

**Jan Macuda\*, Aleksandra Lewkiewicz-Malysa\*, Elżbieta Konopka\*\***

## **TECHNICZNE I TECHNOLOGICZNE ASPEKTY ZATŁACZANIA WÓD ZŁOŻOWYCH DO GÓROTWORU**

### **1. WSTĘP**

Zatłaczanie wód złożowych do górotworu poprzez odwierty chłonne jest możliwe przy spełnieniu wymogów technicznych, technologicznych oraz dotyczących bezpiecznego prowadzenia prac górniczych i ochrony środowiska [6, 7, 10]. Problem ten ma szczególne znaczenie zwłaszcza przy wykorzystaniu do tego celu zastawionych odwiertów naftowych lub przeznaczonych do likwidacji.

Zatłaczanie wód złożowych do górotworu odbywa się poprzez kolumnę rur tłocznych, która na górze zamocowana jest w głowicy odwiertu, a na dole zapięta w urządzeniu uszczelniającym (pakerze). Przestrzeń pomiędzy kolumną rur tłocznych a kolumną rur okładzinowych wypełniona jest płynem nadpakerowym, który ma za zadanie zmniejszyć różnice ciśnień działających na paker i jednocześnie umożliwić natychmiastową kontrolę szczelności kolumn rur i pakera [6, 8].

Interwał warstw chłonnych udostępnia się najczęściej poprzez perforację rur okładzinowych, a w przypadku występowania warstw o dużej stabilności poprzez zainstalowany filtr lub otwór „bosy”. Na efektywność procesu zatłaczania istotny wpływ ma również przepuszczalność strefy przyodwiertowej oraz stan fizykochemiczny zatłaczanej solanki a zwłaszcza obecność w niej składników kolmatogennych [1, 4, 5]. Kolmatacja skał w strefie przyodwiertowej może być spowodowana zarówno obecnością w wodzie złożowej widocznej makroskopowo zawiesiny mineralnej, jak i stałymi produktami powstającymi w wyniku reakcji chemicznych, przebiegających w środowisku utleniającym. Konieczne jest zatem usuwanie z wody złożowej przeznaczonej do zatłaczania składników kolmatogennych zarówno pochodzenia pierwotnego jak i wtórnego [2, 3]. W tym celu wykonano badania laboratoryjne usuwania składników kolmatogennych z wody złożowej pobranej z jednego z otworów zlokalizowanych w obrębie wyeksploatowanego złoża gazu „Borzęcin”.

---

\* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

\*\* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii AGH, Kraków

## **2. KRYTERIA DOBORU ODWIERTÓW CHŁONNYCH DO ZATŁACZANIA ODPADÓW CIEKŁYCH**

Odwiert przeznaczony do zatłaczania wód złożowych do górotworu musi spełniać trzy podstawowe kryteria [6, 7]:

- 1) kryterium ekologiczne,
- 2) kryterium geologiczne,
- 3) kryterium techniczne.

### **Kryterium ekologiczne**

Wykorzystanie odwiertów chłonnych do zatłaczania wód złożowych do górotworu powinno odbywać się w warunkach maksymalnej ochrony aktywnej biosfery i wód podziemnych [7, 8, 9].

Lokalizacja odwiertu chłonnego powinna być w takim miejscu aby zminimalizować jego oddziaływanie na poszczególne elementy środowiska takie jak:

- powietrze,
- powierzchnię ziemi,
- wody powierzchniowe i podziemne,
- klimat akustyczny,
- złoża kopalin,
- świat zwierzęcy i roślinny,
- ludzi.

Kryterium ekologiczne zależy w istotnym stopniu od walorów środowiska przyrodniczego w rejonie lokalizacji odwiertu chłonnego i uwzględnia możliwy wpływ zatłaczanych wód złożowych na aktywną biosferę.

### **Kryterium geologiczne**

Możliwość bezpiecznego dla środowiska, a zwłaszcza dla wód podziemnych i innych kopalin użytecznych, wykorzystania odwiertu chłonnego dla celów zatłaczania wód złożowych do górotworu, zależy od wielu parametrów determinowanych warunkami geologicznymi. Wymagania stawiane odwiertom chłonnym dotyczą zarówno budowy geologicznej jak i warunków hydrogeologicznych, w tym zwłaszcza odpowiedniej chłonności górotworu i należytej izolacji warstwy chłonnej. Kryterium geologiczne uwzględnia parametry hydrodynamiczne warstwy chłonnej i zmiany chłonności odwiertu w czasie zatłaczania.

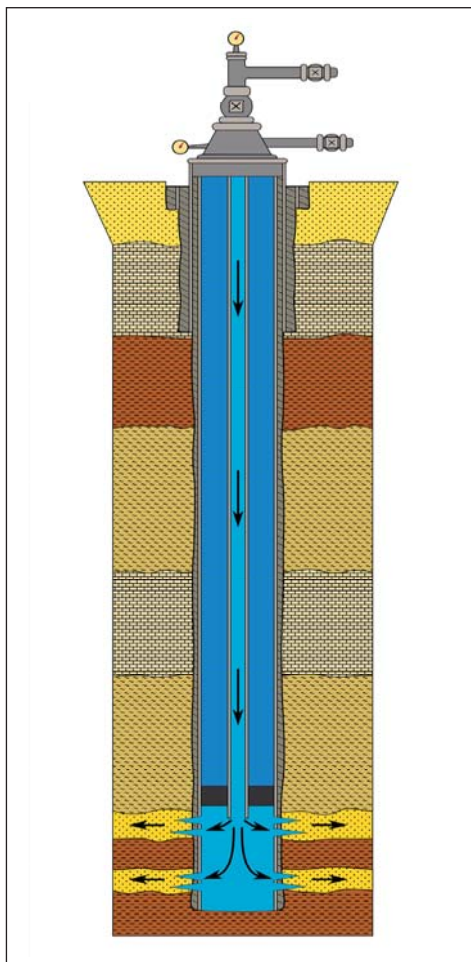
### **Kryterium techniczne**

Możliwość wykorzystania odwiertów chłonnych do zatłaczania wód złożowych do górotworu jest uwarunkowana właściwą ich konstrukcją oraz odpowiednim stanem technicznym.

Wskaźnik techniczny określany jest w oparciu o:

- analizę konstrukcji odwiertu chłonnego,
- badania stanu technicznego odwiertu,
- rodzaj i stan techniczny infrastruktury napowierzchniowej.

Ze względu na wyeliminowanie ryzyka zanieczyszczenia środowiska naturalnego przez zatłaczaną do górotworu solankę najbardziej korzystne jest wykorzystanie do tego celu nowoodwierconych oraz negatywnych odwiertów geologiczno-poszukiwawczych. Możliwe jest także wykorzystanie do tego celu odwiertów poeksploatacyjnych, przeznaczonych do likwidacji. Na rysunku 1 przedstawiono schemat uzbrojenia odwiertu przeznaczonego do zatłaczania wód złożowych.



Rys. 1. Schemat odwiertu do zatłaczania wód złożowych wraz z uzbrojeniem napowierzchniowym

### 3. STAN TECHNICZNY ODWIERTÓW CHŁONNYCH

Wykorzystanie odwiertów chłonnych do zatłaczania wód złożowych do górotworu jest uwarunkowane zarówno ich właściwą konstrukcją jak i odpowiednim stanem technicznym [6, 7, 8]. Warunki te określane są w oparciu o:

- analizę konstrukcji odwiertu chłonnego,
- badania stanu technicznego kolumn rur okładzinowych,
- ocenę stanu technicznego infrastruktury napowierzchniowej.

Ze względu na ograniczenie do minimum możliwości wystąpienia awarii i skażenia środowiska najbardziej korzystne jest wykorzystanie do zatłaczania wód złożowych nowoodwierconych lub negatywnych odwiertów geologiczno-poszukiwawczych. Uwarunkowane jest to m.in. ich dobrym stanem technicznym (są szczelne) oraz wyposażeniem w odpowiedni osprzęt. Natomiast wykorzystanie do tego celu odwiertów poeksploatacyjnych, z powodu możliwości wystąpienia znacznej korozji rur okładzinowych oraz uszkodzenia płaszcza cementowego, znacznie zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia migracji zatłaczanych wód złożowych do nadległych warstw wodonośnych. Dla wyeliminowania tego ryzyka, przed ich zakwalifikowaniem do zatłaczania, należy wykonać ocenę stanu technicznego ich konstrukcji.

W tym celu należy wykonać w odwiercie zestaw badań geofizycznych w skład których powinny wchodzić: cementomierz akustyczny (CBL oraz PET), sonda magnetyczna (MTT), kawernomierz wieloramienny (MIT), scanner akustyczny CAST oraz termometr.

Taki zestaw badań umożliwi dokonanie oceny jakości wiązania zaczynu cementowego z rurami i formacją skalną, stopnia wypełnienia przestrzeni pozarurowej, stref przepływu mediów poza rurami oraz identyfikację uszkodzeń rur okładzinowych.

### 4. METODYKA BADAŃ

Przedmiotem badań laboratoryjnych była woda złożowa pobrana z jednego z odwiertów eksploatacyjnych zlokalizowanych w obrębie złoża gazu „Borzęcin”. Ze względu na cel prowadzonych badań w pierwszej kolejności wykonane zostały badania chemiczne, ze szczególnym uwzględnieniem składników kolmatogennych.

Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Naturalnym składnikiem wody złożowej była zawiesina, której globalna ilość może podlegać znacznym wahaniom. Przewidując konieczność wydzielenia zawiesiny przed zatłoczeniem wody złożowej do górotworu przeprowadzono badania nad możliwością jej wstępnego wydzielenia w warunkach sedymentacji naturalnej i przy zastosowaniu flokulantów. W badaniach wykorzystano powszechnie stosowane flokulanty: Magnafloc oraz Glikocel, a efekt ich działania określono na automatycznej wadze sedymentacyjnej (w standardowych warunkach pomiaru). Wykonano szereg doświadczeń optymalizujących proces usuwania zawiesiny, a najkorzystniejsze warunki i wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Po usunięciu zawiesiny z wody złożowej w dalszym ciągu obecne były jony żelaza i manganu. Metale te, zwłaszcza w warunkach utleniających i podwyższonej wartości pH, mogą tworzyć koloidalne osady tlenków i wodorotlenków Fe(III), oraz Mn(II) i Mn(IV).

**Tabela 1**  
Charakterystyka wody złożowej

Oznaczenie fizykochemiczne			Wartość	Jednostka	
Analiza ogólna	1	Odczyn	7,40	pH	
	2	Gęstość (20°C)	1,11	g/cm <sup>3</sup>	
	3	Substancje rozpuszczone	217,50	g/dm <sup>3</sup>	
	4	Sucha pozostałość	241,80	g/dm <sup>3</sup>	
	5	Twardość ogólna	59,5	gCaCO <sub>3</sub> /dm <sup>3</sup>	
	6	Zawiesina	6,37	g/dm <sup>3</sup>	
Analiza szczegółowa	Kationy	7	Sód Na <sup>+</sup>	67,26	g/dm <sup>3</sup>
		8	Potas K <sup>+</sup>	1,86	g/dm <sup>3</sup>
		9	Wapń Ca <sup>2+</sup>	19,55	g/dm <sup>3</sup>
		10	Magnez Mg <sup>2+</sup>	2,56	g/dm <sup>3</sup>
		11	Żelazo ogólne (Fe <sup>2+</sup> +Fe <sup>3+</sup> )	1,56	g/dm <sup>3</sup>
		12	Mangan Mn <sup>2+</sup>	8,50	mg/dm <sup>3</sup>
		13	Metale ciężkie (suma)	4,10	mg/dm <sup>3</sup>
	Aniony	14	Chlorki Cl <sup>-</sup>	140,26	g/dm <sup>3</sup>
		15	Siarczany(VI) SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,67	g/dm <sup>3</sup>
		16	Wodorowęglany HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	230,43	mg/dm <sup>3</sup>
		17	Węglany CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0,0	mg/dm <sup>3</sup>
		18	Kwas m-krzemowy H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	12,80	mg/dm <sup>3</sup>
		19	Siarkowodór i siarczki H <sub>2</sub> S+S <sup>2-</sup>	0,43	mg/dm <sup>3</sup>

**Tabela 2**  
Efektywność sedymentacji fazy stałej ze względu na stopień oczyszczenia wody złożowej

Czas sedymentacji [min]	Efektywność sedymentacji [%]			
	Naturalna woda złożowa	Glikocel 1%	Magnafloc 0,5%	
		2 cm <sup>3</sup> /dm <sup>3</sup>	2 cm <sup>3</sup> /dm <sup>3</sup>	1 cm <sup>3</sup> /dm <sup>3</sup>
5	23,9	27,1	77,5	94,6
10	27,8	49,6	96,5	96,3
20	50,9	69,6	99,4	99,4
30	68,3	76,6	<b>100,0</b>	99,8
40	70,6	77,9		<b>100,0</b>
60	79,3	82,9		

Przeprowadzono również badania nad określeniem granicznych możliwości usuwania tych metali, na przykładzie próbki, w której pierwotnie było 1560 mg Fe/dm<sup>3</sup> i 8,50 mg Mn/dm<sup>3</sup>. Warunki doświadczeń oraz uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 3.

**Tabela 3**

Efektywność usuwania żelaza i manganu przy wykorzystaniu metod chemicznych

Nr	Rodzaj procesu	Warunki procesu	pH	Fe	Mn
				[mg/dm <sup>3</sup> ]	
1	Woda złożowa	Naturalna solanka – przed uzdatnieniem	7,40	1 560	8,50
2	Utlenianie	Utlenianie powietrzem – warunki naturalne, 24 h	7,40	121,40	8,50
3	Utlenianie	Utlenianie powietrzem – intensywne aeracja, 45 min	7,40	35,15	8,50
4	Utlenianie Alkalizacja	– intensywne aeracja, 45 min – NaOH 0,05M	9,50	14,82	5,15
5	Utlenianie Alkalizacja	KMnO <sub>4</sub> – 10 mg/dm <sup>3</sup> NaOH 0,05M	9,50	1,16	0,73
6	Utlenianie Alkalizacja	NaOCl – 3%, 2 cm <sup>3</sup> /dm <sup>3</sup> NaOH 0,05M	9,50	0,48	0,14

## 5. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Po przystąpieniu do badań laboratoryjnych, najpierw poddano ocenie stan fizykochemiczny wody złożowej (tab.1), która jest solanką o zawartości około 17% NaCl i pH ~ 7,40 z dużą ilością zawiesiny (6,37 g/dm<sup>3</sup>). Występują w niej znaczne ilości żelaza i manganu, których koncentracja wynosiła: 1560 mg Fe<sub>total</sub>/dm<sup>3</sup> i 8,50 mg Mn/dm<sup>3</sup>. Ze względu na występowanie tych metali, w badanej wodzie złożowej mogą przebiegać procesy chemiczne, których produkty mogą mieć charakter kolmatogenny.

Zawiesina występująca w naturalnej wodzie złożowej może zawierać składniki mineralne wydobywane z górotworu oraz osady pochodzenia chemicznego i biochemicznego. Przed ewentualnym zatłoczeniem wody złożowej do górotworu należy usunąć z niej zawiesinę, gdyż niezależnie od jej pochodzenia ma ona pierwotnie kolmatogenny charakter. Dlatego też pierwszą czynnością w uzdatnianiu wody złożowej było zbadanie procesu sedymentacji jednorodnej zawiesiny w warunkach naturalnych oraz przy zastosowaniu flokulantów (tab.2). W założonym czasie 1h przy naturalnej sedymentacji usunięto z niej tylko 80% zawiesiny, a wydłużenie czasu nie miało istotnego wpływu na poprawienie wyniku. Zastosowanie jednego z flokulantów – 0,5% Magnafloc w ilości 1 – 2 cm<sup>3</sup>/dm<sup>3</sup> – pozwoliło na całkowite usunięcie zawiesiny w czasie około 30 min, przy czym już po 10 min osiągnięty został wysoki 96-procentowy stopień oczyszczenia.

Po wydzieleniu z wody złożowej fazy stałej wykonana została analiza chemiczna roztworu dla określenia zawartości żelaza i manganu. Koncentracja wymienionych metali w oczyszczonej wstępnie solance wynosiła: 1560 mgFe/dm<sup>3</sup> i 8,50 mgMn/dm<sup>3</sup>. Szczegółowa analiza wykazała, że prawie 90% pozostałego w roztworze żelaza stanowiło Fe(II).

W dalszym etapie przeprowadzono badania mające na celu określenie granicznych możliwości pozbycia się tych potencjalnie kolmatogennych składników. W warunkach laboratoryjnych sprawdzono utleniające działanie powietrza oraz dwóch innych mocniejszych utleniaczy chemicznych:  $\text{KMnO}_4$  i  $\text{NaOCl}$ ., przy równoczesnej alkalizacji do  $\text{pH} = 9,50$ . Analiza wyników badań (tab. 3) wykazała, że usuwanie przeważającej ilości żelaza nie wymaga stosowania dodatkowych utleniaczy chemicznych, gdyż wystarczająco skuteczne jest intensywne napowietrzanie. Zawartość żelaza obniżyła się do wartości  $35,15 \text{ mgFe/dm}^3$ , w tych warunkach mangan w dalszym ciągu w całości pozostawał w roztworze. Zastosowanie silnego utleniacza, jakim jest  $\text{NaOCl}$  przy równoczesnej alkalizacji do  $\text{pH} = 9,50$  obniżyło koncentracje badanych metali do wartości  $0,48 \text{ mgFe/dm}^3$  i  $0,14 \text{ mgMn/dm}^3$ , nie nastąpiło zatem całkowite usunięcie żelaza i manganu. Na podstawie danych doświadczalnych można postawić tezę, że przy tak niskich koncentracjach tych metali środowisko wody złożowej dzięki obecności jonów  $\text{Cl}^-$  jest wystarczająco redukcyjne, aby stabilizować formę  $\text{Fe(II)}$  i  $\text{Mn(II)}$ . Uzyskane na podstawie badań zawartości żelaza i manganu można uznać za dopuszczalne przy zatłaczaniu solanki do górotworu, gdyż w tej postaci nie stwarzają zagrożenia kolmatacji ośrodka porowatego w strefie przyodwiertowej.

## 6. PODSUMOWANIE

Przy zatłaczaniu wód złożowych do górotworu szczególną uwagę należy zwrócić na stan techniczny otworu chłonnego i technologiczne parametry zatłaczania. Przy projektowaniu ciśnienia zatłaczania należy uwzględnić zarówno początkowe ciśnienie złożowe formacji chłonnej jak i wartość ciśnienia szczelinowania skał przepuszczalnych i zalegających w nadkładzie skał uszczelniających.

Przy opracowaniu technologii uzdatniania wody złożowej przed jej zatłoczeniem do górotworu szczególną uwagę należy zwrócić na zawarte w niej produkty stałe – pochodzenia pierwotnego i wtórnego, które mogą negatywnie wpływać na przepuszczalność skał w strefie przyodwiertowej, a tym samym na efektywność całego procesu zatłaczania.

Obecne w eksploatowanej wodzie złożowej zawiesiny mogą być szybko i skutecznie usunięte metodą sedymentacji przy zastosowaniu odpowiednio dobranego flokulanta. Stopień oczyszczenia wody złożowej z kolmatogennych składników można regulować w dość szerokim zakresie, wykorzystując nawet koagulacyjne właściwości naturalnej zawiesiny.

Usuwanie żelaza i manganu z postępowaniem procesu uzdatniania wody złożowej staje się coraz trudniejsze i może wymagać zastosowania silniejszych niż powietrze utleniaczy. Po usunięciu głównego ładunku tych metali, których kolmatogeny charakter nie podlega dyskusji, pozostała w solance ich ilość podlegać może stabilizacji. Fakt ten jest korzystny dla przeciwdziałania kolmatacji, jak również ogranicza zabiegi uzdatniające do niezbędnego minimum.

## LITERATURA

- [1] Janoha A., Kluk D.: *Zatłaczanie przefiltrowanych cieczy z odpadów wiertniczych do horyzontów chłonnych złóż węglowodorów*. Nafta Gaz, 3, 2006

- [2] Konopka E., Lewkiewicz-Małysa A.: *Badania nad unieszkodliwianiem ścieków kopalnianych towarzyszących surowcom węglowodorowym*. Kwartalnik AGH Górnictwo i Geoinżynieria, 3, 2006
- [3] Konopka E., Lewkiewicz-Małysa A.: *Physicochemical properties of mixed mine and deposit brines and their expected impact on the reservoir rock porosity*. Proc. 8th Conference on Environment and Mineral Processing, Czech Republic – Ostrava, 2004
- [4] Lewkiewicz-Małysa A.: *Biochemiczne aspekty zatłaczania solanek do poeksploatacyjnych otworów wiertniczych*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, 19/1, 2002
- [5] Lewkiewicz-Małysa A., Konopka E.: *Właściwości fizykochemiczne wód kopalnianych deponowanych w górotworze – ocena ze względu na możliwe konsekwencje środowiskowe*. Monografia PAN Ochrona i Inżynieria Środowiska – Zrównoważony rozwój, 25, 2004
- [6] Macuda J., Zawisza L.: *Techniczne uwarunkowania składowania odpadów płynnych w górotworze metodą otworową*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, R. 23/1, 2006
- [7] Macuda J., Zawisza L.: *Environmental hazard accompanying the liquid waste storage in the mass*. Acta Montanistica Slovaca. 2006 R. vol. 11, s. 98–103
- [8] Macuda J., Lewkiewicz-Małysa A.: *Deponowanie toksycznych odpadów chemicznych w głębokich otworach poeksploatacyjnych*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, tom 15, 1998
- [9] Zawisza L., Macuda J., Nagy S. i in.: *Klasyfikacja wglębnych struktur geologicznych pod kątem możliwości składowania odpadów w górotworze metodą otworową*. Praca niepublikowana, Kraków 2005
- [10] Zawisza L., Macuda J.: *Ocena szczelności struktur geologicznych przeznaczonych do składowania odpadów płynnych w górotworze*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, R. 23/1, 2006, s. 619–626