploatacji ścianowej, odkrywkowej i powierzchniowego zgazowania ma wiele zalet:

- redukcja emisji gazów i kosztów wynikających z wydobycia, magazynowania i transportowania węgla,
- zmniejszenie kosztów operacyjnych i nakładów inwestycyjnych ze względu na brak instalacji do zgazowania na powierzchni,
- zgazowywanie pozabilansowych pokładów węgla przyczyniających się do znacznego zwiększenia dostępności zasobów i wzrostu bezpieczeństwa energetycznego kraju,
- eliminacja kwestii bezpieczeństwa kopalni,
- pozostawienie odpadów powstałych podczas konwersji

węgla pod ziemią (popiół, koks), unikając w ten sposób potrzeby składowania odpadów na powierzchni,

- zmniejszenie przeobrażenia i degradacji powierzchni,
- redukcja ilości powstających zanieczyszczeń, tj. SO_x, NO_x, rtęć, siarka,
- eliminacja dużych strat energii związanych z gospodarką odpadami i z transportem produktu od georeaktora do powierzchni – redukcja emisji dwutlenku węgla poprzez połączenie zgazowania węgla z wychwytywaniem CO₂.

Droga do powszechnej komercjalizacji technologii PZŹ nadal posiada szereg wyzwań, które będą wymagały inwestycji w badania i rozwój. Pomimo szeregu zalet, technologia nie jest doskonała i ma kilka ograniczeń:

- znaczący wpływ na środowisko objawiający się potencjalnym zanieczyszczeniem warstwy wodonośnej, i osiadaniami powierzchni,
- proces może być technicznie wykonalny dla wielu złóż węgla, jednakże rzeczywista liczba pokładów, które spełniają kryteria geologiczne i hydrologiczne może być znacznie bardziej ograniczona,
- proces nie może być kontrolowany w takim samym stopniu jak w przypadku zgazowania powierzchniowego; wiele ważnych zmiennych procesowych, takich jak: tempo napływu wody, dystrybucja reagentów w strefie zgazowania i rozwój kawerny można jedynie oszacować na podstawie pomiarów temperatury oraz jakości i ilości generowanego gazu,
- proces jest z natury niestabilny, a zarówno przepływ, jak i wartość opałowa gazu będzie się zmieniać w czasie.

Jak każdy proces ekstrakcji geologicznej wymaga rozpoznania warunków geologicznych i hydrogeologicznych. Wynika to z istniejących zagrożeń, które muszą być odpowiednio zarządzane. Kontrola warunków operacyjnych w przestrzeni georeaktora, zapewnienie czynnego przepływu wód podziemnych i zapobieganie wycieku gazu to najważniejsze kryteria, jakie powinny być spełnione podczas prowadzenia procesu zgazowania. Wybór miejsca jest również bardzo ważny dla osiągnięcia warunków izolacji kawerny za pomocą naturalnych nieprzepuszczalnych warstw geologicznych pozwalających na separację od dróg migracji wód i powstałych zanieczyszczeń. Skrupulatne kontrole powinny obejmować produkty uboczne procesu zgazowania. Zagrożenie migracją zanieczyszczeń i gazów musi być brane pod uwagę do oceny środowiskowego i ekonomicznego ograniczenia potencjalnych miejsc lokalizacji podziemnego zgazowania. Z dotychczasowych obserwacji wynika, że prowadzenie procesu w głębokich pokładach węgla, stwarza szansę spełnienia obecnych i przyszłych regulacji europejskich odnośnie oddziaływania na środowisko. Bezpieczeństwo dla środowiska wzrasta wraz ze zwiększeniem odległości od strefy zgazowania do powierzchni ze względu na istnienie wielu barier, jakie stanowią warstwy skalne i formacje wodonośne. Dlatego koncepcja głębokiego zgazowania związana ze zwiększeniem zasięgu i głębokości prowadzenia procesu wydaje się najkorzystniejsza dla środowiska w stosunku do technologii zgazowania płytkich pokładów węgla. Kolejnym czynnikiem stanowiącym o bezpieczeństwie prowadzonego procesu na środowisko jest ograniczanie zagrożenia metanowego, zagospodarowania i utylizacji metanu, ograniczenie zagrożenia sejsmicznego, minimalizacja wpływu na wyrobiska podziemne i powierzchnię terenu, zapewnienie niższego poziomu pyłu, hałasu i efektów wizualnych na powierzchni ziemi, mniejsze zużycia wody oraz minimalizacja robót udostępniających i przygotowawczych.

Wybór odpowiedniej lokalizacji i prowadzenie stałego monitoringu podczas prowadzenia zgazowania węgla, jak i po zakończeniu procesu pozwoli na uzyskanie wysokiego

poziomu bezpieczeństwa prowadzonych prac i ograniczenia negatywnego wpływu na środowisko.

Publikacja została opracowana w ramach projektu pt. „Hydrogen-oriented underground coal gasification for Europe (HUGE)” współfinansowanego ze środków Funduszu Badawczego Węgla i Stali (RFCs) oraz Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

1. *Burton E., Friedmann J., Upadhye R.*: Best Practices in Underground Coal Gasification”. U.S. Department of Energy by the University of California, Lawrence Livermore National Laboratory under contract No. W-7405-Eng-48.
2. *Dinis Da Gama C., Navarro Torres V., Falcão Neves A. P.*: Technological Innovations on Underground Coal Gasification and CO₂ Sequestration. *Dyna*, year 77, No. 161, pp. 101108. Medellín, 2010. Issn 00127353.
3. *Evans J. M.*: Draft Final Report A Methodology For Assessing Environmental And Health Risks Of Underground Coal Gasification. Environmental Assessment and Control Coal Gasification, 1986.
4. *House E.*: Frack-Off statement is scientifically and factually incorrect. Duke Street UCG Association PRESS RELEASE 10th October 2012.
5. *Kabiesz J., Turek M., Drzewiecki J., Makowka J.*: Ocena innowacyjności technologii eksploatacji węgla kamiennego metodą AHP. „Gospodarka Surowcami Mineralnymi” 2008, t. 24, z. 1/2.
6. *Kapusta K., Stańczyk K., Korczak K., Pankiewicz M., Wiatowski M.*: Wybrane aspekty oddziaływania procesu podziemnego zgazowania węgla na środowisko wodne. *Prace Naukowe GIG „Górnictwo i Środowisko”* 2010, nr 4.
7. *Krause S.*: Hydro-geological Implications of Underground Coal Gasification-Environmental Risk Assessment.
8. *LIU Shu-qin, LI Jing-gang, MEI Mei, DONG Dong-lin*: Groundwater Pollution from Underground Coal Gasification. *Journal of China University of Mining & Technology* Vol.17 No.4, 2007.
9. *Magda R.*: Ekonomiczne aspekty podziemnego zgazowania węgla – na przykładzie Carbon Energy. „Polityka Energetyczna” 2011, t. 14, z. 2.
10. *Majer M.*: Poziom wiedzy i akceptacji społecznej dla nowych technologii w sektorze energetyki (na przykładzie mieszkańców województwa śląskiego). *Prace naukowe GIG „Górnictwo i Środowisko”* 2008, nr 4.
11. *Serzysko A.*: Akceptacja społeczeństwa dla rozwoju technologii czystego węgla i CCS w Polsce. *Zmiany klimatu: wyzwania dla polityki. Analizy i opinie CSM*. Nr 6 (styczeń)/2010.
12. *Shackley S, Mander S, Reich A.*: Public perceptions of underground coal gasification in the United Kingdom. *Energy Policy* 34, 2006.
13. *Stańczyk K., Kapusta K., Grabowski J., Nowak D., Howaniec N., Palarski J., Strozik G., Suponik T., Lutyński M., Solvova O., Soukup K., Farret R., Szarafiński M., Kozek B., Gackiewicz K., Green M.*: Mid-Term Technical Implementation Report. Hydrogen Oriented Underground Coal Gasification for Europe – Environmental and Safety Aspects, Report No. 2, 2013. Project carried out with a financial grant of the Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel.
14. *Stratus Consulting Inc.*: Potential Environmental Impacts of the Proposed CIRC Underground Coal Gasification Project, Western Cook Inlet, Alaska. January 27, 2010.
15. *Ściążko M., Zapart L., Dreszer K.*: Analiza efektywności zgazowania węgla połączonego z usuwaniem ditlenku węgla. „Polityka Energetyczna” 2006, t. 9, z. specjalny.
16. *Ściążko M., Zapart L., Dreszer K.*: Szacowanie kosztów inwestycji przyszłościowych technologii konwersji węgla. „Polityka Energetyczna”, 2007, t. 10, z. specjalny.
17. *Yang L., Zhang X.*: Modeling of Contaminant Transport in Underground Coal Gasification, *Energy & Fuels*, 23, 193–201, 2009.