

Jan Macuda*, Ludwik Zawisza*

**METODYKA WYZNACZANIA
PARAMETRÓW HYDROGEOLOGICZNYCH
WARSTW CHŁONNYCH****

1. WSTĘP

Przy eksploatacji złóż ropy naftowej i gazu ziemnego występuje problem utylizacji silnie zmineralizowanych wód złożowych, separowanych na powierzchni z eksploatowanych węglowodorów. Aktualnie w praktyce przemysłowej zarówno w kraju, jak i za granicą wody złożowe są najczęściej utylizowane poprzez ich zatłaczanie do górotworu przez wytypowane, nieczynne odwierty poeksploatacyjne.

Zatłaczanie wód złożowych do górotworu jest najtańszym i bezpiecznym dla środowiska sposobem ich unieszkodliwiania, jednak warstwy chłonne, w których mają być deponowane muszą jednak spełniać odpowiednie kryteria geologiczne oraz ochrony środowiska.

W utworach zalegających na znacznych głębokościach przestrzenie porowe lub szczelinowe wypełnione są najczęściej wysoko zmineralizowaną solanką, która znajduje się pod znacznym ciśnieniem. Ocena pojemności warstw lub serii chłonnej, do której przewiduje się wtłaczanie wód złożowych, musi być przeprowadzona przy uwzględnieniu kilku kryteriów obejmujących:

- warunki geologiczne,
- pojemność warstw chłonnych,
- dopuszczalne ciśnienie zatłaczania wody złożowej,
- chłonność odwiertu zatłaczającego,
- zasięg strefy zatłaczania,
- zasięg nadciśnienia w warstwie chłonnej.

W myśl aktualnie obowiązujących przepisów, do wniosku o koncesję na zatłaczanie wód złożowych do górotworu, należy również dołączyć dokumentację hydrogeologiczną

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Praca wykonana w ramach badań statutowych

określającą warunki zatłaczania tych wód. Dokumentacja ta powinna zawierać oprócz oceny parametrów hydrogeologicznych warstwy chłonnej także charakterystykę wodochłonności górotworu.

2. OCENA WARUNKÓW GEOLOGICZNYCH

Podstawowym kryterium geologicznym procesu zatłaczania wód złożowych jest występowanie w górotworze warstw chłonnych o dużej miąższości, które charakteryzują się dostatecznie dużą przepuszczalnością i porowatością oraz znacznym rozprzestrzenieniem. Pojemność utworów chłonnych powinna być na tyle duża aby mogły pomieścić planowaną do wtłoczenia ilość wód złożowych. Według literatury [10, 13] utwory te powinny się charakteryzować następującymi parametrami:

- porowatość powyżej 20%,
- przepuszczalność powyżej 100 mD,
- brak frakcji ilastej, która może pęcznieć pod wpływem wtłaczanych wód złożowych.

W praktyce przemysłowej wody złożowe wtłaczane są do utworów charakteryzujących się znacznie niższymi wartościami porowatości i przepuszczalności. Za chłonne uważane są utwory charakteryzujące się przepuszczalnością powyżej 30 mD i porowatością powyżej 10% [8, 9].

3. OCENA POJEMNOŚCI WARSTW CHŁONNYCH

Ocena pojemności warstw lub serii chłonnej, do której przewiduje się wtłaczanie wód złożowych, nie może opierać się tylko na jednym kryterium tj. sumarycznej objętości przestrzni porowych lub szczelin. Pojemność ta jest równa przyrostowi zasobów sprężystych cieczy wskutek zwiększenia ciśnienia złożowego ΔP_z , którą można opisać równaniem:

$$V = A \cdot m \cdot \beta^* \cdot \Delta P_z \quad (1)$$

gdzie:

- V – pojemność warstwy chłonnej, m^3 ,
- A – powierzchnia występowania warstwy chłonnej, m^2 ,
- m – średnia miąższość warstwy chłonnej, m,
- β^* – współczynnik pojemności wodnej, MPa^{-1}
- ΔP_z – przyrost ciśnienia złożowego, MPa, który można obliczyć z wzoru:

$$\Delta P_z = P_g + \gamma_c \cdot h - P_z \quad (2)$$

gdzie:

- P_g – ciśnienie tłoczenia wody na głowicy odwiertu, MPa,
- P_z – ciśnienie złożowe w odwiercie przed wtłaczaniem, MPa,
- γ_c – ciężar właściwy wtłaczanej wody złożowej, MN/m^3 ,
- h – głębokość zalegania warstwy chłonnej, m.

4. DOPUSZCZALNE CIŚNIENIA ZATŁACZANIA WODY ZŁOŻOWEJ DO WARSTW CHŁONNYCH

Przy doborze ciśnienia zatłaczania wody złożowej do warstwy chłonnej należy szczególną uwagę zwrócić na bezpieczeństwo występujących powyżej poziomów wodonośnych. Ciśnienie to musi być tak dobrane, by nie doprowadzić do przekroczenia ciśnienia szczelinowania skał górotworu.

Sposób obliczania ciśnienia szczelinowania skał w odwiercie pod wpływem ciśnienia statycznego słupa wtłaczanej wody jest szeroko omówione w literaturze [1, 2]. W zależności od planowanej głębokości zatłaczania wód złożowych może być ono obliczone wzorami:

- dla odwiertów o głębokości mniejszej od 937,5 m

$$p_0 = 0,5 p_z + 0,0144 \sqrt{(225 + 70 p_z)^2 - 400 p_z^2} \quad (3)$$

- dla odwiertów tworów o głębokości większej niż 937,5 m

$$p_0 \cong 0,5 p_z + 0,29 \sqrt{8100 - p_z^2} \quad (4)$$

gdzie:

p_0 – ciśnienie wtłaczanej wody złożowej na dnie odwiertu, MPa,

$p_z = \gamma_g \cdot h$ – ciśnienie górotworu, MPa.

5. CHŁONNOŚĆ ODWIERTU ZATŁACZAJĄCEGO

Do obliczenia ciśnienia zatłaczania wody złożowej, pozwalającego na uzyskanie planowanej wydajności tłoczenia, potrzebne jest przeprowadzenie bardziej skomplikowanych obliczeń. Ciśnienie mierzone na głowicy odwiertu p_g , powiększone o ciśnienie słupa cieczy w odwiercie p_c i pomniejszone o ciśnienie złożowe w warstwie wodonośnej p_z , rozkłada się na ciśnienie efektywne p_e powodujące infiltrację cieczy w utwory chłonne oraz straty ciśnienia p_t na skutek tarcia przy przepływie wody przez kolumnę rur tłocznych w odwiercie oraz p_s na pokonanie oporów przepływu w strefie przyodwioertowej tzw. skin effect [3, 4]. Bilans ten można zapisać w postaci:

$$p_g + p_c - p_z = p_e + p_t + p_s \quad (5)$$

skąd ciśnienie głowicowe wynosi:

$$p_g = p_e + p_t + p_s + p_z - p_c \quad (6)$$

Ciśnienie efektywne p_e oblicza się zazwyczaj metodą Theisa–Jacoba. Wzór podstawowy dla wody ma postać:

$$S = \frac{Q}{4\pi k M} \ln \frac{2,25 k t}{r^2 \beta^*} \quad (7)$$

gdzie:

- S – depresja zwierciadła wody w przypadku jej pompowania z otworu, m,
- Q – wydajność pompowania, m³/s,
- r – promień otworu w strefie zafiltrowanej lub otwartej, m,
- t – czas liczony od rozpoczęcia pompowania lub właczania wody, s,
- β^* – współczynnik pojemności sprężystej serii chłonnej, m⁻¹.

W celu umożliwienia wykorzystania wzoru (7) do obliczania ciśnienia właczania cieczy o różnej lepkości i ciężarze właściwym, należy zastąpić w nim depresję S ciśnieniem efektywnym p_e oraz współczynnik filtracji k współczynnikiem przepuszczalności K , stosując następujące podstawienia:

$$S = \frac{p_e}{\gamma_c} \quad \text{oraz} \quad k = 10^{-6} K \frac{\gamma_c}{\mu} \quad (8)$$

gdzie:

- p_e – ciśnienie efektywne, MPa,
- γ_c – ciężar właściwy cieczy, MN/m³,
- k – współczynnik filtracji, m/s,
- K – współczynnik przepuszczalności, mD,
- μ – lepkość dynamiczna cieczy, cP.

Po wprowadzeniu do wzoru (7) podstawień (8) i wymnożeniu współczynników liczbowych otrzymuje się równanie:

$$p_e = 7,96 \cdot 10^6 \frac{Q \mu}{K M} f(t) \quad (9)$$

gdzie:

$$f(t) = \ln \frac{2,25 \cdot 10^{-6} K \gamma_c t}{\mu r^2 \beta^*} \quad (10)$$

Wzór (9) można zatem przekształcić do postaci:

$$Q = 1,26 \cdot 10^{-7} \frac{p_e K M}{\mu f(t)} \quad (11)$$

Analizując wzór (9) wyraźnie widać, że wraz z upływem czasu t , przy stałym ciśnieniu efektywnym p_e , maleje wydajność wtlaczania Q . Jest to związane z wypełnianiem się „zbiornika” wtlaczaną cieczą i wzrostem ciśnienia w otoczeniu odwiertu.

Metoda Theisa–Jacoba pozwala w stosunkowo prosty sposób ocenić współdziałanie odwiertów tłocznych dowolnie rozmieszczonych w obszarze występowania warstwy chłonnej, jak również uwzględnić granice utworów chłonnych.

Dla obliczenia strat ciśnienia p_t , na pokonanie tarcia przy przepływie cieczy przez kolumnę rur tłocznych w odwiercie, można wykorzystać wzór dla przepływu wody w rurociągu:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2gH}{\lambda \frac{l}{d}}} \quad (12)$$

gdzie:

- Q – natężenie przepływu cieczy w rurociągu, m^3/s ;
- d – średnica rurociągu tłoczego, m ;
- g – przyspieszenie grawitacyjne, m/s^2 ;
- λ – współczynnik tarcia hydraulicznego;
- l – długość rurociągu tłoczego, m ;
- H – wysokość różnicy ciśnień niezbędnej dla przepływu przez rurociąg cieczy z wydajnością Q , m .

Wprowadzając do tego wzoru podstawienia w postaci:

$$H = P_t / \gamma_c; \quad g = 9,81 m/s^2; \quad \lambda = 0,03 \quad (13)$$

po jego przekształceniu otrzymuje się:

$$p_t = 0,0025 \frac{\gamma_c l Q^2}{d^5} \quad (14)$$

Na straty ciśnienia w strefie przyodwiertowej spowodowane tzw. *skin effect* składają się zasadniczo dwa zjawiska:

- 1) opór mechaniczny spowodowany niedokładnym usunięciem płuczki wiertniczej z przestrzeni porowej oraz jej kolmatacją przez zawiesinę lub osad wytrącający się z wtlaczanej cieczy,
- 2) opór hydrauliczny spowodowany flucją, jaka może wystąpić w strefie przyodwiertowej wskutek przekroczenia granicy stosowalności prawa Darcy’ego w warunkach wymuszonych dużych prędkości przepływu wtlaczanej cieczy.

Stratę ciśnienia p_s , spowodowaną łącznym działaniem obu wymienionych zjawisk, można określić [3] na podstawie wyników próbnego pompowania lub wtłaczania wody ze stałą wydajnością Q , w warunkach nieustalonego ciśnienia, za pomocą wzoru:

$$p_c = \gamma_c \left[S_1 - 0,183 \frac{Q}{T} \left(\log \frac{a}{r^2} + 3,9 \right) \right] \quad (15)$$

gdzie:

- S_1 – depresja po pierwszej godzinie próbnego pompowania ze stałą wydajnością Q (w przypadku wtłaczania będzie to wysokość nadciśnienia), m,
- $T = k \cdot M$ – współczynnik przewodności hydraulicznej, m^2/s , $a = 100 k/\beta^*$ – współczynnik piezoprzewodności, m^2/s .

Stratę ciśnienia spowodowaną oporem hydraulicznym na ścianie otworu można wstępnie oszacować, wykorzystując wzory empiryczne stosowane do obliczania zeskoku swobodnego zwierciadła wody w otworze studziennym [7, 12, 8]. Poniżej podano wzory:

- wg Z. Pazdro [8]

$$p_s \cong \gamma_c \frac{0,005 S^2}{m} \quad (16)$$

- wg Ehrenbergera i Nahrganga [7]

$$p_s \cong \gamma_c \frac{S^2}{2H} \quad (17)$$

- wg Ölösa [12]

$$p_s \cong 0,228 \gamma_c \sqrt[3]{H/r} S^2 / H \quad (18)$$

- wg Szestakowa [12]

$$p_s \cong \gamma_c \left\{ \sqrt[3]{\left(0,73 \log \frac{\sqrt{Q/k}}{r} - 0,51 \right) \frac{Q}{k} + h^2} - h \right\} \quad (19)$$

We wzorach tych $H = p_z/\gamma_c$ oznacza wysokość ciśnienia złożowego, m.

6. ZASIĘG STREFY ZATŁACZANIA

Przy obliczaniu zasięgu strefy zatłaczania wód złożowych w warstwach chłonnych zakłada się, że przemieszczanie się w nich cieczy może następować jedynie pod wpływem ciśnienia zatłaczania oraz w wyniku dyfuzji [6, 11].

Przemieszczanie się frontu zatłaczanych wód złożowych promieniście od otworu tłocznego pod wpływem ciśnienia tłoczenia określone jest wzorem:

$$v_f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Q}{\pi M n_o t}} \quad (20)$$

gdzie:

v_f – prędkość przemieszczania się frontu zatłaczanej wody, m/s,
 t – czas, s.

Całkując wyrażenie (20) w przedziale od 0 do t_o otrzymuje się odległość frontu zatłaczanych wód złożowych od odwiertu tłocznego po czasie t_o od rozpoczęcia wtłaczania ze stałą wydajnością Q wyrażoną równaniem:

$$R_f = \int_0^{t_o} v_f dt = \sqrt{\frac{Q t_o}{\pi M n_o}} \quad (21)$$

Długość drogi dyfuzji cząsteczkowej określona jest wzorem

$$\sigma = \sqrt{2 \delta D_o t_o} \quad (22)$$

gdzie:

δ – współczynnik krętości kanałów porowych, w których zachodzi dyfuzja,
 D_o – dyfuzyjność wtłaczanej cieczy, m²/s.

Dyfuzyjność roztworu NaCl w przedziale stężeń 5,8÷58,0 g/dm³, w temperaturze 15 °C, wynosi 1,1·10⁻⁹ m²/s.

Dyfuzja powoduje stopniowe wyrównanie stężenia zatłaczanych wód złożowych ze stężeniem wód występujących w przestrzeni porowej warstw chłonnych. W przypadku solanek jest to wyrównanie stężeń soli. Iloraz stężeń wody wtłaczanej do wód występujących w warstwach chłonnych C/C_z ulega redukcji do 1,001 na drodze dyfuzji równej 3,29 σ , zatem zasięg zatłaczanej wody w warstwie wodonośnej R_z określony można określić wzorem:

$$R_z = R_f + 3,29 \sigma \quad (23)$$

Wartość współczynnika krętości δ można ustalić na podstawie wyników pomiarów oporności elektrycznej zatłaczanej wody R_c i skały porowatej nasyconej tą wodą R_s , za pomocą wzoru:

$$\delta = \frac{R_c}{n_o R_s} \quad (24)$$

7. ZASIĘG NADCIŚNIENIA W WODONOŚNEJ WARSTWIE CHŁONNEJ

Należy wyraźnie odróżnić zasięg migracji wód zatłaczanych R_z od zasięgu nadciśnienia złożowego R_n , zwanego również *zasięgiem represji*, który jest wywołany wtłaczaniem wód złożowych do warstwy chłonnej wypełnionej solanką złożową. Zasięg ten można określić za pomocą wzoru Theisa w postaci:

$$R_n = 1,5\sqrt{at} \quad (25)$$

Zasięg nadciśnienia R_n jest zawsze znacznie większy niż zasięg migracji zatłaczanych wód złożowych R_z .

Przedstawione wzory dotyczące zasięgu wód zatłaczanych i nadciśnienia są ważne dla warstwy chłonnej jednorodnej i izotropowej, o stałej miąższości i nieograniczonym rozprzestrzenieniu poziomym. W rzeczywistych warunkach przyrodniczych warstwa lub seria chłonna jest z reguły niejednorodna, o zmiennej miąższości i ograniczonym rozprzestrzenieniu. W takich warunkach dla określenia prognozy przemieszczania się wtłaczanych cieczy oraz propagacji strefy nadciśnienia konieczne jest zastosowanie metody modelowania numerycznego [5].

8. WNIOSKI

1. Zatłaczanie wód złożowych, separowanych przy eksploatacji węglowodorów, do górotworu jest najtańszym i bezpiecznym dla środowiska sposobem ich utylizacji. Warstwy chłonne, w których mają być one deponowane muszą spełniać odpowiednie kryteria geologiczne oraz ochrony środowiska.
2. Ocena pojemności warstw chłonnych powinna być przeprowadzona indywidualnie dla każdego przypadku, przy uwzględnieniu kryteriów obejmujących: warunki geologiczne, pojemność warstw chłonnych, dopuszczalne ciśnienie zatłaczania wody złożowej, chłonność odwiertu zatłaczającego, zasięg strefy zatłaczania oraz zasięg nadciśnienia w warstwie chłonnej.
3. Zatłaczanie wód złożowych do górotworu odbywa się na podstawie uzyskanej koncesji, której integralną częścią powinna być dokumentacja hydrogeologiczna określająca warunki zatłaczania tych wód.

LITERATURA

- [1] Amyx J.W., Bass D.M.: Whiting R.L. *Petroleum Reservoir Engineering*. Mc Graw-Hill Book Inc., New York 1960
- [2] Bloetscher F., Muniz A., Witt G.M.: *Groundwater Injection*. Mc Graw-Hill Book Inc., New York 2005
- [3] Everdingen van A.F.: *The Skin Effect and its Impediment to Fluid Flow into Wellbore*. Trans. AIME, 198, 1953, 171–176

- [4] Hagoort J.: *Fundamentals of gas reservoir engineering*. Developments in Petroleum Science, 23: Elsevier Science Publishers B.V. 327s. Amsterdam 1988
- [5] *Głębinyne zatłaczanie solanek z kopalń rud miedzi z wykorzystaniem struktur pogazowych*. Cuprum Sp. z o.o., Wrocław 1994
- [6] Lyons W.C.: *Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineering*. Gulf Publishing Company, Houston 1996
- [7] Nahrgang G.: *Zur Theorie des vollkommenen und unvollkommenen Brunnens*. Springer, Berlin 1954
- [8] Pazdro Z.: *Hydrogeologia ogólna*. Wyd. III, Wydaw. Geologiczne, Warszawa 1983
- [9] Rogoż M.: *Geologiczne i środowiskowe uwarunkowania wtłaczania cieczy do górotworu*. Przegląd Górniczy, nr 10, Katowice 1992
- [10] Rogoż M.: *Hydrogeologia kopalniana z podstawami hydrogeologii ogólnej*. GIG, Katowice 2004
- [11] Rogoż M.: *Dynamika wód podziemnych*. GIG, Katowice 2007
- [12] Sozański J.: *Odwadnianie kopalń odkrywkowych*. Wydaw. Śląsk, Katowice 1981
- [13] Schwartz F.W., Zhang H.: *Fundamentals of Ground Water*. John Wiley & Sons Inc., New York 2003