

Wpływ sond pomiarowych na badanie prędkości filtracji wód podziemnych w otworach wiertniczych i piezometrach¹

WSTĘP

Ważnym zadaniem w pracach geologiczno-inżynierskich dla budownictwa wodnego jest ustalenie parametrów określających charakter ruchu wód podziemnych. W obecnych warunkach olbrzymiego wzrostu zapotrzebowania na wodę konieczne jest racjonalne gospodarowanie jej zasobami. W związku z tym projektowanie zaopatrzenia w wodę zakładów przemysłowych i ośrodków rolniczych, a także budownictwa większych obiektów, jak kopalnie, zapory wodne, zbiorniki itp., musi opierać się o uzasadnione obliczenia hydrogeologiczne. Punktem wyjścia dla takich obliczeń są rezultaty badań polowych i laboratoryjnych, w czasie których wykonuje się zdjęcie hydrogeologiczne oraz określa podstawowe elementy ruchu wód podziemnych: kierunek i prędkość filtracji, wydatek wodny, spadki hydrauliczne itd.

Parametry filtracji określane są zazwyczaj w wyniku specjalnych prac, jak próbné pompowanie, metoda zalewania czy zczерpywania. Dla przeprowadzenia tych prac wykonuje się kilka otworów odpowiednio zlokalizowanych, często w niewielkiej od siebie odległości. Wiercenie specjalnych otworów, nie posiadających innego zastosowania, znacznie zwiększa koszty całego przedsięwzięcia. Dlatego badania tego typu ogranicza się do najbardziej koniecznych. Jeśli nawet takie prace uda się wykonać, to nie można otrzymanych wyników ekstrapolować na cały obszar będący przedmiotem badań.

W związku z tym duże znaczenie mają metody geofizyczne, a zwłaszcza te ich modyfikacje, które bezpośrednio mogą być wykorzystane do badania ruchu wód podziemnych. Stanowią one instrument pomocniczy w badaniach hydrogeologicznych. Jednak przy ich pomocy można znacznie rozszerzyć zakres informacji o warunkach geologicznych całego terenu, w jakich odbywa się ruch wód, jak również określić *in situ* w poszczególnych otworach kierunek, prędkość filtracji i prędkość przepływu wód

¹ Referat wygłoszony na Sesji Naukowej I.G. w dniu 11 lutego 1964 r.

podziemnych. Dla wyznaczenia tych parametrów coraz szerzej wykorzystuje się metody elektryczne i radioaktywne, które, zwłaszcza w ostatnich latach, szybko się rozwijają.

Dla określenia kierunku przepływu wód podziemnych stosuje się metodę naładowanego ośrodka (B. K. Matwiejew, 1958; A. A. Ogilwi, 1962, 1957; B. Paczyński, 1959; M. Borowczyk, Cz. Królikowski, 1964 i in.), która również pozwala na określenie prędkości przepływu wód podziemnych. Metoda ta z powodzeniem stosowana jest do głębokości kilkudziesięciu metrów. Również czynione są inne próby wykorzystania metod elektrycznych dla określenia kierunku wód gruntowych (A. W. Szemszurin, 1959).

Bardzo szybko rozwija się metoda izotopowa oznaczania kierunku przepływu (H. Moser i in., 1957; H. Mairhofer, 1963; M. Borowczyk, Cz. Królikowski, 1964). Dzięki możliwości stosowania jej dla dowolnych głębokości, metoda ta ma duże perspektywy rozwoju.

Ogromne znaczenie w badaniach hydrogeologicznych posiadają metody badania prędkości filtracji wód podziemnych. Przy ich pomocy bowiem można określać nie tylko prędkości, lecz również przepuszczalność gruntów, miąższości warstw wodonośnych, strefy zasilania otworów przez wody podziemne, strefy ucieczek płuczki itd. I tu również szerokie zastosowanie znajdują metody elektryczne i izotopowe. Z metod elektrycznych najczęściej stosowana jest metoda konduktometryczna (N. A. Ogilwi, 1958; B. K. Matwiejew, 1963; Cz. Królikowski, 1963).

Coraz częściej stosowana jest również, oparta na podobnej zasadzie, metoda izotopowa (H. Moser i in., 1957; A. Nir i in., 1959; E. Halevy i in., 1960; M. J. Janos, 1960; H. W. Freely i in., 1962; M. Borowczyk, 1963).

W związku z szybkim rozwojem metod elektrycznych i izotopowych pomiarów prędkości filtracji w jednym otworze, powstaje konieczność uściślenia podstawowych wzorów przez uwzględnienie wpływu czynników, które poprzednio nie były analizowane. Zagadnienia te wy wpływają z wymogów praktyki; dążność bowiem do jak najlepszej aproksymacji otrzymywanych wyników do ich wartości prawdziwych jest zrozumiała i uzasadniona.

Jednym z takich czynników zmieniających znacznie mierzone wartości prędkości filtracji jest obecność samej sondy pomiarowej w otworze. Zagadnienie to dotychczas nie było rozpatrywane. Brak było teoretycznych podstaw dla ilościowego uwzględniania charakteru i wielkości zaburzeń, jakie może powodować sonda pomiarowa. Temu problemowi, jak również z nim związanym poświęcona jest niniejsza praca.

OGÓLNA ZASADA POMIARÓW PRĘDKOŚCI FILTRACJI PRZY UŻYCIU METOD GEOFIZYCZNYCH

Dla dalszych rozważań teoretycznych konieczne jest przedstawienie ogólnych zasad pomiaru oraz założeń, na których podstawie wyprowadzone są wzory na prędkość. Wzór Darcy określający wydatek strumienia wodnego Q w jednostce czasu, w przypadku ruchu laminarnego w ośrodku porowatym, ma postać:

$$Q = I k S \quad (1)$$

gdzie I — spadek hydrauliczny,
 k — współczynnik filtracji ośrodka,
 S — przekrój poprzeczny strumienia.

Wielkość wyrażająca stosunek wydatku strumienia wodnego Q do przekroju S nazywa się prędkością filtracji v :

$$v = \frac{Q}{S} \quad (2)$$

Zasada pomiaru prędkości filtracji zarówno w metodzie konduktometrycznej, jak i izotopowej jest następująca: Do otworu zaopatrzonego w filtr, lub bez filtra w przypadku otworu niezarurowanego, na określoną głębokość warstwy wodonośnej wprowadza się wskaźnik zmieniający pewne właściwości fizyko-chemiczne wody w otworze. Wraz z płynącym strumieniem wodnym wskaźnik ten jest wynoszony z otworu do otaczającego go ośrodka i w ten sposób jego koncentracja w wodzie w otworze zmniejsza się. Spadek koncentracji wskaźnika w otworze mierzony w odpowiedni sposób jest funkcją prędkości filtracji w ośrodku.

Wzór wyrażający zależność tych wielkości wyprowadzony został przy następujących założeniach (N. A. Ogilwi, 1958; H. Moser i in., 1957).

1. Spadek koncentracji zastosowanego wskaźnika w czasie obserwacji jest proporcjonalny do prędkości filtracji w ośrodku.
2. Przepływ ma charakter stacjonarny, tzn. $Q = \text{const}$.
3. Koncentracja wskaźnika w wydzielonym słupie wody w otworze jest jednakowa, czyli odbywa się idealne mieszanie.
4. Zasięg pomiaru koncentracji wskaźnika ograniczony jest do wydzielonego słupa wody w otworze.
5. Otwór jest idealnie przepuszczalny.

Wydzielonym słupem wody jest tu ta objętość wody, która jest ograniczona od góry i od dołu przez pionowy zasięg pomiaru koncentracji wskaźnika, lub też przez stosowane ostatnio coraz częściej zamknięcia słupa wody powyżej i poniżej sondy pomiarowej. Przyjmijmy, że wydzielony słup wody ma wysokość h , a średnica wynosi $2r$; wtedy jego objętość $V = \pi r^2 h$, a przekrój poprzeczny do strumienia $S = 2r h$. Załóżmy dalej, że ilość wskaźnika w czasie t w objętości V wynosi C . Wtedy:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{QC}{V}$$

zgodnie z równaniem (2) otrzymamy

$$\frac{dC}{dt} = \frac{vSC}{V}$$

Po scałkowaniu i dokonaniu odpowiednich przekształceń dostaniemy

$$v = \frac{\pi r}{2 \Delta t} \ln \frac{C_0}{C} \quad (3)$$

gdzie C_0 oznacza ilość wskaźnika w czasie t_0 , a $\Delta t = t - t_0$.

Wyznaczona na podstawie równania (3) prędkość filtracji charakteryzuje przepływ w samym otworze. Prędkość mierzona w otworze może

znacznie się różnić od prędkości filtracji w otaczającym ośrodku. Różnice te są powodowane samą obecnością otworu, który na ogół posiada inną przepuszczalność niż ośrodek i jest czynnikiem zakłócającym filtrację wody. Pierwszy zagadnienie wpływu otworu na ogólny obraz filtracji rozwiązał S. A. Kol (1948). Bardziej ogólny przypadek z uwzględnieniem obecności filtra podał N. A. Ogilwi (1958) i nieco później B. K. Matwiejew (1963). W wyniku tych rozważań otrzymano następującą zależność między prędkością filtracji w ośrodku v_0 (w odległości od otworu, na jakiej prędkość nie jest już zakłócona), a prędkością v mierzoną w otworze:

$$v = a v_0 \quad (4)$$

gdzie

$$a = \frac{2(1 - K_{12})}{1 - \frac{r_2^2}{r_1^2} K_{12}} \quad (5)$$

przy czym

$$K_{12} = \frac{k_1 - k_2}{k_1 - k_2'}$$

k_1 — współczynnik filtracji ośrodka

k_2 — współczynnik filtracji filtra

r_1 — promień zewnętrzny filtra

r_2 — promień wewnętrzny filtra

Wartość współczynnika a zmienia się od 0 do 4. Jeśli przepuszczalność filtra jest nieskończona, to

$$a = 2 \quad (6)$$

Podstawiając zależność (4) do wzoru (3) otrzymamy

$$v_0 = \frac{\pi r}{2a \Delta t} \ln \frac{C_0}{C} \quad (7)$$

W metodzie konduktometrycznej uwzględnia się jeszcze koncentrację danego wskaźnika w warunkach naturalnych C' . Wtedy wzór stosowany w praktyce ma postać:

$$v_0 = \frac{1,81 \cdot 2r}{a \Delta t} \log \frac{C_0 - C'}{C - C'} \quad (8)$$

Zarówno wzór (3) wyrażający prędkość przepływu w otworze, jak i wyrażenie (5) wprowadzono zakładając, że wodoprzepuszczalność otworu jest nieskończona. W praktyce jednak warunek ten rzadko jest spełniony, ponieważ sondy pomiarowe wypełniają znaczną objętość otworu, np. w piezometrach obserwacyjnych. Zatem wzór (8) może być stosowany tylko wtedy, gdy średnica sondy jest dużo mniejsza od średnicy otworu.

WPLYW OBECNOŚCI SONDY POMIAROWEJ NA MIERZONĄ PRĘDKOŚĆ FILTRACJI

Obecnie postaramy się rozwiązać zagadnienie potencjalnego przepływu na płaszczyźnie, z uwzględnieniem zakłócającego wpływu sondy pomiarowej, otworu i filtra. Wprowadźmy dla tego celu konieczne założenia i oznaczenia (fig. 1):

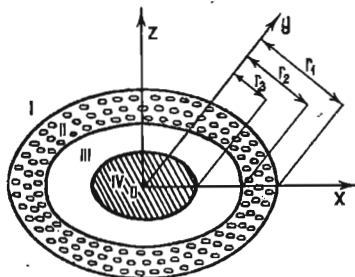
- r_1 — promień zewnętrzny filtra
- r_2 — promień wewnętrzny filtra (promień otworu)
- r_3 — promień sondy pomiarowej
- k_1 — współczynnik filtracji otaczającego otwór ośrodka
- k_2 — współczynnik filtracji filtra
- k_3 — współczynnik przewodnictwa wodnego otworu
- k_4 — współczynnik przewodnictwa wodnego sondy

Fig. 1. Przekrój w płaszczyźnie xy prostopadły do osi otworu (oś z)

Section in plane xy, perpendicular to the bore hole axis (z axis)

r_1 — promień zewnętrzny filtra, r_2 — promień wewnętrzny filtra, r_3 — promień sondy pomiarowej, I — ośrodek porowaty o współczynniku filtracji k_1 , II — filtr o współczynniku filtracji k_2 , III — otwór o współczynniku wodoprzepuszczalności k_3 , IV — sonda o wodoprzepuszczalności k_4

r_1 — external radius of filter, r_2 — internal radius of filter, r_3 — radius of measuring probe, I — porous medium of filtration coefficient k_1 , II — filter of filtration coefficient k_2 , III — bore hole of water-permeability coefficient k_3 , IV — probe of water-permeability k_4



Założmy, że sonda pomiarowa ma kształt walca, co w większości przypadków odpowiada rzeczywistości, i znajduje się w położeniu współkoncentrycznym z otworem. Przepływ odbywa się w płaszczyźnie xy w kierunku osi x. Zakładamy, że są słuszne założenia (wzory (1)–(4) podane w poprzednim rozdziale. Zakładamy również nieściśliwość cieczy przepływającej.

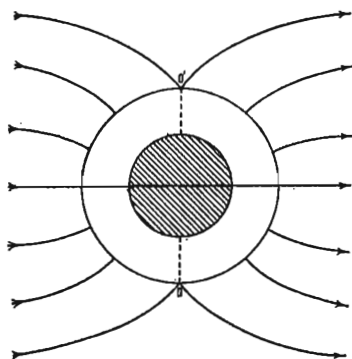


Fig. 2. Schematyczne przedstawienie linii prądu strumienia wodnego opływających otwór wraz z sondą pomiarową

Schematic view of water current lines flowing in bore hole with measuring probe

OO' — przekrój czynny o powierzchni $S = 2h (r_2 - r_3)$

OO' — active section of an area $S = 2h (r_2 - r_3)$

Sprawdźmy przede wszystkim, jak zmieni się wzór (3) wyrażający prędkość przepływu w otworze w obecności sondy pomiarowej. Ponieważ ciecz jest nieściśliwa, ilość wody, jaka wpływa do otworu w jednostce czasu, równa się ilości wody, która wypływa. Ilość wody, która opuszcza otwór, równa jest ilości wody przepływającej w jednostce czasu przez przekrój OO' (fig. 2), który będziemy nazywać przekrojem czynnym. Oznaczmy tę ilość wody przez Q , gdzie $Q = v_{er} S$. Jeśli S oznacza

powierzchnię przekroju czynnego OO' i równa się $S = 2(r_2 - r_3)h$, to v_{sr} oznacza prędkość średnią na przekroju czynnym. Ponieważ objętość $V = \pi(r_2^2 - r_3^2)h$, to

$$v_{sr} = \frac{\pi(r_2 + r_3)}{2\Delta t} \ln \frac{C_0}{C} \quad (9)$$

Jest to zatem wzór wyznaczający prędkość średnią, z jaką przepływa woda przez przekrój czynny. Aby przejść od tej prędkości do prędkości filtracji w otaczającym ośrodku, przeprowadzimy następujące rozważania:

Niech $v_{sr} = \beta v_0$. Zadanie będzie rozwiązane, gdy współczynnik β wyrazimy w funkcji rozmiarów i przepuszczalności sondy, otworu, filtra i ośrodka. Jak wiadomo (H. Margenau, G. M. Murphy, 1956), gdy ciecz jest nieściśliwa i ruch bezwirowy, to istnieje taka funkcja U , której gradient wyznacza wektor prędkości \vec{v} . Czyli

$$\text{grad } U = -\vec{v} \quad (10)$$

Funkcja U nazywana potencjałem prędkości jest rozwiązaniem równania Laplace'a. Równanie to we współrzędnych biegunowych, których środek znajduje się na osi otworu, ma postać:

$$\frac{\delta^2 U}{\delta r^2} + \frac{\delta U}{r \delta r} + \frac{\delta^2 U}{r^2 \delta \varphi^2} = 0 \quad (11)$$

Z równania (1) i (2), uwzględniając wprowadzone oznaczenia, mamy

$$v_0 = k_1 I \quad (12)$$

czyli:

$$\frac{\delta U}{\delta x} = -k_1 I \quad (13)$$

Rozwiązanie równania Laplace'a (11) ma postać:

$$U = A r \cos \varphi + B \frac{\cos \varphi}{r}$$

Uwzględniając zachowanie się funkcji U dla $r = 0$ i $r = \infty$ otrzymamy wyrażenia na potencjał w ośrodku, w filtrze, w otworze i w sondzie odpowiednio:

$$U_1 = -I k_1 r \cos \varphi + B_1 \frac{\cos \varphi}{r}$$

$$U_2 = A_2 r \cos \varphi + B_2 \frac{\cos \varphi}{r}$$

$$U_3 = A_3 r \cos \varphi + B_3 \frac{\cos \varphi}{r}$$

$$U_4 = -I k_1 \cos \varphi + A_4 r \cos \varphi$$

Stałe współczynniki w równaniach (14) określamy na podstawie warunków brzegowych:

$$\text{dla } r = r_1 \quad \frac{1}{k_1} U_1 = \frac{1}{k_2} U_2; \quad \frac{\delta U_1}{\delta r} = \frac{\delta U_2}{\delta r}$$

$$\text{dla } r = r_2 \quad \frac{1}{k_2} U_2 = \frac{1}{k_3} U_3; \quad \frac{\delta U_2}{\delta r} = \frac{\delta U_3}{\delta r}$$

$$\text{dla } r = r_3 \quad \frac{1}{k_3} U_3 = \frac{1}{k_4} U_4; \quad \frac{\delta U_3}{\delta r} = \frac{\delta U_4}{\delta r}$$

Rozwiązując ten układ sześciu równań, wyznaczamy stałe współczynniki:

$$B_1 = -Ik_1 \left[\frac{r_1^2 k_1 (1 - K_{12})}{k_2} + \frac{k_1 (1 - 2K_{12})}{k_2 N'} \left(\frac{\left(1 + \frac{N}{N'}\right) \frac{k_2}{k_3} (r_2^2 + 1)}{M \left(1 - \frac{M' r_3^2}{M r_2^2} K_{34}\right)} - r_2^2 \right) \right]$$

$$A_2 = -Ik_1 (1 - K_{12}) \left[1 - \frac{K_{12}}{r_1^2 N'} \left(\frac{\left(1 + \frac{N}{N'}\right) \frac{k_2}{k_3} (r_2^2 + 1)}{M \left(1 - \frac{M' r_3^2}{M r_2^2} K_{34}\right)} - r_2^2 \right) \right]$$

$$B_2 = -Ik_1 \frac{1 - K_{12}}{N'} \left(\frac{\left(1 + \frac{N}{N'}\right) \frac{k_2}{k_3} (r_2^2 + 1)}{M \left(1 - \frac{M' r_3^2}{M r_2^2} K_{34}\right)} - r_2^2 \right)$$

$$B_3 = -Ik_1 \frac{(1 - K_{12}) \left(1 + \frac{N}{N'}\right) r_3^2 K_{34}}{M \left(1 - \frac{M' r_3^2}{M r_2^2} K_{34}\right)}$$

$$A_3 = -Ik_1 \frac{(1 - K_{12}) \left(1 + \frac{N}{N'}\right)}{M \left(1 - \frac{M' r_3^2}{M r_2^2} K_{34}\right)}$$

$$A_4 = -Ik_1 \left(\frac{(1 - K_{12}) \left(1 + \frac{N}{N'}\right) (1 - K_{34})}{M \left(1 - \frac{M' r_3^2}{M r_2^2} K_{34}\right)} - 1 \right)$$

(15)

gdzie

$$K_{12} = \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2}; \quad K_{34} = \frac{k_3 - k_4}{k_3 + k_4}$$

$$N = 1 + \frac{r_2^2}{r_1^2} K_{12}; \quad N' = 1 - \frac{r_2^2}{r_1^2} K_{12}$$

$$M = 1 + \frac{k_2 N}{k_3 N'}; \quad M' = 1 - \frac{k_2 N}{k_3 N'}$$

Ponieważ nas interesuje równanie trzecie z układu (14), to po podstawieniu odpowiednich współczynników, wyliczamy składową azymutalną grad U , która we współrzędnych biegunowych ma postać $\frac{\delta U}{r \delta \varphi}$. Następnie przyjmując $\varphi = \frac{\pi}{2}$ oraz korzystając z wyrażen (10), (12) i (13) otrzymamy wzór na prędkość przepływu na przekroju czynnym (składowa radialna na tym przekroju $\frac{\delta U}{\delta r} = 0$):

$$v = v_0 \frac{(1 - K_{12}) \left(1 + \frac{N}{N'}\right)}{M \left(1 - \frac{M' r_3^2}{M r_2^2} K_{34}\right)} \left(1 + \frac{r_3^2}{r^2} K_{34}\right) \quad (16)$$

W naszym przypadku $k_4 = 0$, $k_3 = \infty$, a więc $K_{34} = 1$, $M = M' = 1$. Równanie (16) przyjmie postać:

$$v = v_0 \frac{(1 - K_{12}) \left(1 + \frac{N}{N'}\right)}{1 - \frac{r_3^2}{r^2}} \left(1 + \frac{r_3^2}{r^2}\right) \quad (17)$$

Widzimy więc, że prędkość na przekroju czynnym zależy od zmiennej r , gdzie $r_3 \leq r \leq r_2$.

Aby wyeliminować zależność współczynnika $\beta = \frac{v}{v_0}$ od r , przeprowadźmy następujące rozważania. Obliczmy wydatek Q w jednostce czasu przez przekrój czynny. Następnie z wyznaczonego wydatku określimy średnią prędkość, przy której przez ten przekrój przepływa ilość wody równa Q . Wartość r wyznaczmy z porównania otrzymanej prędkości średniej z prędkością określoną równaniem (17). Wobec tego zgodnie z równaniem (2) otrzymamy:

$$Q = \int_S v dS = 2 \int_0^h \int_{r_3}^{r_2} v_0 \frac{(1 - K_{12}) \left(1 + \frac{N}{N'}\right)}{1 - \frac{r_3^2}{r^2}} \left(1 + \frac{r_3^2}{r^2}\right) dh dr$$

Po scałkowaniu otrzymamy:

$$Q = 2v_0 (1 - K_{12}) \left(1 + \frac{N}{N'}\right) r_2 h \quad (18)$$

natomiast

$$v_{sr} = v_0 (1 - K_{12}) \left(1 + \frac{N}{N'}\right) \frac{r_2}{r_2 - r_3} \quad (19)$$

Porównując tę prędkość średnią z prędkością wyrażoną wzorem (17) otrzymamy:

$$r = \sqrt{r_2 r_3} \quad (20)$$

Po podstawieniu wyznaczonej wartości r do wzoru (17) wyrażenie na współczynnik β przyjmie postać:

$$\beta = \frac{v_{sr}}{v_0} = (1 - K_{12}) \left(1 + \frac{N}{N'} \right) \frac{1}{1 - \frac{r_3}{r_2}} \quad (21)$$

Wstawiając $v_{sr} = \beta v_0$ do wzoru (9) otrzymamy:

$$v_0 = \frac{\pi (r_2 + r_3) \ln \frac{C_0}{C}}{2\beta \Delta t} \quad (22)$$

gdzie β wyrażone jest wzorem (21), a v_0 oznacza nie zakłóconą obecnością otworu prędkość filtracji ośrodka porowatego.

ANALIZA OTRZYMANYCH WYNIKÓW

Rozpatrzmy teraz kilka przypadków szczególnych:

A. Załóżmy najpierw, że filtr jest idealnie przepuszczalny. Założenie takie w praktyce jest bardzo często spełnione. Jak wykazały ostatnio badania laboratoryjne (The determination etc., 1964), w wypadku filtra składającego się tylko z perforowanej rury winidurowej zmiany perforacji powyżej 10—12% nie zmieniają już stosunku v/v_0 . Przyjmijmy więc $k_2 = \infty$, $r_1 = r_2$, to wtedy $K_{12} = -1$, $N = 0$, $N' = 2$. Zatem prędkość na przekroju czynnym wyrazi się wzorem

$$v = 2v_0 \frac{1 + \frac{r_3^2}{r^2}}{1 - \frac{r_3^2}{r^2}} \quad (23)$$

Po uwzględnieniu zaś wyrażenia (20) współczynnik β przyjmie postać

$$\beta = 2 \frac{1}{1 - \frac{r_3}{r_2}} \quad (24)$$

Po podstawieniu tej wartości β do (22) otrzymamy

$$v_0 = \frac{\pi (r_2^2 - r_3^2) \ln \frac{C_0}{C}}{4 r_2 \Delta t} \quad (25)$$

Wzór (25) podany został w cytowanej już pracy (The determination etc., 1964) jako eksperymentalny. Prędkość filtracji liczona przy użyciu tego wzoru, a mierzona metodą izotopową na modelu, pokrywała się z prędkością wyznaczoną z wydatku wodnego, gdy perforacja filtru była wyższa niż 10÷12%. Widzimy więc, że wzór, którego słuszność doświadczalnie już potwierdzono, znalazł tu teoretyczne uzasadnienie.

B. Załóżmy teraz, że nie ma sondy pomiarowej, istnieje natomiast filtr. Czyli $r_3 = 0$ i $k_3 = k_4 = \infty$, to $K_{34} = 0$ i $M = 1$, wtedy równanie (16) sprowadzi się do postaci:

$$v = v_0 (1 - K_{12}) \left(1 + \frac{N}{N'} \right) \quad (26)$$

Widzimy więc, że równanie (25) równoważne jest odpowiedniemu równaniu otrzymanemu przez B. K. Matwiejewa (1963) dla przypadku, gdy nie ma sondy pomiarowej:

$$v = v_0 (1 - K_{12}) \frac{2}{1 - \frac{r_3^2}{r_2^2} K_{12}}$$

lub też równaniu podanemu w nieco innej formie przez N. A. Ogilwi (1958):

$$v = v_0 4a \frac{b^2}{(a-1) + (a+1)b^2}$$

$$\text{gdzie } a = \frac{k_2}{k_1}, \quad b = \frac{r_1}{r_2}.$$

C. Na zakończenie rozpatrzmy przypadek, gdy nie ma sondy pomiarowej i gdy filtr jest idealnie przepuszczalny. Uwzględniając założenia z przypadku A we wzorach (23) i (24) otrzymamy:

$$v = 2v_0 \quad (27)$$

a więc β równa się dwa, co już praktycznie i teoretycznie udowodniono (N. A. Ogilwi, 1958; B. K. Matwiejew, 1963).

Na podstawie wzoru (21) wykreślono układy krzywych charakteryzujące zależność współczynnika β od przyjętych wartości r_3/r_2 , r_2/r_1 i k_2/k_1 . Na fig. 3 przedstawiono zależność β od stosunku przepuszczalności filtra

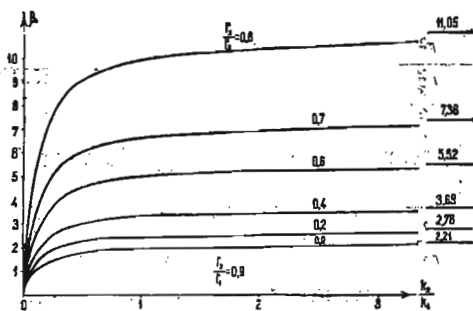


Fig. 3

Fig. 3. Zależność współczynnika β od stosunku przepuszczalności filtra do przepuszczalności gruntu k_2/k_1

Dependency of coefficient β upon the ratio of filter permeability to the soil permeability k_2/k_1

Parametrem krzywych jest stosunek promienia sondy do promienia otworu r_3/r_2
Relation of probe radius to the bore hole radius r_3/r_2 is a parameter of curves

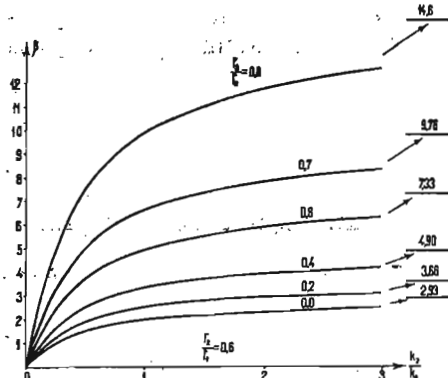


Fig. 4

Fig. 4. Zależność współczynnika β od stosunku przepuszczalności filtra do przepuszczalności gruntu k_2/k_1

Dependency of coefficient β upon the ratio of filter permeability to the soil permeability k_2/k_1

Parametrem krzywych jest stosunek promienia sondy do promienia otworu r_3/r_2
Relation of probe radius to the bore hole radius r_3/r_2 is a parameter of curves

do przepuszczalności gruntu k_2/k_1 dla $r_2/r_1 = 0,9$. Parametrem krzywych jest stosunek promienia sondy pomiarowej do promienia otworu r_3/r_2 . Liczby znajdujące się przy prawych końcach krzywych oznaczają wartości asymptot dla poszczególnych krzywych. Przyjęty stosunek $r_2/r_1 = 0,9$ charakteryzuje warunki, gdy filtr składa się tylko z rury perforowanej. Z rysunku widać, że gdy przepuszczalność filtra dąży do zera, to β też dąży do zera, a więc mierzona prędkość w otworze spada do zera, co jest oczywiste. Dla filtru idealnie przepuszczalnego (zgodnie z wzorem 24, co na rysunku odpowiada krzywej $k_1 = k_2$) β zmienia się od 2, w przypadku gdy nie ma sondy w otworze, do nieskończoności, gdy sonda wypełnia całkowicie otwór. A więc obecność sondy w otworze może zmieniać wartość β w bardzo istotny sposób.

Podobne zależności przedstawia fig. 4, z tą różnicą, że tu $r_2/r_1 = 0,6$. Odpowiada to w przybliżeniu warunkom, gdy filtr posiada obsypkę zwirową.

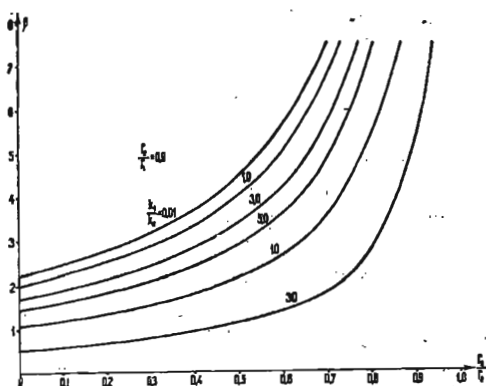


Fig. 5

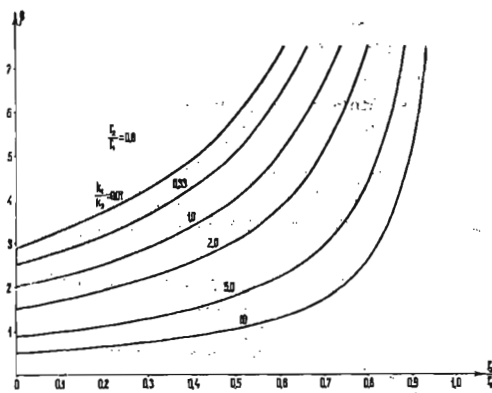


Fig. 6

Fig. 5. Zależność współczynnika β od stosunku promienia sondy pomiarowej do promienia otworu r_3/r_2

Dependency of coefficient β upon the ratio of measuring probe radius to the bore hole radius r_3/r_2

Parametrem krzywych jest stosunek przepuszczalności gruntu do przepuszczalności filtra k_1/k_2

Relation of soil permeability to the filter permeability k_1/k_2 is a parameter of curves

Fig. 6. Zależność współczynnika β od stosunku promienia sondy do promienia otworu r_3/r_2

Dependency of coefficient β upon the ratio of probe radius to the bore hole radius r_3/r_2

Parametrem krzywych jest stosunek przepuszczalności gruntu do przepuszczalności filtra k_1/k_2

Relation of soil permeability to the filter permeability k_1/k_2 is a parameter of curves

W sposób ciągły zależność β od stosunku promienia sondy do promienia otworu przedstawiają rysunki 5 i 6. Parametrem krzywych jest tu stosunek przepuszczalności gruntu do przepuszczalności filtra. Z rysunku 5 można łatwo odczytać wielkość błędu, jaki czynimy nie uwzględniając obecności sondy w otworze. Np. dla filtru idealnie przepuszczalnego (krzywa $k_1 = k_2$) obecność sondy, o promieniu równym 0,1 promienia

otworu, zwiększa wartość współczynnika β , a więc i mierzoną prędkość o 10% w stosunku do stanu, gdy nie ma sondy. Gdy promień sondy stanowi 0,2 promienia otworu, zmiana ta wynosi 25%, gdy 0,5 — to już 100%. Również te same zmiany obserwujemy przy zmniejszającej się przepuszczalności filtru.

WNIOSKI

- Z powyższych rozważań wynikają dwa ważne praktyczne wnioski:
- możliwość uwzględnienia wpływu sondy pomiarowej na mierzoną wartość prędkości filtracji,
 - w przypadku przeprowadzenia badań modelowych prędkości filtracji, w zależności od wielkości perforacji dla danego typu filtra, możliwe jest podanie, w oparciu o krzywe przedstawione na fig. 3 i 4, zależności przepuszczalności filtru od jego perforacji.

Problemy te sprawiały dotychczas wiele trudności przy uwzględnianiu wpływu przepuszczalności filtru na mierzone prędkości filtracji.

Zakład Geologii Inżynierskiej I.G.
Nadesłano dnia 6 marca 1964 r.

PIŚMIENNICTWO

- THE DETERMINATION OF DIRECTION AND VELOCITY OF GROUND WATERS IN A SINGLE BORE-HOLE AND DEVELOPMENT OF SUITABLE EQUIPMENT (1964) — Bericht Bundesversuchs- und Forschungsanstalt Arsenal. Wien.
- BOROWCZYK M. (1963) — Metody radiometryczne w badaniu przepuszczalności gruntów. Biul. Inst. Geol., 182, p. 45—54. Warszawa.
- BOROWCZYK M., KRÓLIKOWSKI CZ. (1964) — Jednotworowe metody izotopowe i elektryczne wyznaczania kierunku przepływu wód gruntowych. Prz. geol., 12, p. 106—112, nr 2. Warszawa.
- FREELY H., WALTON A., BARNETT C. R., BAZAN F. (1962) — Zastosowanie izotopów w badaniach zasobów wodnych. Postępy Techniki Jądrowej, nr 43. Warszawa.
- HALEVY E., NIR A. (1960) — Use of radio-isotopes in studies of groundwater flow. Tahal Water Planning for Israel. Tel-Aviv.
- JANOS M. J. Z. (1960) — Die Bestimmung der Grundwasserbewegung mittels radioaktiver Isotope. Hydrologiai Közlöny, nr 6, p. 455—471. Budapest.
- КОЛЬ С. А. (1948) — Определение скорости фильтрации подруслового потока. Тр. Гос. Гидрол. Ин-та, вып. 8. Гидрометеоиздат. Москва.
- KRÓLIKOWSKI CZ. (1963) Metody elektryczne w badaniu przepuszczalności gruntów. Biul. Inst. Geol., 182, p. 55—68. Warszawa.
- MAIRHOFFER H. (1963) — Bestimmung der Strömungsrichtung des Grundwassers in einem einzigen Borloch mit Hilfe radioaktiven Isotopen. Atompraxis, nr 1, p. 1—3. Karlsruhe.
- MARGENAU H., MURPHY G. M. (1956) — Matematyka w fizyce i chemii. Warszawa.

- МАТВЕЕВ В. К. (1958) — К методике определения скорости подземного потока по одной скважине. Изв. АН СССР, серия геофиз. № 9, стр. 1127—1132. Москва.
- МАТВЕЕВ В. К. (1958) — Определение направления и скорости потока подземных вод по одной скважине. Разведка и охрана недр, № 12, стр. 21—25. Москва.
- МАТВЕЕВ В. К. (1963) — Геофизические методы изучения движения подземных вод. Госгеолтехиздат. Москва.
- MOSER H., NEUMAIER F., RAUERT W. (1957) — Die Anwendung radioaktiver Isotopen in der Hydrogeologie. Atomkernenergie, nr 2, p. 225—233. München.
- NIR A., HALEVY E., MANDEL S., HARPAZ Y. (1959) — Research on the use of radioactive isotopes in hydrology. Tahal Water Planning for Israel. Tel-Aviv.
- ОГИЛЬВИ А. А. (1957) — Геоэлектрические методы изучения карста. Изд-во МГУ.
- ОГИЛЬВИ А. А. (1962) — Геофизические методы исследований. Москва.
- ОГИЛЬВИ Н. А. (1958) — Электрический метод определения скорости фильтрации подземных вод. Бюл. науч-технич. инфор. № 4. Москва.
- PACZYŃSKI B. (1959) — O niektórych metodach geoelektrycznych w hydrogeologii. Prz. geol., 9, p. 165—171, nr 4. Warszawa.
- ШЕМШУРИН В. А. (1959) — Новый способ определения направления и скорости подземного потока с помощью электроразведки. Бюл. науч-технич. информ. № 2, стр. 62—64. Москва.

Чеслав КРУЛИКОВСКИ

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЗОНДОВ НА ИЗУЧЕНИЕ СКОРОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В БУРОВЫХ СКВАЖИНАХ И ПЬЕЗОМЕТРАХ

Резюме

В введении рассматриваются геофизические методы определения скорости фильтрации в одной буровой скважине или пьезометре. В последнее время наиболее широко применяются в этой области электрические (кондуктометрическая) и изотопные методы. Приводятся формулы для определения скорости фильтрации в случае бесконечной проводимости скважины при использовании этих методов.

Так как наличие измерительного зонда в буровой скважине вызывает изменение проводимости скважины, следовательно и характера течения водного потока, ставится задача выведения формул для определения скорости фильтрации, учитывающих влияние измерительного зонда. При определенных заданиях была введена новая формула, определяющая скорость течения воды в буровой скважине. Затем приводится коэффициент, определенный аналитическим путем, который в определенных условиях позволяет перейти от измеряемого значения скорости течения в скважине к искомому значению фильтрации в пористой среде.

С целью определения этого коэффициента был решен вопрос потенциального течения в плоскости с учетом наличия в пористой среде взаимоконцентрически расположенных фильтра, скважины и измерительного зонда. Коэффициент выражается в функции диаметров зонда, скважины и фильтра и проницаемости фильтра и среды. Затем проанализировано несколько частных случаев, констатируя, между прочим, соответствие выделенных формул с известными формулами для потока не учитывающего наличия измерительного зонда. Построено ряд кривых, образующих зависимость определенного коэффициента от принятых размеров зонда, скважины и фильтра и проницаемости фильтра и среды.

Результаты приведенной теории позволяют учитывать влияние измерительных зондов на скорость фильтрации и, при определенном моделировании, указать зависимость проницаемости фильтра от его перфорации.

Czesław KRÓLIKOWSKI

INFLUENCE OF MEASURING PROBES UPON EXAMINATION OF FILTRATION VELOCITY OF UNDERGROUND WATERS IN BORE HOLES AND PIEZOMETERS

S u m m a r y

The paper deals with the geophysical methods of determining filtration velocity in a bore hole or piezometer. Electrical (conductometric) methods, as well as isotopic methods are here mostly used. The author gives formulae to determine the filtration velocity using these methods in the case of infinite conductivity of bore hole.

Because the presence of a measuring probe in a bore hole changes the conductivity of this latter, hence also the character of water current, an attempt was made to determine the formulae of filtration velocity, taking into account the influence of probe. When determining the tasks, a new formula was introduced, which defines the velocity of water flow in bore hole. Moreover, in the paper an analytic form of a coefficient was given, allowing, in the given conditions, to pass from the measured value of flow velocity in bore hole into a desired value of filtration velocity in the porous medium.

To determine the coefficient, a problem of potential flow in the plane has been solved, taking into consideration the bore-hole, filter and the measuring probe concentrically situated to each other in the porous medium. The coefficient is expressed as a function of probe diameters, bore hole and filter, as well as a function of permeability of filter and medium. Moreover, several particular examples have been examined. The results obtained have revealed the conformity of the formulae introduced with the known formulae for a flow not-considering the presence of measuring probe. In addition to this, a series of curves was plotted to show the dependency of determined coefficient upon the given dimensions of probe, bore hole and filter, as well as upon the permeability of filter and medium.

The results of the theory presented permit to take into consideration the influence of measuring probes upon the filtration velocity, as well as to find, during the determined model examinations, the dependency of permeability of filter upon its perforation.