

Aleksandra Lewkiewicz-Malysa*, Bogumiła Winid*

GEOLOGICZNE ASPEKTY CHŁONNOŚCI OTWORÓW WYKORZYSTYWANYCH DO PODZIEMNEGO MAGAZYNOWANIA ODPADÓW**

1. WPROWADZENIE

W czasie eksploatacji złóż ropy naftowej i gazu ziemnego wraz z kopalinami użytecznymi wydobywane są również wody złożowe. Podstawowy ich skład chemiczny jest właściwy dla średnio lub silnie zmineralizowanych solanek chlorkowo-sodowych zawierających ponadto zawiesiny mineralne i organiczne oraz węglowodory [3]. Oprócz głównych jonów, takich jak sód, potas, magnez, wapń, chlorki, siarczany, zawierają przeważnie też mangan i żelazo, a w ilościach śladowych cynk, miedź, ołów, kadm, kobalt, chrom i nikiel. Przy eksploatacji złóż węglowodorów wody złożowe ulegają zanieczyszczeniu węglowodorami, metanolem, glikolami, fenolami oraz detergentami. Stanowią więc potencjalne zagrożenie dla wód powierzchniowych i podziemnych. Ograniczenie degradacji środowiska polega na podjęciu działań zmierzających do eliminacji lub zmniejszenia ładunków zanieczyszczeń odprowadzanych wraz z wodami złożowymi do środowiska naturalnego. Mechaniczne oczyszczanie, prowadzone w kopalniach, tylko w niewielkim stopniu usuwa zanieczyszczenia. Eksploatacja złóż węglowodorów musi zatem uwzględniać zagospodarowanie, w tym unieszkodliwianie, wód złożowych w dużo szerszym zakresie. Najbardziej efektywną metodą unieszkodliwiania wód złożowych jest ich zatłaczanie do głębokich struktur geologicznych. Ekonomicznie uzasadnione jest wykorzystanie do tego celu istniejących już otworów. Składowanie odpadów w górotworze regulują trzy podstawowe ustawy: *Prawo ochrony środowiska* (Dz. U. nr 62 poz. 627 z dnia 27.04.2001 wraz z późniejszymi zmianami), *Prawo geologiczne i górnicze* (Dz. U. nr 27 poz. 96 z 4.02.1994 wraz z późniejszymi zmianami głównie zawartymi w ustawie opublikowanej w Dz. U. nr 90 poz. 758 z dnia 22.04.2005) oraz ustawa o swobodzie działalności gospodarczej (Dz. U. nr 173 poz. 1807

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Praca wykonana w ramach badań statutowych nr 11.11.190.01

i Dz. U. nr 281 poz. 2777 z dnia 2.07.2004). Struktury geologiczne, do których możliwe jest zatłaczanie wód złożowych, muszą spełniać odpowiednie warunki. Dotyczy to zarówno parametrów warstwy chłonnej – takich jak porowatość, szczelinowatość, przewodność (przepuszczalność absolutna) – jak i jej przestrzennej struktury.

2. GEOLOGICZNE WARUNKI SKŁADOWANIA ODPADÓW W GÓROTWORZE W ŚWIETLE USTAWY *PRAWO GEOLOGICZNE I GÓRNICZE*

Odprowadzanie odpadów do warstw chłonnych wymaga uzyskania zgody właściwych organów administracji państwowej. Zgodnie z *Prawem geologicznym i górniczym* w górotworze mogą być składowane jedynie odpady obojętne oraz odpady inne niż niebezpieczne i obojętne, pochodzące z poszukiwania lub rozpoznawania złóż kopalin, ich wydobywania i przeróbki. Na działalność gospodarczą w zakresie bezzbiornikowego magazynowania substancji oraz składowania odpadów w górotworze, w tym w podziemnych wyrobiskach górniczych, wymagane jest uzyskanie koncesji, której udziela Minister Środowiska. Koncesja powinna określać: rodzaj i ilość odpadów, typ składowiska podziemnego, zakres i sposób jego monitorowania, wyznaczać granice przestrzeni bezzbiornikowego magazynowania substancji lub składowania odpadów oraz granice przestrzeni objętej przewidywanymi szkodliwymi wpływami takiej działalności. W celu bezzbiornikowego magazynowania substancji w górotworze niezbędne jest wykonanie dokumentacji hydrogeologicznej. Dokumentacja ta powinna określać: budowę geologiczną i warunki hydrogeologiczne badanego obszaru, warunki występowania wód podziemnych, w tym charakterystykę warstw wodonośnych określonego poziomu, jakość wody podziemnej, a w przypadku wody leczniczej trwałość jej składu chemicznego i cechy fizyczne oraz przedsięwzięcia niezbędne dla ochrony środowiska. Oprócz wyżej wymienionych wymagań dokumentacja hydrogeologiczna powinna również określać wpływ, jaki na stosunki wodne wywiera bezzbiornikowe magazynowanie substancji w górotworze [9].

3. GEOLOGICZNE I ŚRODOWISKOWE KRYTERIA WYBORU WARSTW CHŁONNYCH

Zatłaczanie wód złożowych do górotworu możliwe jest, jeżeli są spełnione określone warunki geologiczne. Charakteryzują one dany układ przestrzenny skał pod kątem możliwości magazynowania wód złożowych oraz bezpiecznego (z punktu widzenia ochrony środowiska) procesu. O pojemności warstwy chłonnej decyduje jej dostatecznie duża miąższość, przepuszczalność, porowatość oraz rozprzestrzenienie. Niepożądana jest obecność utworów, które mogłyby pęcznieć na skutek nawodnienia (iły), a także minerałów rozpuszczalnych. Miąższość nadległych utworów nieprzepuszczalnych musi zapewniać izolację utworów wodonośnych z uwzględnieniem zwiększonego ciśnienia wtłaczania. Istotna jest więc zarówno jej miąższość, brak przepuszczalności i ciągłość. Porowatość, szczelinowatość, kawernistość i przepuszczalność decydują o chłonności skał. Własności te można po-

prawiać, stosując zabiegi kwasowania i szczelinowania. Warunki izolacji spełniają zamknięte struktury geologiczne. Należą do nich tzw. „pułapki” – przestrzenie w kompleksach izolowanych, w których występują wody wysoko zmineralizowane, ropa naftowa lub gaz ziemny. Są to najczęściej górne części antyklin, brzegi synklin lub ograniczone dobrze izolowane części masywów skalnych. Oprócz „pułapek” innymi strukturami, które mogą być wykorzystane do składowania odpadów, są rozległe masywy skalne (przeważnie szczelinowate lub kawerniste) izolowane od stropu i spągu skałami nieprzepuszczalnymi oraz rozległe przepuszczalne wkładki wśród masywów utworów ilastych.

Znaczna głębokość, na jakiej występuje warstwa chłonna, ma wpływ na ochronę utworów występujących w jej rejonie – na przykład użytkowych poziomów wodonośnych. W przypadku minimalnych ilości ciekłych odpadów (10 000 m³ na rok) wynosi ona 500 m i nie powinna przekraczać 2000 m [8].

Warstwa chłonna musi być utworem, który nie ma wartości surowcowej. Dotyczy to zarówno litologii, jak i jakości występującej tam wody. Powinna zawierać tylko wodę niezdatną do użytkowania. Utwory nieprzepuszczalne (nadległe jak i spągowe) mają trwałe uniemożliwiać pionową migrację składowanych wód złożowych, jak i zabezpieczać występujące w rejonie poziomy wodonośne wód użytkowych. Stąd też wykluczone są tereny aktywne sejsmicznie, a przeciwskazaniem jest obecność uskoku o znacznym bądź nieznanym zasięgu.

Szczelność utworów nadkładu warstwy przepuszczalnej zapewnia jej odpowiednią miąższość i odpowiednio małą przepuszczalność (praktycznie jej brak) – współczynnik filtracji pionowej wynosi $k' < 1 \cdot 10^{-11}$ m/s (przepuszczalność poniżej $1 \cdot 10^{-3}$ mD). Minimalną miąższość warstwy izolującej można obliczyć [8] z zależności:

$$M = t \cdot \frac{(P_{tl} - P_{zl})}{Q} \cdot k'$$

gdzie:

M – miąższość warstwy izolującej,

t – czas tłoczenia cieczy, s,

P_{tl} – ciśnienie tłoczenia (w metrach słupa wody),

P_{zl} – ciśnienie złożowe (w metrach słupa wody),

Q – objętość cieczy przesączonej na jednostkę powierzchni, m³/m²,

k' – pionowy współczynnik filtracji, m/s.

Zmiany szczelności górotworu w otoczeniu formacji geologicznej, w której składowane są odpady płynne, mogą być wywołane niejednorodnością jej budowy oraz zmianami wynikającymi z osiadania nadkładu lub zmianami ciśnienia w strukturze. Do określenia szczelności warstw nadkładu stosowane są metody: geofizyczne, hydrodynamiczne, hydrochemiczne, geochemiczne i wiertnicze [11].

Czynnikami decydującymi o efektywnym zatłaczaniu cieczy odpadowych do warstw chłonnych jest ich miąższość, porowatość, współczynnik przepuszczalności, współczynnik filtracji, chłonność i ciśnienie złożowe. Cechy te decydują o pojemności struktury chłonnej.

W tabeli 1 przedstawiono przykładowe parametry charakteryzujące formacje geologiczne, w których zaprojektowano otwory do zatłaczania.

Tabela 1

Przykłady otworów projektowanych i wykorzystywanych do zatłaczania solanek do górotworu w USA i w Polsce [2, 5, 1]

Lokalizacja, formacja	Głębokość [m]	Miąższość [m]	Porowatość [%]	Przepuszczalność [mD]	Ciśnienie wtlaczania [MPa]	Wydajność [m ³ /min]
Fort Morgan, Colorado	1830	48	14	30	15,3	0,9
Minot North Dakota, wapień	1830	91	15	60	4,5	1,3
Arkansas City, Kansas, dolomity	1220	61	10	850	0,6	1,8
Clinton, Oklahoma, piaskowce	2316	61	18	75	9,5	1,9
Midland, Texas, piaskowce	1646	79	14	100	6,0	1,2
Gallup, New Mexico piaskowce	1950	64	20	105	5,2	1,3
Colorado, Mississippian Leadville, wapień	4900	127	>5		50	2,46
Polska, zapadlisko przedkarpackie, piaskowce	964	10	19,5	52,2	6,5	0,017
Polska, Niż Polski, wapień	1445	18	5,2	95,4	0,7	0,08

Ocena możliwości wtlaczania cieczy do utworów chłonnych musi uwzględnić oprócz wspomnianej wyżej pojemności struktury chłonnej także dopuszczalne ciśnienie wtlaczania oraz ocenę chłonności pojedynczego odwiertu. Pojemność izolowanej warstwy chłonnej jest równa przyrostowi zasobów sprężystych cieczy wskutek zwiększenia ciśnienia złożowego. Ciśnienie załączania cieczy do serii chłonnej ograniczone jest ze względu na bezpieczeństwo wyżej występujących poziomów wodonośnych i musi być tak dobrane, żeby nie dopuścić do przekroczenia ciśnienia szczelinowania górotworu [5]. Chłonność

masywu, w którym przewiduje się składowanie ciekłych odpadów, nie powinna być mniejsza niż $0.3 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}$ przy ilości odpadów poniżej $10\,000 \text{ m}^3/\text{rok}$ i proporcjonalnie wyższa w przypadku większych ilości [8].

Szczegółowa ocena otworu chłonnego uwzględnia wskaźnik geologiczny, ekologiczny i techniczny [6]. Wskaźnik geologiczny określany jest na podstawie analizy budowy geologicznej, badań laboratoryjnych, testów chłonności i prognozy chłonności.

4. CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA CHŁONNOŚĆ ODWIERTU

Wodochłonność jest to własność masywu skalnego charakteryzująca zdolność wchłaniania przez niego wody, wtłoczonej w jednostce czasu w określoną strefę badawczą pod danym ciśnieniem.

Chłonność odwiertu może być zdefiniowana jako [7]:

$$I = \frac{Q}{P_{it} - P_{zl}}$$

gdzie:

I – chłonności odwiertu, $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$,

Q – wydajność (ilość wtłaczanej cieczy), m^3/s ,

P_{it} – ciśnienie wtłaczania (w metrach słupa wody),

P_{zl} – średnie ciśnienie złożowe (w metrach słupa wody).

Połowiczny czas działania odwiertu chłonnego jest definiowany jako czas, w którym chłonność odwiertu obniży się o połowę w stosunku do wartości początkowej [7]. Zmiany wartości czynników wpływających na chłonność odwiertu można analizować na podstawie badań modelowych w warunkach laboratoryjnych. Badania symulacji obniżenia chłonności odwiertu omawiane w pracy [7] świadczą, że na obniżenie, czy nawet w rezultacie zanik chłonności odwiertu, wpływają takie czynniki geologiczne, jak niska klasa chłonności, niskie ciśnienie zatłaczania, niejednorodność formacji (warstwy) geologicznej, mała porowatość i przepuszczalność skał. Mała wydajność zatłaczania może być także spowodowana obniżeniem chłonności na skutek jakości wprowadzanej cieczy (np. o wysokiej mineralizacji).

Na obniżenie chłonności odwiertu wpływają drobne cząstki znajdujące się we wtłaczanej cieczy. Mogą one osadzać się na ścianach odwiertu bądź przemieszczać się w głąb warstwy chłonnej. Przepuszczalność kolektora może zostać obniżona na skutek grawitacyjnego osiadania cząstek i ich adsorpcji na ścianach porów. Proces ten zależy od średniej wielkości ziaren, porowatości formacji geologicznej i jej niejednorodności. Wielkości te pozostają we wzajemnej relacji [4]:

$$d_g = 200 \sqrt{\frac{k}{n}}$$

gdzie:

- d_g – rozmiar ziaren, μm ,
- k – współczynnik przepuszczalności, m^2 ,
- n – porowatość (ułamek dziesiętny).

Obniżenie przepuszczalności przestrzeni chłonnej wynikające z osiadania drobnych cząstek w porach skał powoduje zmniejszenie porowatości, zwiększenie powierzchni i krętości (ośrodka porowatego) formacji chłonnej [10]. Można to wyrazić zależnością:

$$\frac{k}{k_0} = k_{dp} \cdot k_{ds} \cdot k_{dt}$$

gdzie:

- k – przepuszczalność, m^2 ,
- k_0 – przepuszczalność początkowa (przed procesem włoczenia cieczy do warstwy), m^2 ,
- k_{dp} – przepuszczalność obniżona w wyniku spadku porowatości (bezwymiarowa),
- k_{ds} – przepuszczalność obniżona w wyniku zwiększenia powierzchni (bezwymiarowa),
- k_{dt} – przepuszczalność obniżona na skutek zwiększenia krętości (bezwymiarowa)

gdzie:

$$k_{dp} = \frac{n^3(1-n_0^2)}{n_0^3(1-n^2)}$$

$$k_{ds} = \left(\frac{1 + \sigma / (1 - n_0)}{1 + \sigma / (1 - n_0) (d_g / d_p)} \right)^2$$

$$k_{dt} = \frac{1}{1 + \beta \sigma}$$

- n – porowatość (ułamek dziesiętny),
- σ – ilość osadzonych cząstek stałych do jednostki objętości, przez którą przemieszcza się zatłaczana woda (ułamek dziesiętny),
- d_g – rozmiar ziaren, m ,
- d_p – rozmiar porów, m ,
- β – współczynnik uszkodzenia (bezwymiarowy),
- n_0 – porowatość początkowa skał (ułamek dziesiętny).

Zanik chłonności będzie tym gwałtowniejszy im mniejsza jest przepuszczalność warstwy, a także im mniejszy jest rozmiar ziaren.

Obniżenie chłonności wywołane osadzaniem drobnych cząstek przebiega szybciej w formacjach warstwowych (o różnej przepuszczalności) [7]. Najlepsze efekty można osiągnąć, zatłaczając wody do utworów o wysokiej przepuszczalności ograniczonych warstwami praktycznie nieprzepuszczalnymi.

Sprawdzeniem zdolności otworu do odbierania zatłaczanej wody są testy chłonności. Polegają one na badaniu ilości zatłaczanej cieczy do otworu i obserwowaniu zmian ciśnienia w czasie. Podczas testów rejestrowana jest wydajność tłoczenia, ciśnienie denne i temperatura. Zatłaczana solanka może być cieczą zmodyfikowaną, np. przez dodanie polimerów, które mają za zadanie obniżenie oporów przepływu w zarurowanym odwiercie. Wskazane jest, by podczas zatłaczania nie wzrastało ciśnienie – opory przepływu dla tłoczzonej cieczy są wtedy minimalne. Niskie ciśnienie występujące podczas zatłaczania powoduje, że możliwe jest zatłoczenie większej ilości cieczy. Różnica między ciśnieniem dynamicznym a ciśnieniem statycznym zmierzonym na głowicy odwiertu jest miarą oporów hydraulicznych. Czas rozprężania (spadku ciśnienia głowicowego) świadczy o zdolności odwiertu do przyjmowania wody.

5. PODSUMOWANIE

Zatłaczanie wód złożowych do górotworu możliwe jest, jeżeli są spełnione określone warunki geologiczne i środowiskowe. Najlepsze efekty można osiągnąć, zatłaczając wody do utworów o wysokiej przepuszczalności ograniczonych warstwami praktycznie nieprzepuszczalnymi.

Czynniki decydujące o chłonności formacji geologicznej, w której mogą być deponowane odpady, wynikają z cech jakościowych warstwy, jej porowatości, przepuszczalności, a także cech medium wtłaczanego.

Ocena możliwości zatłaczania cieczy do utworów chłonnych musi uwzględnić oprócz wspomnianej wyżej pojemności struktury chłonnej także dopuszczalne ciśnienie wtłaczania oraz ocenę chłonności pojedynczego odwiertu.

Na obniżenie, czy nawet w rezultacie zanik chłonności odwiertu, wpływają takie czynniki geologiczne, jak mała porowatość, przepuszczalność oraz niejednorodność formacji geologicznej, a także obecność drobnych cząstek w zatłaczanej cieczy i jej skład chemiczny.

LITERATURA

- [1] Kharaka Y.K., Ambats G., Thordsen J.J.: *Deep well injection of brine from Paradox Valley*. Colorado: Potential major precipitation problems remediated by nanofiltration, „Water Resourced Research” 1997, vol. 33, no 5, s. 1013–1020
- [2] LeGros P.G. i in.: *System Analysis of Brine Disposal From Reverse Osmosis Plants*. Office of Saline Water R&D report, 1970, no 587

- [3] Lewkiewicz-Małysa A., Konopka E.: *Właściwości fizykochemiczne wód kopalnianych deponowanych w górotworze – ocena ze względu na konsekwencję środowiskowe*. „Ochrona i inżynieria środowiska zrównoważony rozwój”, PAN, 2004, s. 167–173
- [4] Pearson J.R.A., Zazovsky A.F.: *A model for the Transport of Sand Grains from a Perforation during Unbearable Surge*. 1997, SPE 38634. Proceeding of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, TX 5–8 October
- [5] Rogoż M.: *Geologiczne i środowiskowe uwarunkowania włączania cieczy do górotworu*. „Przegląd Górniczy” 1992, t. 48, nr 10, s. 1–6
- [6] Rychlicki S., Solecki T., Stopa J.: *Wielokryteriowa ocena otworów chłonnych dla bezzbiornikowego magazynowania substancji w górotworze*. VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Nowe metody i technologie w geologii naftowej, wiertnictwie, eksploatacji otworowej i gazownictwie”, Kraków 1998, t. II, s. 343–351
- [7] Saripalli K.P., Dharma M.M., Bryant S.L.: *Modeling injection well performance during deep-well injection of liquid wastes*. „Journal of Hydrology” 2000, 227, s. 41–55
- [8] Ślizowski K.: *Hydrogeologiczne i górnicze kryteria składowania ciekłych odpadów niebezpiecznych w głębokich strukturach przepuszczalnych*. „Technika Poszukiwań Geologicznych” 2002, nr 1–2, s. 29–36
- [9] *Ustawa prawo geologiczne i górnicze z dnia 4.02.1994 (Dz. U. Nr 27 poz. 96) wraz z późniejszymi zmianami*
- [10] Wennberg K.E., Sharma M.M.: *Determination of the Filtration Coefficient and the Transition Time for Water Injection Wells*. Paper SPE38181 presented at the 1997 SPE European Formation Damage Conference, The Hague, The Netherlands
- [11] Zawisza L., Macuda J.: *Ocena szczelności struktur geologicznych przeznaczonych do składowania odpadów płynnych w górotworze*. „Wiertnictwo Nafta Gaz” (rocznik AGH) 2006, t. 23/1, s. 619–626