

Stanisław Dubiel*

DOBÓR SPOSOBU INTERPRETACJI KRZYWYCH WZNIOSU ZWIERCIADŁA WODY W STUDNIACH GŁĘBINOWYCH, Z UWZGLĘDNIENIEM TECHNOLOGII OPRÓBOWANIA**

1. WSTĘP

Wzrost zapotrzebowania na wiercenie studni głębinowych, w tym także przeznaczonych do zrztu wód kopalnianych, stwarza konieczność doskonalenia technologii ich opróbowania oraz doboru odpowiednich sposobów określania parametrów hydrogeologicznych udostępnionych warstw wodonośnych.

Do opróbowywania wielowarstwowych złóż wody w studniach wierconych obrotowo stosuje się obecnie coraz częściej selektywną technologię opróbowania wybranej warstwy, używając do tego celu zestawu rurowego próbnika złoża z dwoma uszczelniaczami. Próbnikami tymi można wykonywać opróbowanie warstw wodonośnych w postaci testów:

- przyływu,
- odbudowy ciśnienia dennego,
- chłonności,
- interferencji.

Technikę i technologię selektywnego opróbowania warstw wodonośnych rurowymi próbnikami złoża oraz metody interpretacji krzywych odbudowy ciśnienia dennego, a także przykłady oceny wartości przemysłowej tych warstw w otworach geologiczno-poszukiwawczych omówiłem w pracy *Problemy opróbowania warstw perspektywicznych rurowymi próbnikami złoża* [2].

Stosując różne technologie opróbowania tej samej warstwy, uzyskuje się możliwość porównania i ujednoczenia wyników oraz ocenienia warunków złożowych. Wyniki opróbowania w postaci krzywych spadku i wzniosu zwierciadła wody lub krzywych chłonności oraz

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, AGH Kraków.

** Praca wykonana została w ramach badań statutowych Zakładu Ochrony Środowiska w Gospodarce, Wydziału Wiertnictwa Nafty i Gazu AGH.

krzywych przyływu i odbudowy ciśnienia dennego (rejestrowanych przy użyciu mechanicznych lub elektronicznych ciśnieniomierzy wgłębnych), umożliwiając stosowanie różnych sposobów określania parametrów hydrogeologicznych warstw wodonośnych udostępnianych w studniach głębinowych wierconych obrotowo do głębokości kilkuset, a nawet kilku tysięcy metrów [1–3, 5, 6, 9].

2. PODSTAWY INTERPRETACJI KRZYWYCH WZNIOSU ZWIERCIADŁA WODY

Interpretację krzywych wzniosu zwierciadła wody w studniach przedstawili najpierw C.V. Theis [10] i I.K. Wenzel [1, 11]. Później D.R. Horner przedstawił metodę określania współczynnika wodoprzewodności (przewodności hydraulicznej) na podstawie wyników okresowej obserwacji zmian dynamicznego zwierciadła wody po przerwaniu jej pompowania [4], opartej na aproksymacji logarytmicznej równania Theisa.

Zgodnie z metodą Hornera wyniki opróbowań przedstawia się za pomocą zależności wzniosu zwierciadła od czasu w postaci złożonej, w układzie pojedynczologarytmicznym. Metoda Hornera oparta jest na zasadzie superpozycji przy pseudostacjonarnym charakterze filtracji wody w warstwie skał zbiornikowych. Wartość wzniosu zwierciadła jest różnicą między wysokościami dynamicznymi zwierciadła, mierzonymi w bieżących momentach wznoszenia a wysokością dynamiczną zwierciadła w końcowym momencie pompowania. Czas w postaci złożonej jest sumą czasu pompowania i bieżącego czasu wzniosu zwierciadła przypadającą na bieżący czas wzniosu.

W metodzie Hornera współczynnik wodoprzewodności określa się na podstawie nachylenia wykresu wzniosu zwierciadła wody we wspomnianym układzie pojedynczologarytmicznym. Później został opracowany sposób określania współczynnika piezoprzewodności, a także sposób interpretacji wyników po pompowaniu ze zmiennym wydatkiem [1]. Po dostatecznie długim okresie stabilizacji dynamicznego zwierciadła wody można także określać podstawowe parametry hydrogeologiczne warstwy wodonośnej na podstawie ograniczonego, początkowego odcinka czasu wzniosu zwierciadła bez uwzględniania czasu w postaci złożonej [5].

Wstrzymanie pompowania jest kontynuacją tego samego opróbowania, które w tym wypadku przyjmuje odmienną, kolejną postać w fazie wzniosu zwierciadła wody. Interpretacja wyników tej kolejnej fazy opróbowania charakteryzuje się pewną specyfiką w porównaniu do interpretacji wyników pierwszej fazy (spadku zwierciadła). Odnosi się to przede wszystkim do konieczności uwzględnienia następstw oddziaływania pierwszej fazy na złożę, które sprowadzają się do poszukiwania prawidłowego zakresu wartości wzniosu zwierciadła.

Użyteczną cechą informacji uzyskanych podczas obserwacji wzniosu zwierciadła jest mniejsza niż w fazie spadku zależność od nieregularnych zmian wydatku pompowania. Przy interpretacji krzywych wzniosu zwykle pomija się efekt magazynowy otworu studziennego lub obserwacyjnego, tj. efekt dopełniania się studni wodą, który powinien być uwzględniony tylko przy małych wartościach wodoprzewodności warstwy wodonośnej.

Interpretacja wyników opróbowania warstwy wodonośnej metodą Hornera, w najprostszym przypadku technologicznym, opiera się na następującej zależności [4]:

$$s' = \frac{0,183 \cdot Q}{k_f \cdot M} \cdot \log \frac{t_p + t'}{t'} \quad (1)$$

gdzie:

- s' – wznios zwierciadła wody w studni [m];
- Q – wydatek pompowania wody [m³/s];
- k_f – współczynnik filtracji skał wodonośnych [m/s];
- M – miąższość warstwy wodonośnej [m];
- t_p – czas trwania pompowania, [s];
- t' – bieżący czas wzniosu zwierciadła [s].

Wzór ten wyprowadzono, opierając się na zasadzie superpozycji i rozpatrując pozostałe (szczątkowe) obniżenie zwierciadła (depresję) s' jako rezultat jednoczesnego oddziaływania trwającego pompowania $s' = f \left[\log(t_p + t') \right]$ i sprężania $s' = f(\log t')$ w momencie realnego przerwania pompowania, przy równości tego wydatku z wydatkiem sprężania.

Interpretacja wyników obserwacji wzniosu zwierciadła, prowadzona na podstawie tego wzoru, polega na sporządzeniu wykresu zależności wzniosu zwierciadła w funkcji czasu

$$s' = f \left(\log \frac{t_p + t'}{t'} \right) \quad (2)$$

Na osi rzędnych odcina się więc wartości wzniosu zwierciadła, tj. różnicę pomiędzy bieżącą wysokością zwierciadła dynamicznego w momencie jego wzniosu (h_{di}) a wysokością zwierciadła dynamicznego w czasie przerwania pompowania (h_{dp}), natomiast na osi odciętych – wartości logarytmu czasu w postaci złożonej.

3. SPOSOBY OKREŚLANIA PARAMETRÓW HYDROGEOLOGICZNYCH WARSTWY WODONOŚNEJ NA PODSTAWIE OBSERWACJI WZNIOSU ZWIERCIADŁA WODY PO PRZERWANIU JEJ POMPOWANIA ZE STAŁYM WYDATKIEM

Wzór (1) daje możliwość określenia tylko współczynnika wodoprzewodności (lub filtracji)

$$T = k_f \cdot M = \frac{0,183 \cdot Q}{C} \quad (3)$$

gdzie:

- T – wodoprzewodność (współczynnik przewodności hydraulicznej) [m²/s];
- C – nachylenie wykresu obserwacji wzniosu zwierciadła będącego zależnością [m].

W jednologarytmicznym układzie współrzędnych wartość nachylenia wykresu określa się wzorem

$$C = \frac{s'_2 - s'_1}{\left(\frac{t_p + t'}{t'} \right)_2 - \left(\frac{t_p + t'}{t'} \right)_1} \quad (4)$$

Za pomocą dodatkowych przekształceń można również uzyskać wzór na określenie współczynnika piezoprzewodności [1]

$$\log a = 2 \cdot \log x - 0,35 + \frac{S_{\max}}{C} - \log t_p = N \quad (5)$$

$$a = 10^N \quad (6)$$

a tym samym, także współczynnika odsączalności sprężystej

$$\mu^* = \frac{T}{a} \quad (7)$$

gdzie:

a – współczynnik piezoprzewodności [m^2/s];

s_{\max} – maksymalny spadek lub wznios zwierciadła wody podczas opróbowania [m].

Stwierdzono [7], że gdy $t' \leq 0,1 t_p$, wpływ wcześniejszego pompowania można pominąć, a wznios zwierciadła opisać równaniem

$$s' = -\frac{Q}{4\pi k_f M} Ei\left(-\frac{x^2}{4at'}\right) \quad (8)$$

gdzie:

Ei – całkowa funkcja wykładnicza;

x – odległość otworu obserwacyjnego od studni [m].

Wówczas interpretację wyników wzniosu zwierciadła realizuje się dokładnie tak samo, jak podczas spadku zwierciadła, tj. sposobami opartymi na następujących zależnościach [1]:

– zależność czasowa

$$s' = f(\log t') \quad (9)$$

– zależność przemieszczeniowa

$$s' = f(\log x) \quad (10)$$

– zależność kompleksowa

$$s' = f(\log t' / x^2) \quad (11)$$

Przedziały stosowalności wymienionych sposobów interpretacji wyników obserwacji wzniosu zwierciadła ustala się na podstawie wartości czasu kontrolnego. Powinien być wówczas spełniony warunek [1]

$$t_p \geq t'_k = \frac{x^2}{0,4 \cdot a} \quad \text{oraz} \quad t' > t'_k \quad (12)$$

Stwierdzono, że pominięcie wpływu pierwszej fazy opróbowania (czyli pompowania) przy interpretacji wyników wzniosu zwierciadła sposobem obserwacji czasowych jest obciążone błędem, którego wielkość zależy od wartości ilorazu t'/t_p . Błąd ten może wynosić

nawet 45% [1]. Jednak w razie zmian przepuszczalności skał zbiornikowych w strefie przystudziennej (*skin-effect*) i wystąpienia dodatkowych oporów hydraulicznych przepływu wody do studni, zachodzi przesunięcie wzdłuż osi rzędnych wykresu próbnego pompowania. Dlatego do określenia współczynnika wodoprzewodności (lub filtracji) jako podstawowe wykorzystuje się informacje uzyskane z interpretacji wyników wzniosu zwierciadła, ponieważ w tym wypadku nie występują zasadnicze zmiany wydatku w odniesieniu do średniej ustabilizowanej jego wartości w okresie pompowania. Na tym etapie opróbowania zmiany te nie mają znaczenia, gdyż nie powodują znacznego rozrzutu punktów na wykresach obserwacji czasowych wzniosu zwierciadła.

Wzory do obliczania podstawowych parametrów hydrogeologicznych warstwy wodonośnej, z wykorzystaniem omawianych sposobów interpretacyjnych opartych na wynikach obserwacji wzniosu zwierciadła zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Zestawienie wzorów określania parametrów hydrogeologicznych warstwy wodonośnej, na podstawie wyników obserwacji wzniosu zwierciadła wody

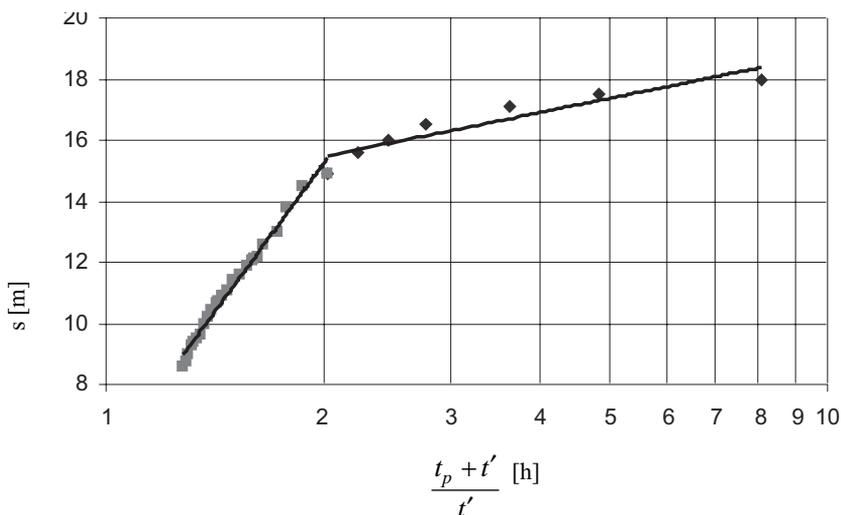
Czasowe kryteria wyboru	Sposoby interpretacji wyników wzniosu w zależności od rodzaju obserwacji		
	Obserwacje czasowe	Obserwacje rozprzestrzeniania lejka depresyjnego $s' = f(\log x)$	Obserwacje kompleksowe $s' = f(\log t' / x^2)$
$t' \geq 0,1 t_p$	$s' = f\left(\log \frac{t_p + t'}{t'}\right); T = \frac{0,183 \cdot Q}{C}$ $\log a = 2 \cdot \log x - 0,35 + \frac{s_{\max}}{C} - \log t_p$	–	–
$t' \leq 0,1 t_p$	$s' = f(\log t'); T = \frac{0,183 \cdot Q}{C}$ $\log a = 2 \cdot \log x - 0,35 + \frac{A}{C}$	$T = k_f \cdot M = \frac{0,366 \cdot Q}{C}$ $\log a = \frac{2A}{C} - 0,35 - \log t'$	$T = \frac{0,183 \cdot Q}{C}$ $\log a = \frac{A}{C} - 0,35$

Źródło: [1]

4. PRZYKŁAD INTERPRETACJI KRZYWEJ WZNIOSU ZWIERCIADŁA WODY PODCZAS OPRÓBOWYWANIA PIASKOWCÓW WODONOŚNYCH W STUDNI T-1

Za pomocą studni T-1 o głębokości 464 m, udostępniono wodonośne piaskowce warstw łazickich o sumarycznej miąższości około 356 m, przykryte ilami mioceniowymi o grubości około 95 m. Poszczególne warstwy piaskowców poprzedzielane są cienkimi warstwami

iłowców. Wyniki opróbowania tych warstw w rozpatrywanej studni, uzyskano w postaci zmian wysokości dynamicznego zwierciadła wody w funkcji czasu, w okresach opadania, stabilizacji oraz wzniosu tego zwierciadła [8].



Rys. 1. Wykres interpretacji wyników wzniosu zwierciadła wody uzyskany podczas opróbowywania piaskowców wodonośnych warstw łaziskich w studni T-1

Interpretacji wyników pomiaru wzniosu zwierciadła dokonano metodą Hornera, analizując wykres przedstawiony na rysunku 1:

$$s' = f\left(\log \frac{t_p + t'}{t'}\right).$$

Jak wynika z rysunku 1, punkty pomiarowe wykresu rozrzutu przybliżono dwiema prostymi różniącymi się bardzo nachyleniem do osi odciętych. Linia górna łącząca początkowe punkty pomiarowe charakteryzuje się znacznie mniejszym nachyleniem ($C_1 = 0,452$ m/cykl log) niż linia dolna, łącząca dalsze i końcowe punkty pomiarowe ($C_2 = 10,6$ m/cykl log). Oznacza to, między innymi, występowanie wokół studni dwu stref złożowych (bliskiej i odległej) znacznie różniących się właściwościami filtracyjnymi.

Uwzględniając końcową wartość wydatku pompowania, wynoszącą około $7,8$ m³/h, zgodnie ze wzorem (3), mniejszemu nachyleniu odpowiada większa wodoprzewodność skał zbiornikowych ($T_1 = 3,16$ m²/h), a większemu nachyleniu – mniejsza wodoprzewodność ($T_2 = 0,135$ m²/h). Można przypuszczać, że skały zbiornikowe w bliskiej strefie przystudziennej uległy silnemu przemyciu podczas długotrwałego pompowania oczyszczającego oraz pompowania pomiarowego. Z tego względu bardziej wiarygodne są wyniki obliczeń dotyczące odległej strefy złożowej.

Ze względu na zbyt małe zmiany zwierciadła wody w otworach obserwacyjnych P-1, P-3 i T-2 pomiarów wzniosu zwierciadła dokonano tylko w studni T-1. Dlatego nie można zastosować innych, wcześniej opisanych sposobów interpretacji wyników tego opróbowania.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzone badania i obliczenia pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków:

- 1) Analiza prawidłowości wzniosu zwierciadła po okresie pompowania studni ze stałym wydatkiem wykazała, że sposoby interpretacji tego typu wyników opróbowania umożliwiają uzyskanie wiarygodnych wyników określania współczynników hydroprzewodności i piezoprzewodności warstwy wodonośnej pod warunkiem, że warstwa wodonośna jest jednorodna, nieograniczona w swej rozciągłości w promieniu opróbowywanej strefy złoża i charakteryzuje się zwierciadłem napiętym.
- 2) W wypadku stałego wydatku pompowania wody ze studni, lecz zbyt krótkiego okresu stabilizacji zwierciadła, należy uwzględnić ten fakt poprzez wprowadzanie składanej formy czasu w postaci ilorazu

$$\left(\frac{t_p + t'}{t'} \right);$$

natomiast gdy po pompowaniu osiągnięto stabilizację zwierciadła wody, uwzględniać można wyłącznie zależność depresji od logarytmu czasu wzniosu zwierciadła, liczonego od momentu przzerwania pompowania. Wówczas wykres sporządza się w układzie współrzędnych $[s', \log t']$.

- 3) Interpretację wyników opróbowania w postaci wzniosu zwierciadła po wcześniejszym pompowaniu wody ze stałym wydatkiem można przeprowadzać za pomocą obserwacji:
 - czasowych z uwzględnieniem następstw wcześniejszego pompowania;
 - przemieszczeniowych przy warunku $t = \text{const} < 0,1 t_p$;
 - kompleksowych (rzadko stosowanych) dla $t \leq 0,1 t_p$.
- 4) Ignorowanie charakteru zmian wydatku wcześniejszego pompowania podczas interpretacji danych z obserwacji wzniosu zwierciadła prowadzi do znacznych omyłek, których znak i wartość zależy od charakteru i stopnia pompowania, czasu trwania opróbowania, a także odległości otworów obserwacyjnych od otworów studziennych. Największą wartość osiągają błędy przy czasowych obserwacjach wzniosu zwierciadła.

LITERATURA

- [1] Borjewskij B.W., Samsonow B.G., Jazwin L.S.: *Metodika opriedielienija parametrow wodonosnych gorizontow po dannym otkacziek*. Niedra, Moskwa 1973.
- [2] Dubiel S., Chrzęszcz W., Rzycki M.: *Problemy opróbowania warstw perspektywicznych rurowymi próbnikami złoża*. UWND AGH, Kraków 2003.

- [3] Dubiel S.: *Dobór sposobu określania parametrów hydrogeologicznych nieograniczonej warstwy wodonośnej w zależności od technologii jej opróbowania*. „Wiertnictwo Nafta Gaz” 2005, t. 22, z. 2.
- [4] Horner D.R.: *Pressure build-up in wells*. [W:] *Third World Petroleum congress. The Hague proc. Sect. II.*, Hague 1951.
- [5] Kulma R.: *Podstawy obliczeń filtracji wód podziemnych*. UWND AGH, Kraków 1995.
- [6] Przybyłek J., Brylska E., Dąbrowski S.: *Zasady obliczeń filtracji nieustalanej według wzorów Theisa i Hantusha*. Warszawa 1971.
- [7] Samsonow B.G., Burdakowa O.L., Kriwosziewa L.I.: *Riekomiendacji po obrabotkie riezultata opytnych rabot na osnovie urawnienij nieustanowiwsziegosja dwizienija*. Izd. Wtorogo gidrogeologiczieskiego uprawlienija, Moskwa 1969.
- [8] *Sprawozdanie z prac wiertniczych i badań geologicznych wykonanych do zatłaczania metodą recyrkulacji zasolonych wód z kopalń „Czeczott” i „Piastr” otworami T-1 i T-2 zlokalizowanymi w rejonie ujścia Gostyni do Wisły*. Katowickie Przedsiębiorstwo Geologiczne, Katowice 1992.
- [9] Szczepański A.: *Dynamika wód podziemnych*. Warszawa 1977.
- [10] Theis C.V.: *The relation between lowering of the piezometric surface and rate and duration of discharge of a well using groundwater storage*. „Transactions of the American Geophysical Union” 1935, No. 16, s. 519–524.
- [11] Wenzel J.K.: *Methods for determining permeability of water-bearing materials, with special reference to discharging-well methods with a section on direct laboratory method and bibliography an permeability and laminar flow*. „U.S. Geol. Survey Water Supply” 1942, s. 887.