

Krzysztof Kapusta^{}, Krzysztof Stańczyk^{*}, Krzysztof Korczak^{*}, Magdalena Pankiewicz^{*},
Marian Wiatowski^{*}*

WYBRANE ASPEKTY ODDZIAŁYWANIA PROCESU PODZIEMNEGO ZGAZOWANIA WĘGLA NA ŚRODOWISKO WODNE

Streszczenie

Proces podziemnego zgazowania węgla (PZW) jest metodą pozyskiwania energii chemicznej z pokładów węgla przez bezpośrednie doprowadzanie czynnika zgazowującego do zapalonego złoża i odbiór na powierzchni wytworzonego w ten sposób gazu. Metoda ta jest szczególnie uzasadniona w przypadku pokładów węgla, których eksploatacja metodą tradycyjną jest nieopłacalna bądź niemożliwa ze względów bezpieczeństwa. Wiele danych potwierdza wykonalność techniczną oraz atrakcyjność ekonomiczną takiego sposobu uzyskiwania energii z węgla. Ze względu na niedostateczny stan wiedzy na temat PZW, istnieje potrzeba prowadzenia prac badawczych. Aspekty związane z potencjalnym negatywnym oddziaływaniem procesu PZW na środowisko naturalne należą do szczególnie istotnych. Ryzyko środowiskowe technologii jest związane głównie z potencjalnym negatywnym wpływem procesu PZW na wody podziemne oraz wody powierzchniowe, w przypadku konieczności usuwania kondensatów procesowych i odwadniania rejonu eksploatacji; występuje zarówno w czasie prowadzenia procesu, jak i po jego zakończeniu. W procesie PZW powstają i przedostają się do środowiska wodnego (w tym ścieków procesowych) liczne zanieczyszczenia organiczne oraz nieorganiczne. Do głównych zanieczyszczeń organicznych zalicza się węglowodory aromatyczne jedno- i wielopierścieniowe (WWA) oraz fenol. Wśród zanieczyszczeń nieorganicznych najpoważniejszą grupę stanowią metale ciężkie, amoniak oraz cyjanki. Odprowadzenie tego typu ścieków bezpośrednio do wód podziemnych lub powierzchniowych, bez wcześniejszego oczyszczenia, mogłoby spowodować silne zatrucie środowiska wodnego. W niniejszym artykule przedstawiono wybrane wyniki badań ścieków procesowych oraz wyniki badań ekotoksykologicznych.

Some aspects of impact of underground coal gasification process on water environment

Abstract

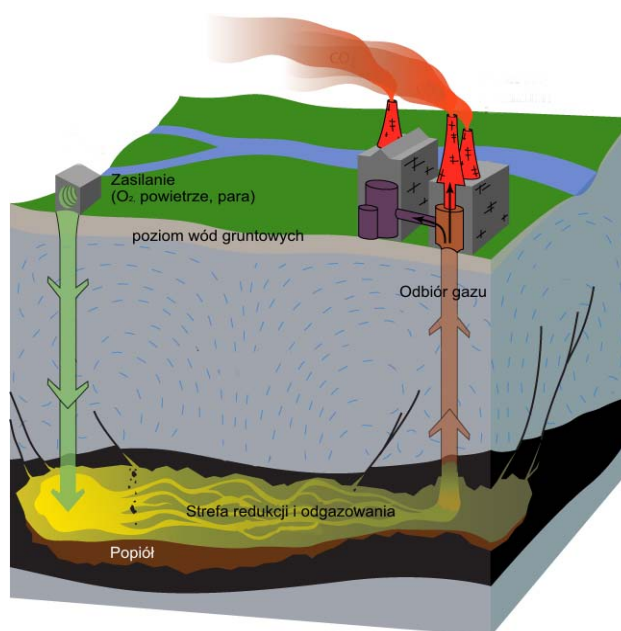
The underground coal gasification (UCG) is a method of recovery of chemical energy from coal seams by direct injection of gasifying agent to the ignited coal seam and then receiving the produced gas on the surface. This method is especially justified in the case of coal resources which extraction by traditional mining techniques is unprofitable or unfeasible due to safety reasons. Many examples support the technical feasibility and economic attractiveness of the UCG. Because the current state-of-the art of the UCG knowledge is still scarce, the further research in this field is necessary. The aspects related to the potential adverse environmental impact of UCG are of the special importance. The environmental risk of UCG is mainly related to the potential negative impact on underground water as well as surface waters in the case when necessity of removal of process condensates and dewatering of underground cavern occur. This risk can appear during the operation of underground reactor and after its decommissioning as well. Numerous organic and inorganic contaminants arise during the UCG process which can subsequently infiltrate into the underground water. The main organic contaminants are mono- and polycyclic aromatic

^{*} Główny Instytut Górnictwa

hydrocarbons and phenolics. Among the inorganic species heavy metals, ammonia and cyanides are the most serious group of contaminants. Discharging such wastewater directly to the underground or surface water without proper treatment could result in acute poisoning of the environment. In this article selected aspects related to testing of post-processing UCG water and results of its ecotoxicity tests were presented.

1. WPROWADZENIE

Podziemne zgazowanie węgla to metoda pozyskiwania energii chemicznej z pokładów węgla, zalegających pod ziemią, przez bezpośrednie doprowadzanie czynnika zgazowującego do zapalonego złoża i odbiór wytworzonego gazu syntezowego na powierzchni (Kapusta, Stańczyk 2009). Schemat ideowy tego procesu przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat ideowy procesu podziemnego zgazowania węgla

Fig. 1. Scheme of the underground coal gasification concept

Skład chemiczny oraz wartość opałowa powstającego gazu zależą przede wszystkim od rodzaju węgla poddawanego zgazowaniu oraz od rodzaju czynnika zgazowującego. Czynnikiem tym może być tlen, powietrze, para wodna oraz ich mieszaniny w dowolnym stosunku ilościowym. Istotne znaczenie dla przebiegu procesu mają również warunki geologiczne oraz hydrogeologiczne zalegania złoża. Decydują one bowiem o oddziaływaniu reagującego układu na otoczenie, w tym o wielkości dopływu wód podziemnych do układu.

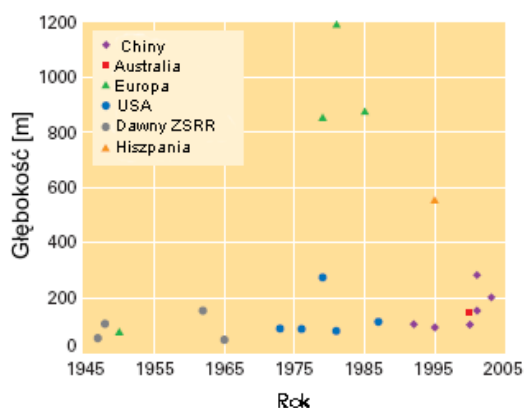
W procesie zgazowania węgiel reaguje z czynnikiem zgazowującym, w wyniku czego powstaje gaz, którego głównymi składnikami są: wodór, tlenek węgla, ditlenek węgla, metan, a w przypadku zastosowania powietrza jako czynnika zgazowującego również azot (tab. 1).

Tabela 1. Przykładowe składy gazowych produktów procesu PZW oraz wartości opałowe gazu uzyskane z zastosowaniem różnych czynników zgazowujących

Czynnik zgazowujący	Skład gazu, % obj.					Wartości opałowe, MJ/m ³
	CO ₂	H ₂	N ₂	CH ₄	CO	
Tlen + para	36,1	28,2	4,2	5,5	25,0	8,2
Tlen	57,0	15,3	5,1	3,1	17,6	5,0
Powietrze	10,8	10,8	67,5	3,1	6,9	3,2

Gaz o takim składzie (tab. 1) stwarza niezwykle szerokie możliwości zastosowania go jako surowca w syntezie chemicznej oraz w energetyce jako paliwa.

Wiele danych potwierdza wykonalność techniczną oraz atrakcyjność ekonomiczną procesu PZW (GasTech 2007; Yang, Liang, Yu 2003; Khadse i in. 2007). Fakt ten, w połączeniu z trudną sytuacją na rynkach paliw węglowodorowych powoduje, że jest zauważalna wzmożona aktywność wielu ośrodków badawczych oraz rządów państw w dziedzinie badań nad technologią procesu PZW. Pionierem w eksploatacji pokładów węgla technologią PZW był Związek Radziecki, w którym badania takie rozpoczęto już w latach 30. XX wieku i kontynuowano do lat 80. (Gregg, Edgar 1978; Shafirovich, Varma 2009). Zakrojone na szeroką skalę prace badawcze prowadzono również w USA w latach 70. i 80. XX wieku. Na rysunku 2 przedstawiono skalę aktywności w świecie w latach 1945–2005 w zakresie badań nad PZW oraz głębokości prowadzenia prób zgazowania.

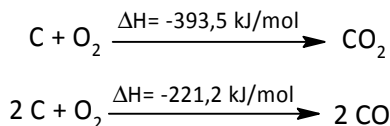
**Rys. 2.** Światowe badania nad PZW w latach 1945–2005 i głębokość prowadzenia zgazowania (Stańczyk, Kapusta 2007)**Fig. 2.** Global UCG trials in years 1945–2005 and depths of the gasification trials (Stańczyk, Kapusta 2007)

Obecnie do liderów w dziedzinie badań nad procesem PZW należą ośrodki badawcze w Chinach, Australii i USA. W 2007 roku po kilkunastu latach przerwy badania nad procesem PZW wznowiono również w Europie, w ramach trzyletniego projektu badawczego o akronimie HUGE (*Hydrogen Oriented Underground Coal Gasification for Europe*). Projekt ten, dofinansowany z Funduszu Badań Węgla i Stali, był realizowany przez międzynarodowe konsorcjum naukowe, koordynowane przez Główny Instytut Górnictwa.

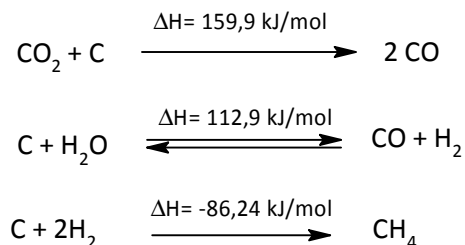
Ze względu na niedostateczny stan wiedzy w dziedzinie PZW w dalszym ciągu istnieje uzasadniona potrzeba prowadzenia prac badawczych w celu rozwiązania istotnych problemów związanych z rozwojem tej technologii, w tym zagadnień z zakresu oddziaływania technologii na środowisko naturalne. Oprócz potencjalnego ryzyka osiadania terenu nad rejonem eksploatacji, którego skala występowania jest porównywalna z oddziaływaniem górnictwa konwencjonalnego (Burton i in. 2006), skażenie środowiska wodnego należy do głównych zagrożeń środowiskowych związanych z procesem PZW (Liu, 2007).

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA PROCESU W ASPEKcie POWSTAWANIA ŚCIEKÓW

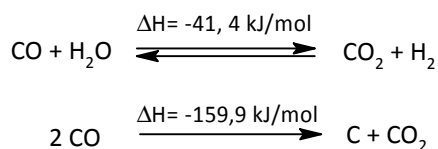
Proces zgazowania węgla rozpoczyna się od zapalenia pokładu na początku, tzw. otworu generatorowego. Następnie, po powstaniu przodka ogniowego doprowadza się czynnik zgazowujący, w wyniku czego następuje rozwój procesu zgazowania, a czoło ognia przemieszcza się stopniowo wzdłuż otworu spełniającego rolę kanału odprowadzającego gaz. Tworzenie się gazu jest wynikiem oddziaływania trzech czynników (mechanicznego, termicznego i chemicznego) na pokłady węgla i otaczające go skały. Decydujące znaczenie w omawianym procesie ma czynnik chemiczny. Odgrywa on zasadniczą rolę w tworzeniu podstawowych ilości gazów oraz stanowi główne źródło energii dla termicznego tworzenia się gazu. W wyniku reakcji tlenu zawartego w czynniku zgazowującym z powierzchnią węgla w strefie doprowadzania czynnika do kanału gazowego powstaje ditlenek i tlenek węgla (II) (obie reakcje są egzotermiczne):



W dalszej części kanału zgazowania następuje reakcja węgla z powstałymi produktami zgazowania. Są to głównie reakcje redukcji CO_2 i rozkładu pary wodnej oraz egzotermiczna reakcja uwodornienia węgla, w wyniku której powstaje metan:



W fazie gazowej, na długości strefy gazowej kanału, przebiegają reakcje homogeniczne, głównie konwersji tlenku węgla (II) oraz reakcja dysproporcjonowania tlenku węgla (II):



Ścieki powstają zarówno podczas prowadzenia procesu PZW, jak i po zakończeniu eksploatacji reaktora podziemnego. W czasie eksploatacji reaktora powstające ścieki to głównie kondensaty procesowe wydzielone w różnych częściach układu odprowadzania i oczyszczania gazu. Stanowią one zagrożenie dla wód powierzchniowych. Na bilans powstających ścieków po zakończeniu eksploatacji instalacji PZW składają się kondensaty wydzielane z ciepłego i wilgotnego gazu, wydobywającego się z przestrzeni poreakcyjnej oraz wody dołowe napływające do przestrzeni poreakcyjnych i wypompowywane na powierzchnię w celu ochrony podziemnego środowiska wodnego na etapie likwidacji i zamykania instalacji. Na ilość powstających w procesie PZW ścieków ma wpływ ogólny bilans wody dostępnej w procesie. Woda obecna podczas prowadzenia procesu pochodzi z czterech zasadniczych źródeł; są to:

- woda obecna w pokładzie węgla (zasoby statyczne),
- wody podziemne, infiltrujące z powierzchni, które przedostają się do otoczenia georeaktora,
- woda chemicznie związana, występująca w minerałach obecnych w pokładzie węgla,
- para wodna używana w czasie procesu jako dodatek do czynnika zgazowującego.

W zależności od konfiguracji układu, warunków hydrogeologicznych lokalizacji reaktora podziemnego, warunków termodynamicznych prowadzenia procesu oraz zapotrzebowania na wodę, jako jednego z podstawowych surowców procesu zgazowania, ilości produkowanych w procesie ścieków są różne. Wody z procesu PZW zawierają wiele niebezpiecznych związków chemicznych (Liu i in. 2006, 2007; Yang 2009; Walters, Niemczyk 1984; Stuermer, Ng, Morris 1982).

3. PARAMETRY ŚCIEKÓW A REGULACJE PRAWNE ZWIĄZANE Z RYZYKIEM ŚRODOWISKOWYM

Do najważniejszych problemów występujących podczas prowadzenia PZW, zalicza się potencjalny negatywny wpływ tego procesu na wody podziemne oraz powierzchniowe, w przypadku odwadniania pola eksploatowanego i wypompowywania powstających ścieków na powierzchnię. W czasie prowadzenia procesu powstają liczne zanieczyszczenia w postaci organicznych związków aromatycznych, między innymi: benzen, toluen, etylobenzen, ksyleny (razem jako BTEX), fenole oraz wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA). Dodatkowo może nastąpić uwalnianie się znacznych ilości metali ciężkich z węgla oraz powstających podczas zgazowania popiołów w procesach wolatylizacji, którym sprzyja wysoka temperatura prowadzenia procesu i obecność licznych czynników chemicznych (Liu i in. 2006). Do niebezpiecznych zanieczyszczeń nieorganicznych należy zaliczyć również amoniak oraz cyjanki. W wyniku wysokiej temperatury, która towarzyszy procesowi, następuje

wzrost rozpuszczalności zanieczyszczeń w wodach i możliwość ich migracji do warstw wodonośnych.

W Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 24 lipca 2006 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego (Dz. U. 2006 nr 137, poz. 984 z późniejszymi zmianami) zostały określone dopuszczalne wartości wskaźników zanieczyszczeń dla ścieków przemysłowych. Dopuszczalne ilości uwalnianych zanieczyszczeń są szczegółowo określone w załączniku do Rozporządzenia (WE) Nr 166/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 18 stycznia 2006 r. w sprawie ustanowienia Europejskiego Rejestru Uwalniania i Transferu Zanieczyszczeń. Ustanowiony został wykaz wartości progowych dla uwolnień do wód. Z wykazu zanieczyszczeń, hipotetycznie ponad 20 substancji może wystąpić w ściekach z procesu podziemnego zgazowania węgla.

W podstawowej regulacji prawnej Unii Europejskiej, dotyczącej gospodarki wodnej, w Ramowej Dyrektywie Wodnej jest zawarty wykaz obejmujący substancje zidentyfikowane jako priorytetowe substancje niebezpieczne (art. 16 ust. 2 i 3 Dyrektywy 2000/60/WE). Transpozycja tego załącznika została wprowadzona Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 2 lipca 2010 roku w sprawie wykazu substancji priorytetowych w dziedzinie polityki wodnej (Dz. U. nr 138, poz. 934). Niektóre z substancji wymienionych w wyżej wymienionym wykazie zidentyfikowano w ściekach pochodzących z procesu PZW; są to: benzen, naftalen, związki z grupy WWA (wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne) oraz niektóre metale ciężkie.

4. WYNIKI BADAŃ FIZYKOCHEMICZNYCH ŚCIEKÓW PROCESOWYCH

W instalacji pilotowej podziemnego zgazowania węgla w KD „Barbara”, eksploatowanej w ramach projektu HUGE, ścieki procesowe były gromadzone w celu określenia ich parametrów i unieszkodliwienia. Ilość wód poprocesowych odbieranych w czasie prowadzenia procesu PZW wynosiła około 0,5 m³/t zgazowanego surowca. W praktyce ilość i jakość odprowadzanych wód poprocesowych jest zmienna i zależy od sposobu prowadzenia procesu i lokalnych warunków geologiczno-górnich. Skład odcieku, pochodzącego z procesu PZW, z uwzględnieniem dopuszczalnych wartości określonych w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 24 lipca 2006 roku w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego (Dz. U. 2006 nr 137, poz. 984) przedstawiono w tabeli 2.

Z tabeli 2 wynika, że ścieki pochodzące z procesu zgazowania węgla przekraczają dopuszczalne wartości BZT, ChZT, azotu ogólnego, cyjanków, fenoli lotnych, OWO (ogólnego węgla organicznego) czy żelaza. Szczególną uwagę należy jednak zwrócić na duże wskaźniki BTEX i WWA. Wprowadzenie tego typu ścieków bezpośrednio do wód podziemnych lub powierzchniowych, bez wcześniejszego oczyszczenia, mogłoby spowodować silne zatrucie środowiska wodnego.

Tabela 2. Porównanie składu odcieku pochodzącego z procesu PZW z dopuszczalnymi wartościami, według Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 24 lipca 2006 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego

Oznaczenie	Jednostka	Wartość	Najwyższa dopuszczalna wartość średniodobowa
Barwa	–	słomkowa	n.o.
Przewodność	μS/cm	15100	n.o.
Odczyn	pH	5,8	6,5–9
BZT ₅	mg/l O ₂	490	25
ChZT _{Cr}	mg/l O ₂	2710	125
Azot amonowy	mg/l N	1930	n.o.
Azot azotynowy	mg/l N	< 0,006	n.o.
Azot ogólny	mg/l N	1980	30
Zawiesiny ogólne	mg/l	< 2	35
Azotyny	mg/l	< 0,02	n.o.
Chlorki	mg/l	929,2	1000
Cyjanki ogólne	mg/l	1,04	
Cyjanki wolne	mg/l	0,5	0,1
Cyjanki związane	mg/l	0,54	5
Fenole lotne	mg/l	59,1	0,1
OWO	mg/l	181	30
Rodanki	mg/l	6,25	10
Siarczany	mg/l	2510	500
Siarczki	mg/l	< 0,1	0,2
Suma Cl+SO ₄	mg/l	3439	1500
Amon	mg/l	2490	n.o.
Bor	mg/l	5,5	1
Chrom	mg/l	0,05	0,5
Cynk	mg/l	0,75	2
Kadm	mg/l	< 0,02	0,4
Miedź	mg/l	< 0,03	0,5
Molibden	mg/l	< 0,01	1
Nikiel	mg/l	0,029	0,5
Ołów	mg/l	0,044	0,5
Rtęć	mg/l	< 0,003	0,2
Tytan	mg/l	0,4	1
Żelazo	mg/l	188	10
BTEX (benzen, toluen, etylobenzen, ksylen)	μg/l	26,5	0,1 (dla BTX)
WWA (wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne)	μg/l	1870	n.o.

n.o. – nie określono,

■ przekroczone wartości dopuszczalne.

5. ZASTOSOWANIE METODY BIOINDYKACJI DO BADAŃ EKOTOKSYKOLOGICZNYCH WPLYWU PROCESU NA ŚRODOWISKO WODNE

Badania ekotoksykologiczne pozwalają na badanie wpływu substancji toksycznych na ekosystemy (Manahan 2006). O ile tradycyjna toksykologia ssaków dotyczy wpływu ekspozycji na chemikalia w stosunku do poszczególnych gatunków, głównie

ludzi, to ekotoksykologia dotyczy takiego wpływu na grupy w populacjach żyjących w środowisku naturalnym.

Bioindykacja jest metodą, w której wykorzystuje się jako wskaźnik organizmy żywe. Ich reakcja może być podstawą do oceny ogólnej aktywności biologicznej badanego układu, a co za tym idzie, do oceny toksyczności badanej próbki (Nałęcz-Jawecki 2003). Bioindykacyjna ocena różnych technologii produkcji, a także bieżący monitoring ścieków i odpadów sprzyjają opracowywaniu technologii proekologicznych. Za pomocą bioindykacji można wyznaczyć ogólną toksyczność badanej próbki i określić sumaryczny efekt jej oddziaływania.

Badania nad toksycznością kondensatów pochodzących z procesu podziemnego zgazowania węgla prowadzono w latach 80. w USA. Testy toksyczności kondensatów z prób prowadzonych w Hannie, wykonane na trzech organizmach testowych, wykazały, że wskaźniki toksyczności EC_{50} tych kondensatów mieszczą się w przedziale stężeń od 0,11 do 0,18% (DeGraeve, Overcast, Bergman 1980). Badania te wykazały więc dużą toksyczność kondensatów. W celu potwierdzenia przypuszczenia o dużej toksyczności odcieków pochodzących z procesu zgazowania węgla, prowadzonego w KD „Barbara”, wykonano badania toksykologiczne dwóch próbek wody procesowej. Na podstawie wyników pomiarów na bakteriach testowych *Vibrio fischeri*, wyznaczano wskaźniki toksyczności kondensatów EC_{20} i EC_{50} . Są to wartości, które określają dawkę (stężenie), która w celu uzyskania efektu (w tym przypadku zahamowania luminescencji) „dotknęła” odpowiednio 20% i 50% obserwowanej populacji (Walker, Hopkin 2002). Wyniki badanych próbek przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Obliczone wartości EC dla próbek pochodzących z procesu PZW

	Stężenie %	
	Próbka I	Próbka II
EC_{20}	0,032	0,032
EC_{30}	0,055	0,057
EC_{40}	0,084	0,091
EC_{50}	0,125	0,141
EC_{60}	0,187	0,218
EC_{70}	0,288	0,350
EC_{80}	0,489	0,624

Za próg toksyczności przyjęto wartość EC_{50} . W obu próbkach wartość ta została osiągnięta przy bardzo wysokim rozcieńczeniu próbki wyjściowej ($C = 0,13\%$ i $C = 0,14\%$), co świadczy o bardzo wysokiej toksyczności badanych próbek. Otrzymane wartości progów toksyczności były zbliżone do uzyskanych w badaniach prowadzonych wcześniej w USA.

6. KIERUNKI OGRANICZANIA ODDZIAŁYWANIA PROCESU PZW NA ŚRODOWISKO WODNE

Zasięg rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń zależy od warunków geologicznych i hydrogeologicznych występujących w miejscu i w otoczeniu eksploatowanego złoża oraz od technologii prowadzenia procesu PZW. Problem ograniczenia zasięgu oddziaływania na środowisko wodne musi być analizowany już od etapu prac przygotowaw-

czych i projektowych, przez okres eksploatacji, aż po etap zakończenia prac i likwidacji reaktora. Analizując możliwość minimalizacji zagrożeń procesu PZW dla środowiska wodnego, odmienne podejście należy przyjąć dla etapu czynnej eksploatacji reaktora i dla etapu zakończenia pracy instalacji (Liu i in. 2007).

Mechanizm powstawania zanieczyszczeń wód gruntowych w okresie pracy reaktora obejmuje głównie przedostawanie się zanieczyszczeń do jego otoczenia wraz z ucieczkami gazu do górotworu. Następnie zanieczyszczenia te przenikają do wód podziemnych, czemu sprzyja podwyższona temperatura środowiska migracji. Problem ten nabiera szczególnego znaczenia w przypadku prowadzenia zgazowania pod zwiększonym ciśnieniem, przekraczającym ciśnienie hydrostatyczne panujące w górotworze. Prowadzenie procesu pod ciśnieniem niższym od ciśnienia hydrostatycznego, powoduje migrację wody z górotworu w kierunku wnętrza reaktora, co minimalizuje migrację gazu i zanieczyszczeń do otoczenia. W związku z powyższym niezwykle istotny jest odpowiedni dobór ciśnienia pracy reaktora ze względu na kontrolę wielkości dopływu wody do strefy reakcji. Przy odpowiednio dobranych parametrach pracy reaktora w czasie jego eksploatacji ryzyko skażenia wód podziemnych zostaje zminimalizowane. Pozostaje jednak problem ścieków procesowych stanowiących kondensaty wydzielone w instalacjach odbioru i oczyszczania gazu.

Zagrożenie dla wód podziemnych pojawia się natomiast w chwili wyłączenia reaktora z eksploatacji. Zmniejszenie ciśnienia w reaktorze powoduje stopniowy napływ wody do przestrzeni poreakcyjnej i wymywanie zanieczyszczeń oraz ich migrację w środowisku wód podziemnych. Na tym etapie konieczna jest więc kontrola dopływu wody do reaktora i odbiór ścieków poprocesowych z rejonu eksploatacji (ujęcie ich pod ziemią i wypompowanie na powierzchnię) oraz ich oczyszczenie do wymaganych parametrów w oczyszczalni ścieków przemysłowych.

W celu zminimalizowania ryzyka skażenia wód gruntowych produktami procesu zgazowania podziemnego rozważa się również alternatywną koncepcję neutralizacji zanieczyszczeń *in situ*, jak:

- trwałe związanie zanieczyszczeń zawartych w ściekach w postaci mieszaniny samozestalającej, ułożonej w pustkach poeksploatacyjnych,
- bioremediacja przestrzeni poreakcyjnej z wykorzystaniem wyspecjalizowanych mikroorganizmów (Covell, Thomas 1996),
- napowietrzanie wód gromadzących się w przestrzeni poreakcyjnej w celu usunięcia związków lotnych z powietrzem na powierzchnię oraz jednoczesnego stymulowania procesów oksydacyjnych (Covell, Thomas 1996),
- zastosowanie barier reaktywnych.

Dobór metody unieszkodliwiania zanieczyszczeń zależy od warunków geologicznych przedsięwzięcia.

WNIOSKI

Na podstawie wykonanych prac sformułowano następujące wnioski:

1. Proces podziemnego zgazowania węgla wiąże się z powstawaniem i przedostawaniem do środowiska licznych zanieczyszczeń zaliczanych do substancji szczególnie

- szkodliwych dla środowiska wodnego (między innymi: węglowodorów aromatycznych, fenoli, amoniaków, cyjanków), pomimo że w czasie prowadzenia procesu dodatkowych zanieczyszczeń nie wprowadza się.
2. Ścieki procesowe charakteryzują się bardzo wysoką toksycznością i nie mogą być wprowadzane bez oczyszczenia do wód powierzchniowych lub podziemnych.
 3. Dobór odpowiednich parametrów termodynamicznych prowadzenia procesu PZW umożliwia w pewnym stopniu kontrolę kierunku przemieszczania się zanieczyszczeń w czasie eksploatacji reaktora podziemnego.
 4. Ograniczenie ryzyka skażenia wód podziemnych, po wyłączeniu reaktora z eksploatacji, sprowadza się do usuwania na powierzchnię gromadzących się w przestrzeni poreakcyjnej ścieków w celu ich oczyszczenia oraz zastosowania technik remediacji *in situ*.
 5. Problem potencjalnego oddziaływania procesu PZW na środowisko wodne wymaga szczegółowej analizy na etapie projektowania, eksploatacji, a także w czasie likwidacji instalacji oraz prac ograniczających zasięg oddziaływania na środowisko wodne.

Literatura

1. Burton E. i in. (2006): Best practices in underground coal gasification. Lawrence Livermore National Laboratory.
2. Covell J.R., Thomas M.H. (1996): Combined air sparge and bioremediation of an underground coal gasification site. US DOE. DOE/MC/31346-97/C0830.
3. DeGraeve G.M., Overcast R.L., Bergman H.L. (1980): Toxicity of underground coal gasification condenser water and selected constituents to aquatic biota. Arch. Environ. Contam. Toxicol. Vol. 9, s. 543–555.
4. GasTech (2007): Viability of Underground Coal Gasification in the “Deep Coals” of the Powder River Basin
http://www.wyomingbusiness.org/pdf/energy/WBC_Report_061507_SPM.pdf.
5. Gregg D.W., Edgar T.F. (1978): Underground Coal Gasification. AIChE Journal Vol. 24, s. 753–781.
6. Kapusta K., Stańczyk K. (2009): Uwarunkowania i ograniczenia rozwoju procesu podziemnego zgazowania węgla w Polsce. Przemysł Chemiczny 88/4, s. 331–338.
7. Khadse A., Qayyumi P., Mahajani S., Aghalayam P. (2007): Underground coal gasification: A new clean coal utilization technique for India. Energy Vol. 32, s. 2061–2071.
8. Lindblom S.R., Smith V.E. (1993): Rocky Mountain 1 underground coal gasification test Hanna, Wyoming. Groundwater evaluation. Final report. US DOE. DOE/MC/25038–3652.
9. Liu S., Li J., Mei M., Dong D. (2007): Groundwater pollution from underground coal gasification. J. China Univ. Mining & Techno. Vol. 17, s. 0467–0472.
10. Liu S., Wang Y., Yu L., Oakey J. (2006): Volatilization of mercury, arsenic and selenium during underground coal gasification. Fuel Vol. 85, s. 1550–1558.
11. Liu S., Wang Y., Yu L., Oakey J. (2006): Thermodynamic equilibrium study of trace element transformation during underground coal gasification. Fuel Processing Technology Vol. 87, s. 209–215.
12. Manahan S.E. (2006): Toksykologia środowiska. Aspekty chemiczne i biochemiczne. Warszawa, Wydaw. Naukowe PWN.
13. Nałęcz-Jawecki G. (2003): Badanie toksyczności środowiska wodnego metodą bioindykacji. Biuletyn Wydziału Farmaceutycznego Akademii Medycznej w Warszawie.

14. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 lipca 2006 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego (Dz. U. 2006 nr 137, poz. 984 z późniejszymi zmianami).
15. Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 2 lipca 2010 r. w sprawie wykazu substancji priorytetowych w dziedzinie polityki wodnej (Dz. U. nr 138, poz. 934).
16. Rozporządzenie (WE) Nr 166/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 18 stycznia 2006 r. w sprawie ustanowienia Europejskiego Rejestru Uwalniania i Transferu Zanieczyszczeń i zmieniające Dyrektywę Rady 91/689/EWG i 96/61/WE.
17. Shafirovich E., Varma A. (2009): Underground Coal Gasification: A Brief Review of Current Status. *Ind. Eng. Chem. Vol. 48 (17)*, s. 7865–7875.
18. Stańczyk K., Kapusta K. (2007): Podziemne zgazowanie węgla. *Karbo* nr 2, s. 98–102.
19. Stuermer D.H., Ng D.J., Morris C.J. (1982): Organic contaminants in groundwater near an underground coal gasification site in northeastern Wyoming. *Environ. Sci. Technol. Vol. 16*, s. 582–587.
20. Sury M. i in. (2004): Review of environmental issues of underground coal gasification – best practice. DTI Report No. COAL R273 DTI/Pub URN 04/1881, 2004.
21. Walker C.H., Hopkin S.P. (2002): Podstawy ekotoksykologii. Warszawa, Wydaw. Naukowe PWN.
22. Walters E.A., Niemczyk T.M. (1984): The effect of underground coal gasification on ground water. US EPA; EPA-600/S2-84-123.
23. Yang L., Liang J., Yu L. (2003): Clean coal technology – Study on the pilot project experiment of underground coal gasification. *Energy Vol. 28*, s. 1445–1460.
24. Yang L. (2009): Modeling of contaminant transport in underground coal gasification. *Energy & Fuels Vol. 23*, s. 193–201.

Recenzent: prof. dr hab. inż. M. Jacek Łączny