

Bohdan NIELUBOWICZ, Kazimierz URBAŃCZYK, Andrzej KUNSTMAN

Metoda pulsacyjna określania własności hydrogeologicznych ciśnieniowych horyzontów wód podziemnych

WSTĘP

Badania pulsacyjne służą do polowego określania podstawowych parametrów hydrogeologicznych ciśnieniowych horyzontów wodonośnych. Dzięki zastosowaniu nowej techniki pomiarowej możliwe jest szybkie określenie współczynnika filtracji, odsączalności i piezoprzewodnictwa.

Metoda badań pulsacyjnych polega na wywołaniu w warstwie wodonośnej fal ciśnieniowych poprzez cykliczne zatłaczanie do niej wody i na rejestracji zmian ciśnienia w różnych punktach tej warstwy. Charakter i wielkość tych zmian pozwala bowiem na określenie tych parametrów warstwy, od których te zmiany zależą, a więc współczynnika filtracji i odsączalności.

Dla realizacji badań pulsacyjnych konieczne są co najmniej dwa otwory dogłębione w analizowanym horyzoncie wodonośnym. Jeden z nich jest otworem tłoczno-pulsacyjnym, a drugi odbiorczo-pomiarowym. Dla uproszczenia otwory typu pierwszego określane będą jako pulsacyjne, a typu drugiego jako odbiorcze.

Technika pomiarowa sprowadza się do cyklicznego zatłaczania wody do otworu pulsacyjnego oraz do przeprowadzania pomiaru zmian ciśnienia w otworze odbiorczym. Stosowana aparatura badawczo-pomiarowa ogranicza się do zaopatrzenia otworu pulsacyjnego w pompę, a otworu odbiorczego w różnicowe urządzenie pomiarowe do rejestracji zmian ciśnienia. Wymagana czułość pomiarów zmian ciśnień odbiorczych wynosi ok. 1 cm słupa wody. Jedynie w wyjątkowych przypadkach wymagana czułość winna być rzędu 1 mm słupa wody.

Charakterystyka pomiarów dla otworu pulsacyjnego przedstawia się następująco: pomiar wydatku wody zatłaczanej do otworu, pomiar interwałów pulsacji i pomiar interwałów międzypulsacyjnych.

Charakterystyka pomiarów dla otworu odbiorczego sprowadza się do: pomiarów wielkości chwilowych ciśnień odbiorczych poszczególnych pulsów i pomiarów czasów opóźnienia ekstremalnych wielkości chwilowych ciśnień odbiorczych poszczególnych pulsów.

Konsekwencją wywołania cyklicznych zmian ciśnienia w otworze pulsacyjnym jest propagacja fal ciśnieniowych w wodonośnym środowisku filtracyjnym. Wielkość maksymalnych ciśnień odbiorczych jest funkcją wzajemnej odległości pomiędzy otworami badawczymi oraz własności hydraulicznych środowiska porowatego i ilości tłoczzonej wody.

Propagacja fal ciśnieniowych następuje poprzez wykorzystanie wody zawartej w warstwie jako ośrodka przenoszącego ciśnienie. Dlatego też wyliczenie podstawowych parametrów hydrogeologicznych pomiędzy obu otworami pomiarowymi przeprowadza się w oparciu o podstawowe równanie dyfuzji dla przepływów nie ustalonych w środowisku porowatym.

Przy opracowaniu niniejszego tematu korzystano z prac podanych w piśmiennictwie.

ANALIZA POJEDYNCZEGO PULSU

Filtracja dla warunków ciśnieniowych w środowisku porowatym o charakterze jednorodnym i izotropowym opisana jest równaniem:

$$\nabla^2 p = a \frac{\partial p}{\partial t} \quad [1]$$

gdzie p oznacza ciśnienie, zaś a wyraża się wzorem:

$$a = \frac{\mu}{T} = \frac{\gamma(n\beta_w + \beta_s)b}{kb} \quad [2]$$

gdzie:

- μ — współczynnik odsączalności;
- $T = kb$ — współczynnik przewodności warstwy wodonośnej;
- k — współczynnik filtracji;
- b — miąższość warstwy wodonośnej;
- γ — ciężar właściwy wody;
- n — współczynnik porowatości;
- β_w — współczynnik ściśliwości objętościowej wody;
- β_s — współczynnik ściśliwości szkieletu gruntowego.

Odwrotność współczynnika a występuje czasem w literaturze pod nazwą współczynnika piezoprzewodnictwa lub dyfuzywności.

Filtrację w otoczeniu pojedynczej studni, pracującej w środowisku jednorodnym i izotropowym, najlepiej jest wyrazić we współrzędnych biegunowych r, φ :

$$x = r \cos \varphi \quad y = r \sin \varphi$$

Zakładając szczelność stropu i spągu warstwy wodonośnej otrzymuje się równanie:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = a \frac{\partial p}{\partial t} \quad [3]$$

Rozpatrzmy przypadek studni dogłębionej, która rozpoczęła pracę ze stałą wydajnością Q w chwili $t_0 = 0$.

Jako warunek początkowy przyjmuje się, że w chwili t_0 ciśnienie p w warstwie wodonośnej na całym obszarze jest równe zero:

$$p(r, 0) \equiv 0 \quad [4]$$

Za warunki brzegowe przyjęto:

a) zanik oddziaływania studni w nieskończoności:

$$p(\infty, t) \equiv 0 \quad [5]$$

b) cała ilość wody tłocznej do studni rozplywa się izotropowo w środowisku porowatym:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \left(2\pi r T \frac{\partial p}{\partial r} \right) = Q \quad [6]$$

Rozwiązaniem równania [3], z warunkami [4], [5] i [6] jest funkcja (np. M. S. Hantush, 1964):

$$p(r, t) = -\frac{Q}{4\pi T} E_i \left(-\frac{ar^2}{4t} \right) \quad [7]$$

gdzie E_i — eksponenta całkowita, wyrażona wzorem:

$$E_i(-x) = -\int_x^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$$

Równanie [7] nosi w literaturze nazwę równania Theisa i odpowiada studni pracującej ze stałą wydajnością Q od chwili $t_0 = 0$.

Studni pracującej ze stałą wydajnością $-Q$ od chwili $t_0 + \Delta t$ odpowiada równanie:

$$p(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} E_i \left(-\frac{ar^2}{4(t-\Delta t)} \right) \quad [8]$$

Studnię pracującą ze stałą wydajnością Q od chwili t_0 do chwili $t_0 + \Delta t$ można zastąpić przez superpozycję studni opisywanych równaniami [7] i [8]:

$$\begin{cases} p(r, t) = \frac{-Q}{4\pi T} \left[E_i \left(\frac{-ar^2}{4t} \right) - E_i \left(\frac{-ar^2}{4(t-\Delta t)} \right) \right] & \text{dla } t \geq \Delta t \\ p(r, t) = \frac{-Q}{4\pi T} E_i \left(\frac{-ar^2}{4t} \right) & \text{dla } 0 \leq t < \Delta t \end{cases} \quad [9]$$

Równanie [9] opisuje puls pojedynczy. Przykładowa krzywa tego pulsu przedstawiona jest w dalszym ciągu na fig. 1. Przy $r = \text{const}$ funkcja [9] dąży do zera dla $t \rightarrow \infty$, natomiast w okresie początkowym jest rosnąca. Z uwagi na swą ciągłość $p(t)$ osiąga maksimum w chwili $t = t_1$ równe $p(t_1) = p_1$.

Maksimum to osiągnięte zostanie w samej studni w chwili przerwania tłoczenia wody $t = \Delta t$, zaś impuls ciśnienia dotrze do wszystkich innych punktów ciśnieniowego obszaru filtracyjnego z pewnym opóźnieniem t_L :

$$t_L = t_1 - \Delta t$$

Wartości t_L i p_1 znajdziemy z warunku koniecznego na maksimum, tj. przyrównując pierwszą pochodną czasową funkcji [9] do zera:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{Q}{4\pi T} \left[\frac{1}{t_1} e^{-\frac{ar^2}{4t_1}} - \frac{1}{t_1 - \Delta t} e^{-\frac{ar^2}{4(t_1 - \Delta t)}} \right] = 0 \quad [10]$$

Z warunku tego otrzymujemy:

$$\ln \left(1 + \frac{\Delta t}{t_L} \right) = \frac{ar^2 \Delta t}{4t_L(t_L + \Delta t)} \quad [11]$$

Wprowadzając dla uproszczenia czas bezwymiarowy:

$$t_{DL} = \frac{t_L}{\Delta t}$$

wyrazimy a i T za pomocą t_{DL} oraz p_1 .

Współczynnik a wyliczymy wprost z [11]:

$$a = \frac{\mu}{T} = 4 \ln \left(1 + \frac{1}{t_{DL}} \right) (t_{DL} + 1) \frac{t_L \cdot \Delta t}{r^2 \cdot \Delta t} \quad [12]$$

Do wyliczenia T potrzebne są argumenty eksponent całkowych E_i , z równania [9]. Wyliczymy je z [11]:

$$\begin{aligned} \frac{ar^2}{4t_L} &= \ln \left(1 + \frac{1}{t_{DL}} \right) (t_{DL} + 1) \\ \frac{ar^2}{4(t_L + \Delta t)} &= \ln \left(1 + \frac{1}{t_{DL}} \right) t_{DL} \end{aligned} \quad [13]$$

Po wstawieniu ich do [9] otrzymamy:

$$\begin{aligned} p(r, t_1) = p_1 = \frac{Q}{4\pi T} \left[-E_i \left(-t_{DL} \ln \left(1 + \frac{1}{t_{DL}} \right) \right) + \right. \\ \left. + E_i \left(-(t_{DL} + 1) \ln \left(1 + \frac{1}{t_{DL}} \right) \right) \right] \quad [14] \end{aligned}$$

Stąd można już wyliczyć T :

$$T = \frac{Q}{p_1} \frac{1}{4\pi} \left\{ -E_i \left[-t_{DL} \ln \left(1 + \frac{1}{t_{DL}} \right) \right] + E_i \left[-(t_{DL} + 1) \ln \left(1 + \frac{1}{t_{DL}} \right) \right] \right\} \quad [15]$$

Znając a i T można obliczyć μ :

$$\mu = \frac{T\Delta t}{r^2} 4t_{DL}(t_{DL}+1) \ln \left(1 + \frac{1}{t_{DL}} \right) \quad [16]$$

Wzory [15] i [16] można zapisać w postaci:

$$T = \frac{Q}{p_1} f(t_{DL}) \quad [15]$$

$$\mu = \frac{T\Delta t}{r^2} g(t_{DL}) \quad [16']$$

gdzie:

$$f(t_{DL}) = \frac{1}{4\pi} \left\{ -E_i \left[-t_{DL} \ln \left(1 + \frac{1}{t_{DL}} \right) \right] + E_i \left[-(t_{DL}+1) \ln \left(1 + \frac{1}{t_{DL}} \right) \right] \right\}$$

$$g(t_{DL}) = 4t_{DL}(t_{DL}+1) \ln \left(1 + \frac{1}{t_{DL}} \right)$$

Dla ułatwienia procedury obliczeniowej wartości funkcji $f(x)$ i $g(x)$ podano w tabelach 1 i 2.

Z teoretycznego punktu widzenia możliwe jest oszacowanie parametrów warstwy w sąsiedztwie danej pary otworów poprzez zainicjowanie pojedynczego pulsu w otworze pulsacyjnym oraz określenie czasu opóźnienia i amplitudy odbiorczej ciśnienia w otworze odbiorczym, a następnie wstawienie tych wartości do wzorów [15] i [16]. Rozważania teoretyczne nie sugerują bowiem konieczności inicjowania dalszych pulsów.

Niemniej jednak ograniczenie badań do jednego pulsu może prowadzić w pewnych sytuacjach do uzyskiwania wyników obarczonych błędem. Wpływać na to może szereg czynników wywołujących w ciśnieniowej warstwie wodonośnej okresowe lub przypadkowe zmiany ciśnienia. Zjawiska te pojawiać się mogą w związku z eksploatacją horyzontu wodnego, zatłaczaniem wód przy otworowej eksploatacji siarki, wstrząsów dynamicznych na powierzchni terenu oraz gwałtownych zmian warunków atmosferycznych.

Zmiany ciśnień wywołane czynnikami naturalnymi, jak i sztucznymi interferować mogą ze zmianami związanymi z procedurą pomiarową. Mogą więc być przyczyną deformacji ciśnień w otworze odbiorczym.

W przypadku ograniczenia badań do interpretacji pomiarowej pojedynczego pulsu brak jest możliwości wyróżnienia zmian ciśnienia wywołanego pulsem od zmian nie mających związku z pomiarem.

Rozszerzenie badań na kilka pulsów eliminuje lub bardzo znacznie ogranicza wpływ zewnętrznych trendów lub fluktuacji ciśnienia w badanej warstwie wodonośnej, a także znacznie zmniejsza błędy pochodzące od niedokładnego pomiaru.

PULS WIELOKROTNY. METODA ANALIZY DANYCH

Teoretycznie impuls n -krotny można zastąpić przez superpozycję n impulsów inicjujących i taką samą ilość impulsów kończących tłoczenie wody w otworze tłocznym.

Impulsy te wyrazić można wzorem będącym uogólnieniem wzoru [7]:

$$p_k(r, t) = \pm \frac{Q}{4\pi T} E_i \left(\frac{-ar^2}{4(t-t_k)} \right), \quad t > t_k \quad [17]$$

gdzie:

t_k — czas inicjowania lub wyłączenie tłoczenia wody w otworze tłocznym.

Znak $+$ wystąpi we wzorze [17] dla impulsu kończącego, zaś znak $-$ dla impulsu inicjującego tłoczenie.

Równanie impulsu wielokrotnego będzie miało postać:

$$p(r, t) = \sum_{k=1}^{2n} p_k(r, t) \quad [18]$$

Dla uproszczenia pomiarów, jak i ich interpretacji zakłada się, że wszystkie okresy tłoczenia oraz przerwy pomiędzy nimi są sobie równe, czyli:

$$t_{k+1} - t_k = \Delta t = \text{const}$$

Dla uproszczenia analizy pulsu wielokrotnego wprowadzono pojęcie czasu zredukowanego t_R i ciśnienia zredukowanego p_R .

Wielkości te określono w następujący sposób:

$$t_R = \frac{4}{ar^2} t, \quad p_R = \frac{4\pi T}{Q} p \quad [19]$$

Wstawiając te wartości do równania [18] otrzymamy:

$$p(t_R) = \begin{cases} -E_i \left(\frac{-1}{t_R} \right) & \text{dla } t_R \leq \Delta t_R \\ -E_i \left(\frac{-1}{t_R} \right) + E_i \left(\frac{-1}{t_R - \Delta t_R} \right) & \text{dla } t_R \in [\Delta t_R, 2\Delta t_R] \\ -E_i \left(\frac{-1}{t_R} \right) + E_i \left(\frac{-1}{t_R - \Delta t_R} \right) - E_i \left(\frac{-1}{t_R - 2\Delta t_R} \right) & \text{dla } t_R \in [2\Delta t_R, 3\Delta t_R] \\ \dots & \dots \\ -E_i \left(\frac{-1}{t_R} \right) + \dots + E_i \left(\frac{-1}{t_R - (2n-1)\Delta t_R} \right) & \text{dla } t_R \in [(2n-1)\Delta t_R, 2n\Delta t_R] \end{cases} \quad [20]$$

Należy podkreślić, że w równaniu [20] nie występują poszukiwane parametry naturalne warstwy wodonośnej T i μ ani parametry charakteryzujące pomiar Q i r . W związku z tym wzór [20] jest uniwersalny i zależy tylko od okresu tłoczenia.

$$\text{Wartości funkcji } f(x) = \frac{1}{4\pi} \left\{ E_1 \left[-x \ln \left(1 + \frac{1}{x} \right) \right] - E_1 \left[-(x+1) \ln \left(1 + \frac{1}{x} \right) \right] \right\}$$

Tabela 1

x	x — drugie miejsce po przecinku									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	—	0,20246	0,16227	0,14044	0,12564	0,11475	0,10620	0,09921	0,09338	0,08840
0,1	0,08411	0,08025	0,07685	0,07381	0,07016	0,06857	0,06626	0,06417	0,06221	0,06041
0,2	0,05873	0,05715	0,05567	0,05429	0,05299	0,05176	0,05060	0,04947	0,04843	0,04744
0,3	0,04648	0,04557	0,04471	0,04389	0,04310	0,04233	0,04161	0,04091	0,04022	0,03957
0,4	0,03874	0,03834	0,03775	0,03719	0,03664	0,03613	0,03561	0,03512	0,03462	0,03421
0,5	0,03372	0,03328	0,03285	0,03243	0,03203	0,03164	0,03131	0,03089	0,03061	0,03025
0,6	0,02990	0,02956	0,02924	0,02893	0,02860	0,02831	0,02800	0,02771	0,02741	0,02714
0,7	0,02687	0,02660	0,02634	0,02609	0,02584	0,02559	0,02535	0,02511	0,02488	0,02465
0,8	0,02443	0,02422	0,02400	0,02379	0,02358	0,02337	0,02314	0,02294	0,02274	0,02256
0,9	0,02239	0,02220	0,02203	0,02184	0,02167	0,02150	0,02133	0,02117	0,02102	0,02085

$$f(1,00) = 0,02070$$

$$\text{Wartość funkcji } g(x) = 4x(x+1) \ln \left(1 + \frac{1}{x} \right)$$

Tabela 2

x	x — drugie miejsce po przecinku									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	—	0,1865	0,3208	0,4371	0,5421	0,6393	0,7306	0,8170	0,8995	0,9787
0,1	1,0551	1,1250	1,2008	1,2706	1,3389	1,4054	1,4707	1,5346	1,5975	1,6593
0,2	1,7201	1,7799	1,8391	1,8974	1,9549	2,0118	2,0679	2,1238	2,1789	2,2334
0,3	2,2874	2,4311	2,3942	2,4470	2,4996	2,5513	2,6031	2,6541	2,7051	2,7558
0,4	2,8063	2,8563	2,9061	2,9557	3,0048	3,0537	3,1028	3,1511	3,1996	3,2478
0,5	3,2958	3,3435	3,3911	3,4389	3,4854	3,5330	3,5804	3,6269	3,6733	3,7201
0,6	3,7663	3,8125	3,8589	3,9047	3,9507	3,9961	4,0419	4,0876	4,1332	4,1784
0,7	4,2240	4,2688	4,3141	4,3599	4,4036	4,4483	4,4933	4,5376	4,5823	4,6269
0,8	4,6708	4,7156	4,7599	4,8034	4,8482	4,8917	4,9357	4,9796	5,0234	5,0669
0,9	5,1108	5,1559	5,1989	5,2411	5,2855	5,3285	5,3716	5,4153	5,4587	5,5013

$$g(1,00) = 5,5448$$

Tabela 3a

Zależności zredukowanych czasów opóźnienia pierwszych trzech maksimum od zmian zredukowanego okresu tłoczenia

t_{DLR}	Δt_R wg I max	Δt_R wg II max	Δt_R wg III max
0,12	—	—	2,94
0,13	—	2,86	2,765
0,14	2,99	2,71	2,62
0,15	2,82	2,59	2,51
0,16	2,69	2,48	2,385
0,17	2,59	2,37	2,28
0,18	2,49	2,27	2,18
0,19	2,41	2,18	2,09
0,20	2,33	2,10	2,01
0,21	2,25	2,02	1,93
0,22	2,18	1,945	1,865
0,23	2,11	1,88	1,80
0,24	2,045	1,82	1,75
0,25	1,98	1,77	1,70
0,26	1,93	1,72	1,65
0,27	1,83	1,67	1,60
0,28	1,83	1,62	1,55
0,29	1,78	1,58	1,51
0,30	1,74	1,54	1,47
0,31	1,70	1,505	1,43
0,32	1,66	1,47	1,40
0,33	1,625	1,44	1,37
0,34	1,59	1,41	1,34
0,35	1,56	1,38	1,31
0,36	1,53	1,35	1,28
0,37	1,51	1,32	1,25
0,38	1,48	1,295	1,22
0,39	1,45	1,27	1,195
0,40	1,425	1,245	1,17
0,41	1,40	1,22	1,145
0,42	1,375	1,195	1,125
0,43	1,35	1,17	1,105
0,44	1,33	1,15	1,085
0,45	1,31	1,13	1,065
0,46	1,29	1,11	1,045
0,47	1,27	1,09	1,025
0,48	1,25	1,075	1,01
0,49	1,235	1,06	—
0,50	1,22	1,045	—
0,51	1,20	1,03	—
0,52	1,185	1,015	—
0,53	1,17	1,005	—
0,54	1,15	—	—
0,55	1,135	—	—
0,56	1,12	—	—
0,57	1,105	—	—
0,58	1,09	—	—
0,59	1,08	—	—
0,60	1,07	—	—
0,61	1,055	—	—
0,62	1,045	—	—
0,63	1,03	—	—

Tabela 3b

Zależności zredukowanych czasów opóźnienia pierwszych trzech minimum od zmian zredukowanego okresu tłoczenia

t_{DLR}	Δt_R wg I min	Δt_R wg II min	Δt_R wg III min
0,09	2,93	—	—
0,10	2,70	2,91	3,00
0,11	2,47	2,68	2,77
0,12	2,28	2,50	2,58
0,13	2,12	2,32	2,41
0,14	1,93	2,18	2,27
0,15	1,85	2,05	2,13
0,16	1,73	1,93	2,01
0,17	1,62	1,82	1,91
0,18	1,52	1,72	1,81
0,19	1,43	1,63	1,72
0,20	1,34	1,54	1,63
0,21	1,26	1,46	1,55
0,22	1,18	1,40	1,48
0,23	1,11	1,34	1,42
0,24	1,05	1,28	1,36
0,25	—	1,22	1,31
0,26	—	1,17	1,26
0,27	—	1,12	1,21
0,28	—	1,07	1,16
0,29	—	1,02	1,11
0,30	—	—	1,07
0,31	—	—	1,03

Problem znalezienia szukanych wartości przewodności T , jak i odsączalności μ sprowadza się do wyznaczenia parametrów transformacji równania [18] w równanie [20], czyli określenia parametrów występujących we wzorach [19].

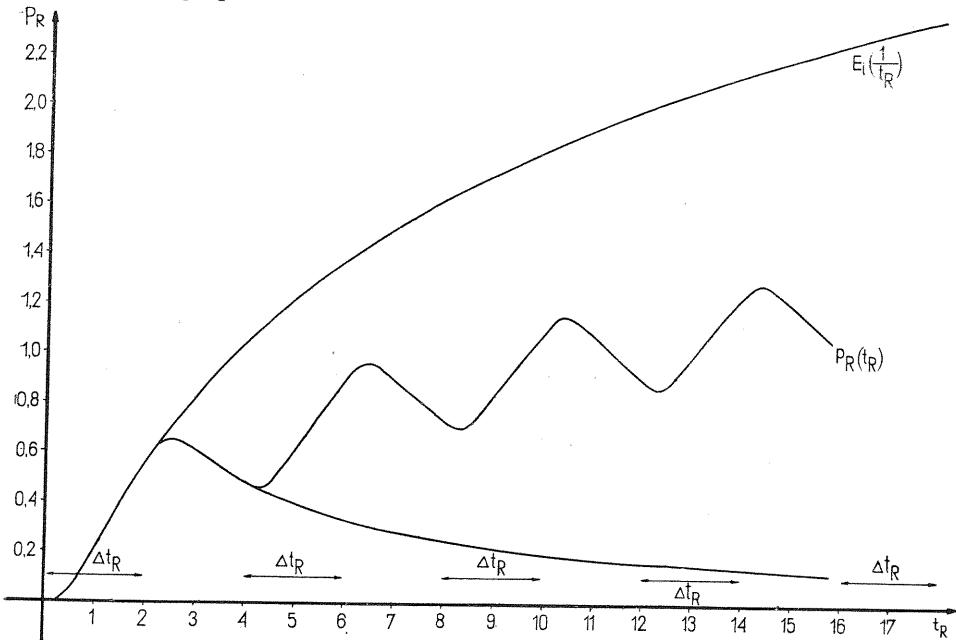


Fig. 1. Wykres uniwersalnej funkcji
Graph of a universal function

$$P_R(t_R) = \sum_{k=1}^{2n} (-1)^k E_i \left(\frac{-1}{t_R - (k-1) \Delta t_R} \right) \cdot \theta(t_R - (k-1) \Delta t_R) \quad \text{dla} \quad \Delta t_R = 2$$

oraz funkcji
and a function $E_i \left(\frac{1}{t_R} \right)$.

Strzałkami oznaczono odcinki czasu, w których czynny jest otwór tłoczony
Arrows determine time intervals at which the pressure bore hole is in operation

Funkcję [20] można dokładnie przeanalizować. Jako przykład pokazano na fig. 1 przebieg funkcji [20] dla $\Delta t_R = 2$. Wykres pochodnej tej funkcji przedstawiono na fig. 2.

Funkcja [20] posiada szereg ekstremów odpowiadających momentom inicjowania i zakańczania okresów tłoczenia wody w otworze pulsacyjnym. Każde z ekstremów ciśnień odbiorczych jest osiągnięte z pewnym opóźnieniem t_{LR} względem impulsu wzbudzającego. Czasy opóźnienia kolejnych maksimów są coraz krótsze, a czasy opóźnienia minimum ulegają wydłużeniu. Wywołane jest to wpływem poprzednich impulsów.

Korzystając z uniwersalności krzywej [20] można dokładnie wyliczyć czasy, w których są osiągnięte ekstrema. Wygodniej jest jednak posługi-

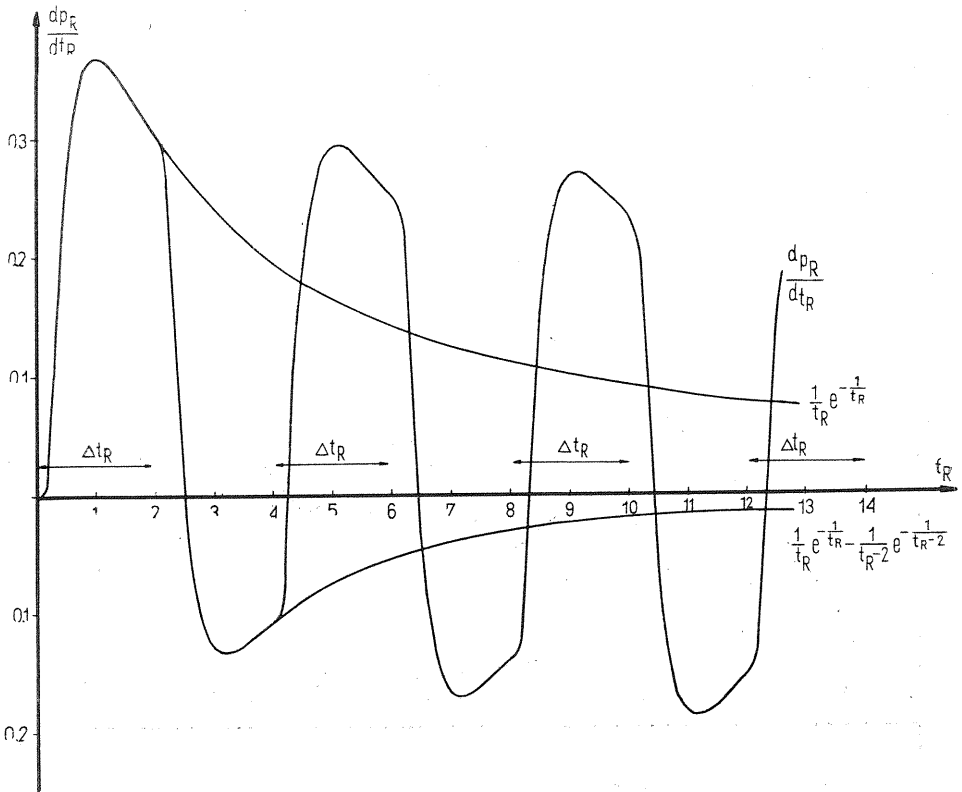


Fig. 2. Wykres pochodnej funkcji uniwersalnej

$$p_R(t_R)$$

Graph of derivative of universal function

wać się czasem bezwymiarowym t_{DL} , zdefiniowanym identycznie jak dla pulsu pojedynczego:

$$t_{DL} = \frac{t_L}{\Delta t}$$

Czas bezwymiarowy t_{DL} jest niezmiennikiem przekształcenia [19], to znaczy:

$$t_{DL} = \frac{t_L}{\Delta t} = \frac{t_L \frac{4}{ar^2}}{\Delta t \frac{4}{ar^2}} = \frac{t_{LR}}{\Delta t_R} \quad [21]$$

Z uwagi na uniwersalność czasów t_{DL} ujęto je tabelarycznie w zależności od Δt_R . Zależności te podano w tabelach 3a, 3b i na wykresach przedstawionych na fig. 3 i 4.

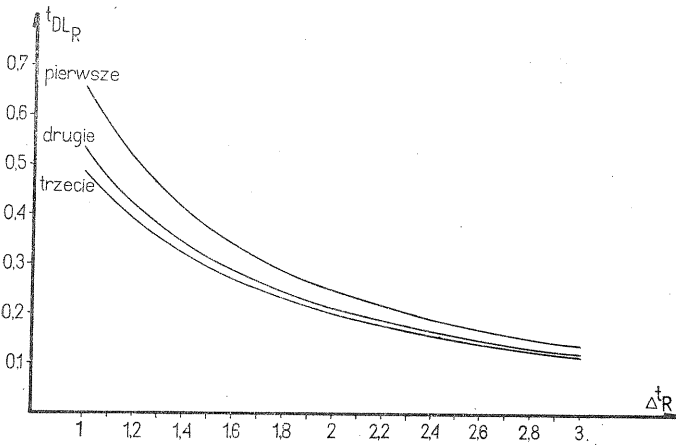


Fig. 3. Wykres zmian czasu opóźnienia maksimów w zależności od okresu tłoczenia
Graph of variations of delay time of maxima depending upon the pressure time

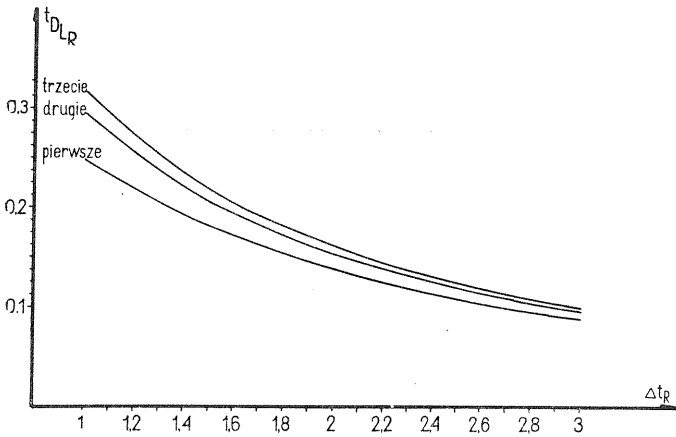


Fig. 4. Wykres zmian czasu opóźnienia maksimów w zależności od okresu tłoczenia
Graph of variations of delay time of minima depending upon the pressure time

Operując znanymi z pomiarów wartościami t_{DL} można posługując się tabelami 3a i 3b wyznaczyć wartości Δt_R .

Ze znanego czasu tłoczenia Δt oraz z wyliczonej wartości Δt_R można wyznaczyć pierwszy parametr transformacji [19], a stąd wartość a :

$$a = \frac{4}{r^2} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta t_R} \quad [22]$$

Drugi parametr transformacji [19] można określić przeprowadzając porównanie (dla tego samego czasu) ciśnienia pomierzonego w otworze odbiorczym p z ciśnieniem zredukowanym p_R . Ciśnienie zredukowane p_R znane jest z wzoru [20]. Porównania obu ciśnień najwygodniej można dokonać w ich ekstremach.

Na wykresie przedstawionym na fig. 5 podano zależności ekstremów ciśnień zredukowanych p_R od wartości czasów zredukowanych Δt_R .

Znając wartości Δt_R z tabeli 3a i 3b, można z wykresu (fig. 5) odczytać odpowiadające im amplitudy \bar{p}_R dla kilku pierwszych ekstremów. Po-

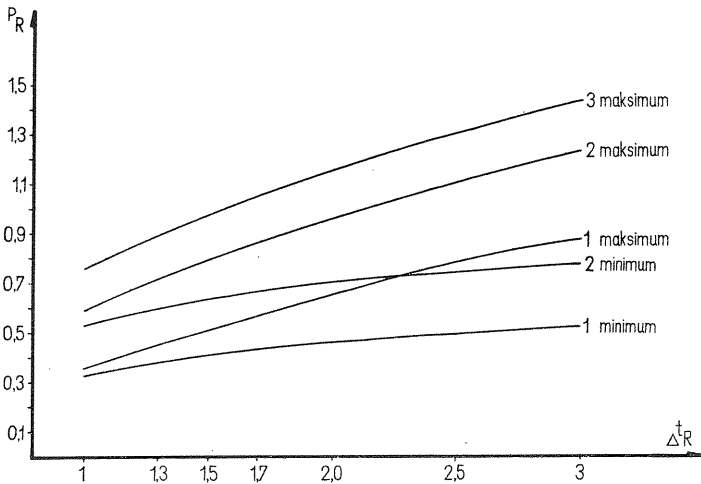


Fig. 5. Wykres zmian wartości amplitud ciśnienia w punktach ekstremalnych w zależności od długości okresu tłoczenia

Graph of variations of pressure amplitude values at extreme points depending upon the duration of pressure time

równanie amplitudy \bar{p}_R ekstremum z amplitudą \bar{p} tego samego ekstremum pozwala znaleźć drugi parametr transformacji [19], a stąd wartość przewodności T :

$$T = \frac{Q}{2\pi} \cdot \frac{\bar{p}_R}{\bar{p}} \quad [23]$$

Dla zwiększenia dokładności celowe jest przeprowadzenie niezależnych obliczeń wartości a i T dla różnych ekstremów i następnie uśrednienie wyników.

Otrzymane wyniki mogą być niedokładne z uwagi na zakłócenia wywołane zmianami ciśnienia w badanej warstwie, a wywołanymi przez zewnętrzne podczas trwania pomiarów. Całkowite zlikwidowanie tych wpływów jest niemożliwe, można jednak wyeliminować dominującą składową liniową tych zmian, wpływającą w zasadniczy sposób na powstanie błędów. Nakładanie się składowej liniowej na funkcję [18] działa w odwrotny sposób na czasy opóźnienia minimów niż na czasy opóź-

nienia maksimów. I tak np. liniowy trend rosnący powoduje skracanie czasów t_L dla maksimów i wydłużanie tych czasów dla minimów. W związku z tym Δt_R wyznaczone z maksimów będą za duże, a określone z minimów za małe. Średnia Δt_R wyznaczona z tej samej liczby maksimów i minimów będzie już wolna od tego typu błędów.

Dużo większy wpływ ma trend liniowy na wielkość amplitudy \bar{p} . Aby ten wpływ wyeliminować, należy porównywać nie całe amplitudy, a jedynie ich odcinki leżące nad lub pod prostą łączącą dwa ekstrema sąsiednie w stosunku do badanego. Wielkości te zostały ujęte w tabeli 4 w zależności od Δt_R , a ich wykresy podano na fig. 6.

Tabela 4

Różnice ciśnień pomiędzy ekstremum a prostą łączącą ekstrema sąsiednie dla różnych wartości okresu tłoczenia

Δt_R	I max	I min	II max	II min
1,0	0,116	0,102	0,135	0,122
1,1	0,144	0,126	0,160	0,146
1,2	0,172	0,149	0,184	0,169
1,3	0,199	0,172	0,208	0,192
1,4	0,226	0,195	0,232	0,215
1,5	0,253	0,218	0,256	0,238
1,6	0,281	0,241	0,280	0,261
1,7	0,309	0,264	0,303	0,283
1,8	0,336	0,287	0,326	0,305
1,9	0,362	0,309	0,349	0,327
2,0	0,385	0,331	0,371	0,349
2,1	0,410	0,353	0,393	0,370
2,2	0,434	0,374	0,414	0,391
2,3	0,457	0,394	0,435	0,412
2,4	0,480	0,414	0,456	0,433
2,5	0,502	0,434	0,477	0,454
2,6	0,523	0,453	0,498	0,475
2,7	0,543	0,472	0,519	0,496
2,8	0,562	0,490	0,539	0,517
2,9	0,580	0,508	0,559	0,538
3,0	0,597	0,526	0,579	0,558

Odczytując Δp z danych pomiarowych i znajdując dla danego Δt_R odpowiednie Δp_R w tabeli 4, oblicza się T :

$$T = \frac{Q}{4\pi} \frac{\Delta \bar{p}_R}{\Delta \bar{p}} \quad [24]$$

Znając a i T można wyliczyć z równania [2] współczynnik wodoodszczalności μ :

$$\mu = a \cdot T \quad [25]$$

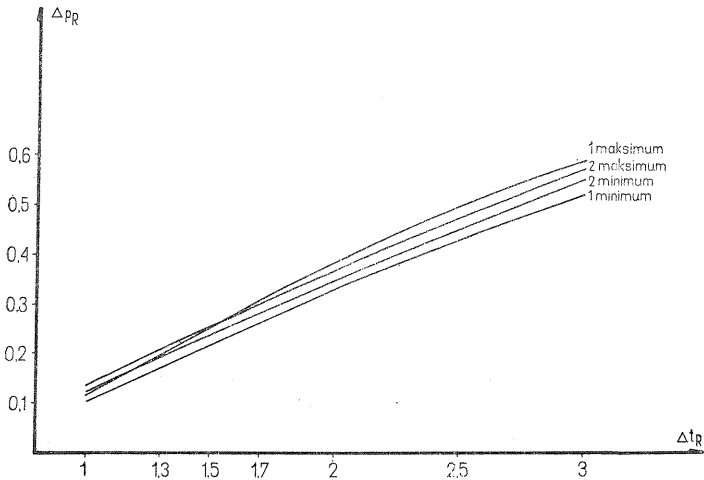


Fig. 6. Wykres zmian różnic ciśnień między ekstremum a prostą łączącą ekstrema sąsiednie dla różnych wartości okresu tłoczenia

Graph of variations of pressures between the extremum and the straight line that connects the neighbouring extrema for various values of pressure time

PRZYKŁAD LICZBOWY INTERPRETACJI WYNIKÓW BADAŃ PULSACYJNYCH

Do badań wytypowano dwa otwory dogłębione w ciśnieniowej warstwie wodonośnej, jeden traktując jako pulsacyjny, a drugi jako odbiorczy.

Wzajemna odległość otworów r wynosi 400 m, średnia miąższość warstwy $b = 10$ m.

Cykl badawczy ograniczono do trzech okresów tłoczenia wody do otworu tłocznego. Stały wydatek poszczególnych pulsów Q wynosił 100 m^3 wody na godzinę, co odpowiada $1,67 \text{ m}^3/\text{min}$. Okresy tłoczenia Δt odpowiadały okresom przerw międzYTłoczeniowych i wynosiły 30 minut.

Na fig. 7 przedstawiono wykres zmian ciśnienia zarejestrowany w otworze odbiorczym. Na tym samym wykresie oznaczono również zmiany wydajności w otworze pulsacyjnym. Oba wykresy sporządzono na tej samej skali czasowej.

Na wykresie zmian ciśnienia (w otworze odbiorczym) wykreśla się linię prostą łączącą początek układu z pierwszym minimum ciśnienia, a następnie linię łączącą pierwsze minimum z drugim. W podobny sposób przeprowadza się proste łączące pierwsze maksimum z drugim i drugie z trzecim. Następnie wyznacza się wielkości Δp dla poszczególnych maksimumów i minimumów. Wartości te odczytuje się z wykresu poprzez poprowadzenie linii pionowych z punktów ekstremalnych krzywej zmian ciśnienia do przecięcia się z liniami prostymi łączącymi poszczególne punkty ekstremalne krzywej.

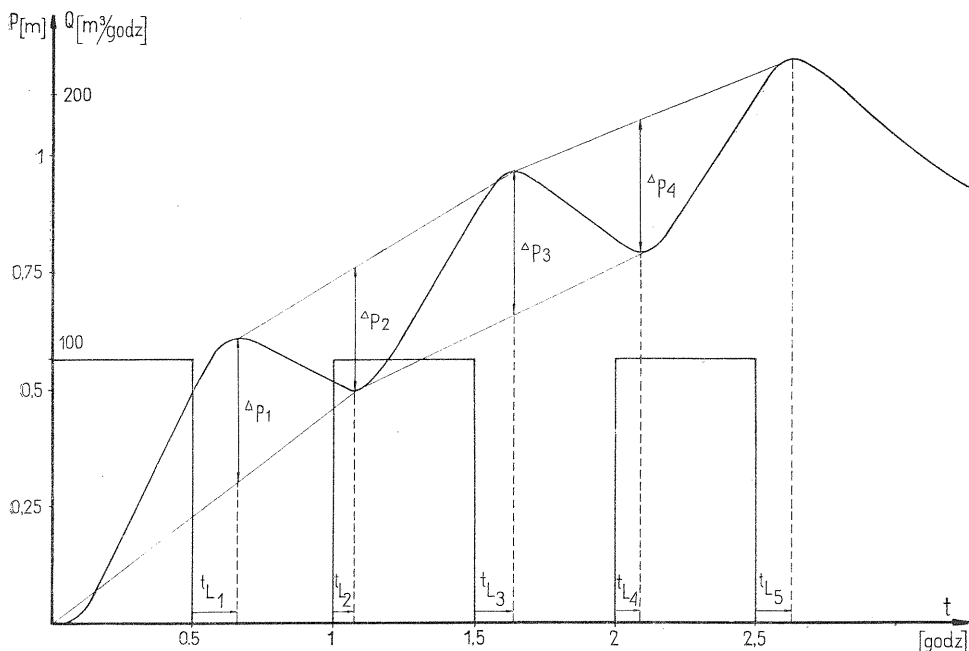


Fig. 7. Przykład wykresu zmian ciśnienia w otworze odbiorczym dla $\Delta t = 30$ min, $r = 400$ m, $Q = 100$ m³/godz

Example of a graph of variations of pressure in a receiving bore hole for $\Delta t = 30$ min, $r = 400$ m, $Q = 100$ m³/h.

Odczytując z wykresu poszczególne wartości na Δp otrzymano:

$$\Delta \bar{p}_1 = 0,31 \text{ m}$$

$$\Delta \bar{p}_2 = 0,265 \text{ m}$$

$$\Delta \bar{p}_3 = 0,305 \text{ m}$$

$$\Delta \bar{p}_4 = 0,285 \text{ m}$$

Aparatura pomiarowa rejestrująca zmiany ciśnienia w otworze odbiorczym pracowała z dokładnością 0,5 cm słupa wody.

Przedłużając linie Δp aż do przecięcia się z osią odciętych, wyznaczono czasy opóźnienia poszczególnych pulsów t_L .

Dla maksimum ciśnienia czas opóźnienia t_L określa się przez różnicę między czasem rejestracji maksimum, a czasem zakończenia okresu tłoczenia. Dla minimum czas opóźnienia t_L wyznacza się również jako różnicę między czasem rejestracji minimum ciśnienia a czasem zainicjowania następnego pulsu.

W naszym przykładzie wyliczone z wykresu czasy opóźnienia t_L wynoszą:

$$\text{z 1-go maksimum} \quad t_{L1} = 9,5 \text{ min}$$

$$\text{z 1-go minimum} \quad t_{L2} = 4,5 \text{ min}$$

$$\text{z 2-go maksimum} \quad t_{L3} = 8,25 \text{ min}$$

$$\text{z 2-go minimum} \quad t_{L4} = 5,25 \text{ min}$$

$$\text{z 3-go maksimum} \quad t_{L4} = 7,75 \text{ min}$$

Posługując się wzorem [21]:

$$t_{DL} = \frac{t_L}{\Delta t}$$

wyznaczamy następujące czasy bezwymiarowe t_{DL} :

$$\begin{aligned} t_{DL1} &= 0,317 \\ t_{DL2} &= 0,15 \\ t_{DL3} &= 0,275 \\ t_{DL4} &= 0,175 \\ t_{DL5} &= 0,258 \end{aligned}$$

Posługując się tabelą 3a i 3b wyznaczamy zredukowane czasy tłoczenia Δt_R , odpowiadające poszczególnym czasom bezwymiarowym t_{DL} . W naszym konkretnym przypadku otrzymujemy:

$$\begin{aligned} \Delta t_{R1} &= 1,68 \\ \Delta t_{R2} &= 1,85 \\ \Delta t_{R3} &= 1,64 \\ \Delta t_{R4} &= 1,77 \\ \Delta t_{R5} &= 1,66 \end{aligned}$$

Widoczne jest, że wielkości Δt_{R1} , Δt_{R3} , Δt_{R5} odczytane z maksimum są dużo mniejsze niż wielkości Δt_{R2} , Δt_{R4} odczytane z minimum. Świadczy to o istnieniu w badanej warstwie wodonośnej trendu rosnącego ciśnienia. Zgodnie z procedurą opisaną w poprzednim ustępie eliminujemy błąd wywołany tym trendem, biorąc średnią z dwóch minimum i dwóch maksimum:

$$\Delta t_{R\text{sr}} = \frac{\Delta t_{R2} + \Delta t_{R3} + \Delta t_{R4} + \Delta t_{R5}}{4} = \frac{1,85 + 1,64 + 1,77 + 1,66}{4} = 1,73$$

Znając wartość $\Delta t_R = 1,73$ wyznaczamy z tabeli 4 odpowiadające jej wartości $\Delta \bar{p}_R$:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{p}_{R1} &= 0,317 && \text{dla 1-go maksimum} \\ \Delta \bar{p}_{R2} &= 0,271 && \text{dla 1-go minimum} \\ \Delta \bar{p}_{R3} &= 0,310 && \text{dla 2-go maksimum} \\ \Delta \bar{p}_{R4} &= 0,290 && \text{dla 2-go minimum} \end{aligned}$$

Znając wartości $\Delta \bar{p}_{Ri}$ i $\Delta \bar{p}_i$ wyliczamy ze wzoru [24]:

$$T_i = \frac{Q}{4\pi} \frac{\Delta \bar{p}_{Ri}}{\Delta \bar{p}_i} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{godz}} \right]$$

Wstawiając wartości liczbowe do wzoru [24] otrzymamy:

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{100}{12,56} \cdot \frac{0,317}{0,31} = 8,143 \text{ m}^2/\text{godz} \\ T_2 &= \frac{100}{12,56} \cdot \frac{0,271}{0,265} = 8,135 \text{ m}^2/\text{godz} \end{aligned}$$

$$T_3 = \frac{100}{12,56} \cdot \frac{0,310}{0,305} = 8,087 \text{ m}^2/\text{godz}$$

$$T_4 = \frac{100}{12,56} \cdot \frac{0,290}{0,285} = 8,103 \text{ m}^2/\text{godz}$$

Średnia z $T_1 - T_4$ wynosi: $T_{sr} = 8,117 \text{ m}^2/\text{godz} = 194,8 \text{ m}^2/\text{doba} = 0,1353 \text{ m}^2/\text{min}$.

Znając z wierceń średnią miąższość ciśnieniowego horyzontu wodnego równą między badanymi otworami:

$$b = 10 \text{ m}$$

wyliczamy współczynnik filtracji warstwy wodonośnej:

$$k = \frac{T}{b} = \frac{194,8}{10} \cong 19,5 \text{ m/doba}$$

Znając wartość $\Delta t_R = 1,73$ wyliczamy wartość współczynnika a posługując się wzorem [22]:

$$a = \frac{4}{r^2} \frac{\Delta t}{\Delta t_R}$$

$$a = \frac{4}{400^2} \cdot \frac{30}{1,73} \left[\frac{\text{min}}{\text{m}^2} \right] = 4,335 \cdot 10^{-4} \left[\frac{\text{min}}{\text{m}^2} \right]$$

Współczynnik odsączalności wyliczymy ze wzoru podstawowego:

$$\mu = aT$$

czyli wstawiając wyliczone wartości na a i T otrzymamy:

$$\mu = aT = 4,335 \cdot 10^{-4} \cdot 0,1353 = 5,865 \cdot 10^{-5}$$

DOBÓR WIELKOŚCI Q , r , Δt

Dla otrzymania możliwie największej dokładności i czytelności odczytu ciśnień odbiorczych ilość tłoczony wody w jednostce czasu, czas tłoczenia oraz odległość otworu pulsacyjnego i odbiorczego nie mogą być dobrane przypadkowo.

Dobór parametrów pomiarowych winien być zbliżony do optymalnego dla danych warunków hydraulicznych badanego horyzontu wodonośnego.

Jak wynika z wykresów przedstawionych na fig. 3 i 4, dla dużych wartości Δt_R krzywe czasów opóźnienia posiadają coraz to mniejsze nachylenie względem osi Δt_R . Powoduje to narastanie błędu przy odczycie wielkości Δt_R dla zmniejszających się wartości t_{DL} .

Z drugiej strony — z wykresu demonstrowanego na fig. 5 wynika, że dla niskich wartości liczbowych Δt_R różnice między i -tym maksimum oraz i -tym minimum stają się bardzo małe. Tak więc przyjęcie zbyt małych wartości liczbowych dla Δt_R utrudnia dokładne określenie czasu osiągnięcia ekstremów. Analizując wykresy przedstawione na fig. 3—5

należy stwierdzić, że najkorzystniejsze jest operowanie wartością Δt_R w granicach między 1,5 a 2,5.

Wartościom tym dla Δt_R odpowiadają na fig. 6 wartości dla Δp_R w przedziale od 0,25 do 0,5.

Ze wzoru [24] wynika, że:

$$Q = 4\pi T \frac{\Delta p}{\Delta p_R} \quad [26]$$

Założmy, że dokładność urządzenia pomiarowego ciśnień w otworze odbiorczym wynosi d (m) słupa wody. Procentowy błąd względny pomiaru Δp będzie wynosił:

$$b_w = \frac{d}{\Delta p} \cdot 100\%$$

stąd:

$$p = \frac{d}{b_w} \cdot 100\%$$

Błąd b nie powinien przekraczać 2%. Stąd przy znanym d można wyliczyć Δp minimalne, dla którego błąd odczytu będzie mniejszy od 2%:

$$\Delta p_{\min} = 50d$$

Wstawiając tę wartość do wzoru [26] można wyznaczyć Q_{\min} :

$$Q_{\min} = 4\pi T \frac{50d}{0,5} = 1256 dT \quad [27]$$

Orientacyjną wartość przewodności T określamy na podstawie znanej z wierceń miąższości warstwy wodonośnej oraz oceny przepuszczalności skał (np. przez analizę rdzeni).

Znając wyznaczoną wstępnie orientacyjną wartość przewodności T i przyjmując jej spodziewaną maksymalną wartość można określić najmniejszą możliwą wydajność tłoczenia wody do otworu pulsacyjnego.

Przekształcając wzór [22] otrzymać można:

$$\frac{\Delta t}{r^2} = \frac{a \cdot \Delta t_R}{4} \quad [28]$$

Przy przyjętym wyżej przedziale wartości liczbowych dla Δt_r , $\frac{\Delta t}{r^2}$ winno zawierać się w granicach:

$$\frac{\Delta t}{r^2} = 0,375 a \div 0,625 a$$

Znając w przybliżeniu wielkość a (a przynajmniej jej granice), można dobrać do odległości otworów badawczych odpowiedni czas tłoczenia. Należy jednak podkreślić, że odległość wzajemna pary otworów badawczych winna być tak dobrana (na tyle duża), aby czas tłoczenia Δt nie uległ zbytniemu skróceniu, gdyż może to wywołać nadmierne skrócenie czasu opóźnienia, a w konsekwencji i wzrostu błędu odczytowego.

WPŁYW CZYNNIKÓW NATURALNYCH WARSTWY WODONOŚNEJ NA CHARAKTERYSTYKĘ POMIAROWĄ

Amplituda odbiorcza ciśnienia zależna jest od odległości pomiędzy otworami pomiarowymi, przewodności, odsączalności, interwału pulsacji, przerw międzypulsacyjnych i od wydatku pulsu.

Ciężkie warunki wykrywalności ciśnień odbiorczych można poprawić poprzez zwiększenie wydatków pulsów. Realizować to można na drodze naprzemianległego pompowania i tłoczenia wody w otworze pulsacyjnym.

Zależność przewodności, odsączalności, odległości międzyotworowej i interwałów pulsacji układają się w następujący sposób w odniesieniu do wielkości amplitud ciśnień odbiorczych i czasu ich opóźnienia:

Dla tendencji wzrostu przewodności czas opóźnienia skraca się, amplitudy odbiorcze początkowo wzrastają, a następnie, po osiągnięciu maksimum, podlegają stopniowemu obniżaniu.

Tak więc rezerwuary wodonośne o niskiej przewodności są trudne do badań, a to dlatego, że amplitudy ciśnień odbiorczych stają się małe, zaś czas opóźnienia impulsów odbiorczych, jak i cały czas poświęcony na cykl badawczy ulega wydłużeniu.

Dalszymi istotnymi czynnikami wpływającymi na wielkości i opóźnienie ciśnień odbiorczych są zarówno wzrost odsączalności, jak i odległość wzajemna badanej pary otworów. Wzrost obu tych czynników wywołuje odpowiednie narastanie czasu opóźnienia i obniżenie amplitudy ciśnień odbiorczych.

Ostatnim czynnikiem wywierającym wpływ na charakter ciśnień odbiorczych jest odpowiedni dobór interwałów pulsacji. Wydłużenie interwałów wpływa na wzrost amplitud ciśnień odbiorczych.

Wyliczone z badań parametry hydrogeologiczne odzwierciedlają wartości średnie dla strefy horyzontu wodonośnego pomiędzy parą otworów badawczych. Istotna jest tu tzw. „zasada odwracalności”. Wyraża się ona jednoznacznością wyników pomiarów realizowanych w dwu kierunkach, tzn. przy zmianie kierunku badań i wykorzystaniu otworu pulsacyjnego jako odbiorczy i odbiorczego jako pulsacyjny.

Zasada odwracalności, jak i możliwość określania średnich wartości parametrów hydrogeologicznych w strefie międzyotworowej umożliwiają znaczną redukcję ilości pomiarów.

Istotną konsekwencją istnienia zasady odwracalności jest możliwość równoczesnego wykorzystania wszystkich otworów okalających otwór pulsacyjny jako otwory odbiorcze. W tej sytuacji wystarczy w każdym z tych otworów przeprowadzić pomiary zmian ciśnienia w czasie i pomiary czasów opóźnienia impulsów odbiorczych. Tą drogą uzyskuje się równocześnie uśrednione parametry hydrogeologiczne na wszystkich liniach łączących otwór pulsacyjny z poszczególnymi otworami odbiorczymi.

W przypadku realizacji badań pulsacyjnych siatki otworów w układzie trójkątnym jeden cykl pomiarowy wykonany w otworze pulsacyjnym może dostarczyć do sześciu zestawów uśrednionych parametrów hydrogeologicznych, w układzie prostokątnym do ośmiu zestawów.

Wyniki badań pulsacyjnych najwygodniej jest przedstawić na mapach w postaci izolinii współczynnika filtracji k lub przewodności T , współczynnika odsączalności μ oraz wartości współczynnika piezoprzewodnictwa lub jego odwrotności a . Punkty wyjściowe dla sporządzenia map izolinii poszczególnych parametrów są lokalizowane w środku — pomiędzy każdą z par otworów w układzie: otwór pulsacyjny — otwór odbiorczy.

ZAKRES STOSOWALNOŚCI METODY PULSACYJNEJ

Badania pulsacyjne można z powodzeniem stosować w odniesieniu do przeważającej ilości ciśnieniowych warstw wodonośnych, i to zarówno dla utworów wodonośnych w anizotropowych pod względem filtracyjnym środowiskach porowatych, jak i w utworach szczelinowatych lub o charakterze mieszanym porowato-szczelinowatym.

W przypadku badania skomplikowanych zbiorników wielostrefowych, szukania powiązań hydraulicznych poprzez warstwy półprzepuszczalne oraz w przypadku prac rozpoznawczych w utworach wysoce szczelinowatych, jak i skawernowanych przyjęcie modelu matematycznego filtracji może budzić wątpliwości. W przypadkach tych badania pulsacyjne mogą znaleźć szerokie zastosowanie w wyznaczaniu „połączeń hydraulicznych” pomiędzy poszczególnymi strefami lub otworami, umożliwiając lokalizację drożnych stref uskokowych, barier lub uprzywilejowanych, skomplikowanych dróg przepływów podziemnych.

Pewne szczególne warunki, jak bardzo niska przepuszczalność, wysoka ściśliwość szkieletu gruntowego oraz duży rozstaw otworów mogą wyeliminować badania pulsacyjne. Niemniej jednak brak rejestracji ciśnień w otworach odbiorczych może również stanowić cenną informację hydrogeologiczną, gdyż pewne graniczne wartości przewodności i odsączalności są nieodzownym warunkiem dla wygaszania ciśnień odbiorczych poniżej poziomu wykrywalności.

W tym miejscu trzeba podkreślić szczególne znaczenie, jakie należy przypisać badaniom pulsacyjnym przy otworowej eksploatacji siarki metodą podziemnego wytopu ze złoża.

Badania powyższe z powodzeniem można zastosować na etapie wstępnego hydrogeologicznego rozpoznania złoża poprzez objęcie pomiarami wszystkich otworów badawczo-złożowych i sporządzenie na podstawie otrzymanych wyników map izoliniowych podstawowych parametrów hydrogeologicznych całego badanego obszaru złoża.

Rozpoznanie to umożliwia zebranie dużo dokładniejszych danych hydrogeologicznych o złożu niż punktowe próbne pompowania wybranych otworów złożowych. W efekcie umożliwi to zebranie bardziej precyzyjnych danych wyjściowych przy projektowaniu nowych pól eksploatacyjnych, wyznaczeniu kierunków eksploatacji oraz projektowaniu skutecznego układu otworów eksploatacyjnych.

Dalsze szerokie zastosowanie metody badań pulsacyjnych może mieć zastosowanie w dokładnym rozpoznaniu hydrogeologicznym rozwierconych w siatce eksploatacyjnej obszarów złoża na przedpolu eksploatacji.

Ścisłe rozeznanie warunków hydrogeologicznych na przedpolu eksploatacji dostarcza podstawowych materiałów dla prognozowania efektów

wytapiania siarki ze złoża, a tym samym umożliwia realizację zabiegów technicznych mających na celu zagwarantowanie pożądanego rozpręśnienia się medium grzewczego w złożu (zabiegi ograniczające lub zwiększające drożność złożowej strefy wodonośnej).

Istotna z punktu widzenia eksploatacji jest możliwość dokładnego wyznaczenia badaniami pulsacyjnymi drożności stref wyeksploatowanych i tą drogą uzyskania realnych podstaw dla zabiegów technicznych, mających na celu zapobieżenie ucieczek wód technologicznych na zapleczu eksploatacji.

Podsumowując opis proponowanej nowej polowej metody badań należy stwierdzić, że prezentowana technika badań pulsacyjnych jest przydatna do przestrzennego opisu i prognozowania zmienności hydraulicznych horyzontów wodonośnych. Ponadto jest to metoda umożliwiająca zebranie uzupełniających informacji wyjściowych dla analizy jakościowej i ilościowej, opartej o nowoczesne metody analityczne i badania analogowe.

Jest to metoda tania i szybka, szczególnie przydatna przy eksploatacji otworowej złóż siarki, ropy naftowej, rozpoznawaniu zbiorników wód podziemnych w aspekcie najkorzystniejszego lokalizowania ujęć oraz w innych pracach hydrotechnicznych i odwodnieniowych.

Zakład Doświadczalny przy Przedsiębiorstwie
Specjalistycznym Górnictwa Surowców Chemicznych „HYDROKOP”
Kraków, ul. Łokietka 19
Nadesłano dnia 26 listopada 1970 r.

PIŚMIENNICTWO

- JOHNSON C. R., GREENKORN R. A., WOOD E. G. (1966) — Pulse — Testing: A New Method for Describing Reservoir Flow Properties between Wells. *Journal of Petroleum Technology*, nr 12, p. 1599—1604.
- HANTUSH M. S. (1964) — Hydraulics of Wells. *Advances in Hydroscience*, 1, p. 281—432.
- Mc KINLEY R. M., VELA S., CARLTON L. A. (1968) — A Field Application of Pulse — Testing for Detailed Reservoir Description. *Journal of Petroleum Technology*, nr 3, p. 313—321.
- ЛИ-ЮН-ШАН (1961) — Метод определения коэффициента пьезопроводности пласта по точке максимального изменения пластового давления в реагирующей скважине. *Подземная Гидродинамика*, вып. 33, стр. 249—251.
-

Богдан НЕЛЮБОВИЧ, Казимеж УРБАНЬЧИК, Анджей КУНСТМАН

**ПУЛЬСАЦИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОДОНАПОРНЫХ ГОРИЗОНТОВ**

Резюме

Пульсационный метод был разработан С. Р. Джонсоном в 1966 г. в США для определения гидравлических особенностей горизонтов краевых вод в нефтяных месторождениях. Учитывая возможность всестороннего применения нового метода для разведки гидрогеологических пластов как при эксплуатации напорных резервуаров подземных вод, так и при скважинной эксплуатации нефти и серы, авторы представили разработанный ими новый оригинальный метод анализа измерительных данных многократных пульсов совместно с указаниями для его практического использования. Для облегчения интерпретации измерительных данных авторы составили ряд номограмм и таблиц, исключающих необходимость использования сложных формул.

Bohdan NIELUBOWICZ, Kazimierz URBAŃCZYK, Andrzej KUNSTMAN

**PULSATION METHOD OF DETERMINING HYDROGEOLOGICAL PROPERTIES
OF PRESSURE HORIZONS OF GROUND WATER**

Summary

Pulsation method was worked out in 1966 by C. R. Johnson (USA), to determine hydraulic properties of edge water horizons surrounding crude-oil deposits. Having in view a possibility of comprehensive use of the new method in examining the hydrogeological strata during the exploitation of ground water pressure basins, as well as during the bore-hole exploitation of crude oil and sulphur, the present authors discuss their own new original method of analysing measurement data from multiple impulses, along with the instructions as to its use. To facilitate the interpretation of the measurement data the authors have worked out a series of nomograms and tables that eliminate the necessity of introducing any complicated formulae.