JÓZEF SAPUŁA

PGBW „Hydrogeo" Warszawa

POLOWA METODA POMIARÓW PIONOWEJ ZMIENNOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA FILTRACJI GRUNTÓW „K" SPOSOBEM KRÓTKOTRWAŁYCH SCZERPYWAŃ

UKD 624.131.6:556.332.048

W badaniach geologiczno-inżynierskich, dotyczących obiektów budownictwa wodnego, jednym z głównych celów rozpoznania hydrogeologicznego jest określenie współczynników filtracji gruntów w strefach przewidywanego wzajemnego oddziaływania obiektów budowlanych z naturalnym środowiskiem gruntowym. Spośród wielu znanych i powszechnie stosowanych metod określania współczynnika k za najdokładniejszą uważane jest próbne pompowanie w hydrowęźle. Ponieważ równocześnie jednak metoda ta jest najkosztowniejsza, względy ekonomiczne zmuszają projektantów do stosowania jej w maksymalnie ograniczonym zakresie. W praktyce sprowadza się to do wykonania jedynie próbnych pompowań w kilku wybranych hydrowęzłach i ekstrapolacji wyników.

Z drugiej strony uzyskany w wyniku badań współczynnik k praktycznie charakteryzuje uśrednione warunki hydrogeologiczne w strefie wokół hydrowęzła, określonej zasięgiem leja depresyjnego, nie dając informacji o zróżnicowaniu przepuszczalności zależnie od głębokości, rodzaju gruntów, sposobu ułożenia ziarn w warstwie wodonośnej itd. Wiadomo jednak, że efekt jednej lub kilku warstw dobrze przepuszczalnych, o nawet nieznacznej miąższości występujących wśród utworów słabo przepuszczalnych, może niejednokrotnie dominować prowadząc do mylnej oceny właściwości filtracyjnych całego kompleksu warstw wokół obiektu i wyboru nie zawsze optymalnych rozwiązań technicznych. Z drugiej strony brak metod polowych pomiaru pionowej zmienności współczynnika filtracji uniemożliwiał przeprowadzenie szczegółowszych badań hydrogeologicznych.

Metody laboratoryjne oznaczania współczynnika filtracji k, na próbkach pobranych z otworów wiertniczych obarczone są błędem zasadniczym, związanym z praktyczną niemożliwością odtworzenia naturalnych warunków hydrogeologicznych w pomiarze laboratoryjnym, a m. in. zniekształceniem w pobranych próbkach rzeczywistego składu granulometrycznego wodonośca. Dla oceny przestrzennej zmienności współczynnika filtracji opracowano szereg polowych metod pomiarowych, zastępujących niejednokrotnie kłopotliwą i kosztowną metodę próbnych pompowań. Metody te polegają na krótkotrwałym zalewaniu lub sczerpywaniu w otworach o średnicy powyżej 8″ i szybikach.

Należy tu wymienić m. in. metodę Diserensa (3), Hooghoudta (6), Maaga, Kozeny (10), Kollbrunnera (7), a także hydrogeologów radzieckich: Bałdyriewa, Niestorowa, Kamieńskiego, Giryńskiego, Zamarina i Bindemana (4). Wspomniane metody sprawdzają się zwykle do określenia wodoprzepuszczalności gruntów w strefie tuż powyżej (przy zalewaniu wyrobisk) lub też poniżej zwierciadła wody gruntowej.

Dość popularna w Polsce metoda Van Beersa (1, 2, 8, 11), polegająca na krótkotrwałym sczerpywaniu w piezometrze z filtrem o średnicy 3 cale, z dnem otwartym, obarczona jest podobnymi niedogodnościami i jej zasięg głębokościowy jest równie nieznaczny. Ze względu na trudności, jakie nastręczały pomiary napływów wody w piezometrach na wzór opisanego przez Van Beersa (1), szczególnie w gruntach o dobrej przepuszczalności, metoda ta w praktyce zawodziła. Metoda krótkotrwałych sczerpywań Rosłońskiego-Forhcheimera (12), zmodyfikowana przez A. Wieczystego (13), opracowana została dla istniejących studni szybowych i różnych typów studni z filtrem o średnicach co najmniej 8 cali. Mimo większego niż poprzednie metody zasięgu głębokościowego wymaga ona zastosowania wydajnych urządzeń pomiarowych.

W 1968 r. w PGBW „Hydrogeo" podjęto się opracowania polowej metody określania współczynnika k, której celem było uniknięcie niedogodności, jakie stwarzają wyżej wspomniane metody, przy jednoczesnej prostocie i dostatecznej dokładności pomiarów. Punktem wyjścia było opracowanie teoretyczne D. Kirkhama i Van Bavela metody określania współczynnika k przez zalewanie przez dno w otworach małośrednicowych (do 3″). Przy zalewaniu stałą ilością wody (M), niezbędną dla wytworzenia stałego poziomu l_1 ponad dnem otworu, odpowiedni wzór na współczynnik przepuszczalności K miał postać:

$$K = \frac{M \cdot \mu}{\varrho \cdot g \cdot A(R, d) \cdot (l_1 - d)} \qquad [1]$$

gdzie:

μ = lepkość wody w gruncie
σ — gęstość wody (w jednostkach CGS)
g = przyspieszenie grawitacyjne (980 w jednostkach CGS)
$A(R, d)$ = funkcja zależna od średnicy wewnętrznej otworu R, i głębokości d dna otworu poniżej statycznego zwierciadła wody.

Wzór ten został wyprowadzony z równania Muskata jako rozwiązanie równania Laplace'a na potencjał prędkości Φ prądu bezwirowego, nieściśliwego płynu przy założeniu odpowiednich warunków brzegowych:

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \qquad [2]$$

gdzie: ∇^2 oznacza sumę drugich pochodnych przesunięć składowych wektora potencjału prędkości względem osi x, y i z,
dla

$$\Phi = \frac{k}{\mu}(p + \varrho \cdot g \cdot z) \qquad [3]$$

gdzie: p = ciśnienie na każdy punkt w warstwie wodonośnej,
z = pionowa współrzędna w układzie 3-osiowym.

Z zależności [1] wyprowadzono wzór na współczynnik K przy zalewaniu, gdy dopływ wody do rury zostaje nagle przerwany. W tym przypadku miarą przepuszczalności gruntu jest przeciąg czasu $\Delta t = t_2 - t_1$, w którym określona wymiarami rury ilość wody opadnie z poziomu l_1 do poziomu l_2 powyżej statycznego zwierciadła wody. Współczynnik K oblicza się wg wzoru:

$$K = \frac{\pi\mu R^2 \ln \frac{l_1 - d}{l_2 - d}}{\varrho \cdot g \cdot A(R,d)\,\Delta t} \qquad [4]$$

dla R i A w calach i Δt w sek.

Ponieważ współczynnik filtracji $k = K \cdot \frac{\varrho g}{\mu}$, więc ostatecznie:

$$k = \frac{\pi R^2}{A(R,d)} \cdot \frac{ln \frac{l_1 - d}{l_2 - d}}{\Delta t} \quad [\text{cm/sek}] \qquad [4']$$

Przyjmując, że sczerpywanie jest procesem odwrotnym do zalewania J. N. Luthin i D. Kirkham (9) zastosowali wzór [4'] do obliczenia współczynnika filtracji metodą sczerpywania zastępując iloraz $(l_1 - d)$: $(l_2 - d)$ ilorazem $(d - y_1)$: $(d - y_2)$, gdzie: y_1 i y_2 są to kolejne położenia zwierciadła wody po sczerpaniu do poziomu d w czasie t_1 i t_2 od tego momentu. Dla potwierdzenia przydatności metody autorzy ci wykonali pomiary polowe w gruntach słabo przepuszczalnych do głębokości ok. 70 cm poniżej zwierciadła wody, mierząc napływ do płytkiego (2,5 ÷ 10 cm) podwiertu.

Zgodnie z wnioskiem J. N. Luthina i D. Kirkhama w gruntach piaszczystych podwiert można zastąpić filtrem o tych samych wymiarach. W tym przypadku funkcja A we wzorze [4] jest zależna od R, d i w ryc. 1). R. K. Frevert (5) ustalił te zależności na podstawie badań na elektrycznym modelu ruchu wód podziemnych. Badania D. Kirkhama pozwoliły przyjąć, że jeśli $d \gg w$ i $d \gg s$ to funkcja A jest zależna tylko od w i R.

Podane wyżej wnioski i wzór [4] wykorzystano w niniejszym opracowaniu. Aby uzyskać wymiar współczynnika filtracji w cm/sek przekształcono odpowiednio (ryc. 2) podany przez J. N. Luthina wykres funkcji A. Wzór na współczynnik filtracji można zapisać w uproszczonej postaci:

$$k = f(F) \cdot C \ [\text{cm/sek}] \qquad [5]$$

gdzie:

$$C = \frac{\pi R^2 \cdot 2{,}303}{A} \qquad F = \frac{\lg \frac{d - y_1}{d - y_2}}{\Delta t}$$

dla A, R, d, y_1 i y_2 w cm i Δt w sek

Ponieważ wartość C jest stała i charakteryzuje zastosowany piezometr wobec tego obliczenie k polega na wyznaczaniu z pomiarów wartości funkcji F.

Metoda J. N. Luthina i D. Kirkhama została sprawdzona w gruntach słabo przepuszczalnych. Celem naszych prac było ustalenie możliwości rozszerzenia jej stosowania w gruntach dobrze przepuszczalnych, a także w oparciu o wzór [5] wykonanie pomiarów pionowej zmienności współczynnika filtracji. Spełnienie tych zadań wymagało opracowania sposobu wprowadzania w grunt piezometrów badawczych, techniki sczerpywania wody i pomiarów szybkich napływów wody.

Pomiary prowadzono przy użyciu piezometrów o średnicy zewnętrznej równej $1^1/_2$ cala (typowe rury wodociągowe) i wewnętrznej 0,69 cala, tzn. 17,5 mm wbijanych w grunt wibromłotem BC-9. Do badań zastosowano filtry o długości 2,5 cm i 10 cm. Filtrem był odcinek piezometru o perforacji ok. 20%, pokryty siatką miedzianą. Rura podfiltrowa piezometru długości 50 cm zakończona była stożkiem o kącie wierzchołkowym 60°, dla zmniejszenia do minimum oporów tarcia w trakcie wbijania piezometru w grunt. Przyspawane pierścienie przed i za siatką chroniły ją przed zniszczeniem przy wbijaniu, czy wyciąganiu piezometru.

Po wbiciu piezometru na projektowaną głębokość wykonywano pompowanie oczyszczające trwające 10—15 min przy użyciu ręcznej pompy skrzydełkowej zaopatrzonej w cienki wąż gumowy. Pompowanie oczyszczające przerywano w momencie, gdy stwierdzono, że pompowana z dna piezometru woda była zupełnie czysta. Po ustabilizowaniu się wody na poprzednim poziomie przystępowano do właściwych pomiarów. Polegały one na krótkotrwałym sczerpaniu wody do danej depresji i pomiarze szybkości podnoszenia się wody. Wykonanie tych pomiarów umożliwiło zastosowanie urządzenia konstrukcji autora oraz S. Maciaka i T. Zimnego.

W odróżnieniu od podobnych urządzeń tego typu, zamiast rejestracji wielkości depresji w ustalonych przedziałach czasowych, mierzono czas napływu do stałych punktów o znanej głębokości położenia w stosunku do statycznego zwierciadła wody i filtru. Odległości między stałymi punktami przyjmowano zależnie do szybkości napływu wody — 1, 2,5 lub 10 cm. Czas napływu mierzono stoperami z dokładnością do 0,1 sek. Dla oceny powtarzalności i dokładności pomiarów tym urządzeniem w każdym położeniu filtru wykonywano po 12 serii pomiarowych, z rejestracją w każdej serii czasu napływu do 3, niekiedy 4 punktów stałych. Punkty te wybierano tak, aby cały pomiar zakończyć co najwyżej na 1/4 głębokości depresji początkowej d (ryc. 1).

Na podstawie ok. 3600 pojedynczych pomiarów stwierdzono, że maksymalne odchylenie pojedynczych pomiarów z 12 serii od wartości średnich nie przekroczyło 14%, jedynie przy najwyższej zmierzonej szybkości napływu dochodzącej do 20 cm/sek wyniosło 20%. Taką dokładność pomiarów uznano za zupełnie zadowalającą. Pomiary wykonywał zespół w składzie 2 pracowników fizycznych i 2 inżynieryjno-technicznych. Czas pomiarów przy 10 położeniach filtra, łącznie z montażem i demontażem urządzenia wiertniczego (wibromłota) — 4÷5 godzin. Ponieważ zarówno sposób zakładania piezometrów, ich budowa jak i sposób pomiaru napływów różniły się dość istotnie od przyjętych w metodzie J. N. Luthina i D. Kirkhama (9) należało sprawdzić, czy wykres funkcji F zgodnie ze wzorem [4] spełniać będzie równanie liniowe

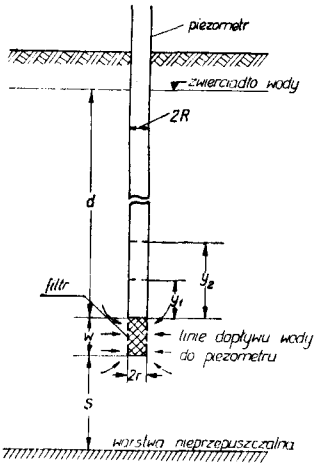
$$y = F \cdot x \qquad [6]$$

dla $y = \lg \frac{d - y_1}{d - y_2}$ i $x = \Delta t$

Że tak jest w istocie potwierdziły wyniki pomiarów w utworach piaszczysto-żwirowych dla filtru długości 10 cm (ryc. 3) oraz 2,5 cm. Pomiary te wykonywano w różnych punktach przy stałej depresji początkowej równej 0,6 m. Na wykresy naniesiono średnie wartości czasu $\Delta t = t_2 - t_1$ z 12 serii pomiarowych dla dowolnie wybranych odległości pomiarów napływu, np. 0 — 5, 0 — 10, 0 — 15, 5 — 10, 5 — 15, 10 — 15 cm.

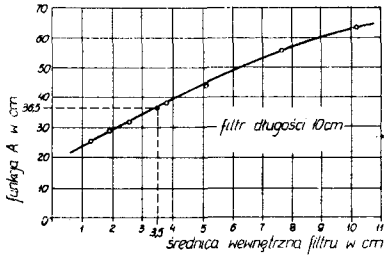
Dalsze badania miały dać odpowiedź na pytanie, czy można tą metodą mierzyć zmianę współczynnika filtracji w pionie i w jakim stopniu uzyskiwane wyniki zależne są od stosowanej depresji początkowej i długości filtrów. W związku z tym wyniki pomiarów należało porównać z rzeczywistymi wartościami współczynników filtracji, uzyskanymi z próbnych pompowań. W tym celu do prac doświadczalnych wytypowano miejsca, gdzie przeprowadzane były takie badania dla płytko zalegających utworów wodoprzepuszczalnych i gdzie znany był z wierceń profil geologiczny. Prace przeprowadzono na hydrowęzłach w Jabłonnie koło Warszawy, na terenie poligonu doświadczalnego IG oraz w Sulejowie, gdzie przeprowadzono uprzednio badania hydrogeologiczne dla projektowanego stopnia wodnego.

W pierwszym przypadku pomiary wykonywano w warunkach napiętego zwierciadła wody, w pozostałych — swobodnego. Pomiary podstawowe prowadzono co 0,5 m, do głębokości średnio 6 m poniżej zwierciadła wody przy stałej depresji początkowej równej 0,6 m dla dwu długości filtrów: 2,5 i 10 cm. Po-


piezometr
zwierciadło wody
2R
d
filtr
y_2
y_1
w
linie dopływu wody do piezometru
2r
s
warstwa nieprzepuszczalna

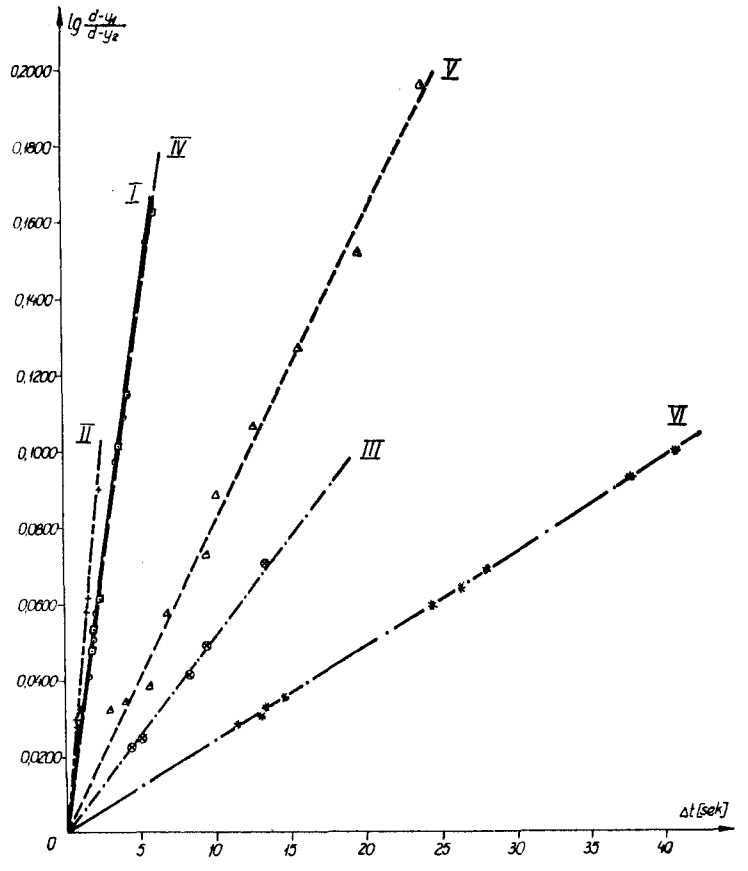
Ryc. 1. Schemat pomiaru współczynnika filtracji metodą sczerpywania według J. N. Luthina i D. Kirkhama.

Fig. 1. Scheme of measurement of permeability coefficient by means of bailing (according to J. N. Luthin and D. Kirkham).


funkcja A w cm
filtr długości 10cm
średnica wewnętrzna filtru w cm

Ryc. 2. Wykres funkcji A dla filtru długości 10 cm.

Fig. 2. Diagram of function A for a filter 10 cm in length.


$lg \frac{d-y_1}{d-y_2}$
I
II
III
IV
V
VI
Δt [sek]

Ryc. 3. Wyznaczanie funkcji F z dowolnie wybranych przedziałów krzywej zmian depresji w czasie; I, II, III, IV, V — kolejne otwory badawcze.

Fig. 3. Determination of function F of freely selected intervals of a curve of changes in depression with time; I, II, III, IV — test bore holes.

dobne pomiary, ale przy zmiennej depresji początkowej rosnącej na ogół z głębokością wykonaną na hydrowęzłach H_1 i H_2 w Sulejowie, stosując filtry długości 10 cm. Dla stwierdzenia, czy i w jakim zakresie krzywa stabilizacji spełnia równanie (6) wykonano również pomiary co 5 cm, czasów napływów wody przy długotrwałej stabilizacji przy depresji początkowej powyżej 4 m. Dwa z takich pomiarów ilustruje ryc. 4.

W trakcie pompowania oczyszczającego, przed i po zakończeniu pomiarów przy danym położeniu filtru prowadzono obserwacje zachowania się zwierciadła wody w dwóch piezometrach, z których bliższy znajdował się w odległości 4—5 cm, a drugi 30 cm od piezometru badawczego. Zgodnie ze wzorem [5] ustalono wartości stałych współczynników C:

dla filtru długości 2,5 cm $C_1 = 1{,}27$ cm
dla filtru długości 10 cm $C_2 = 0{,}612$ cm

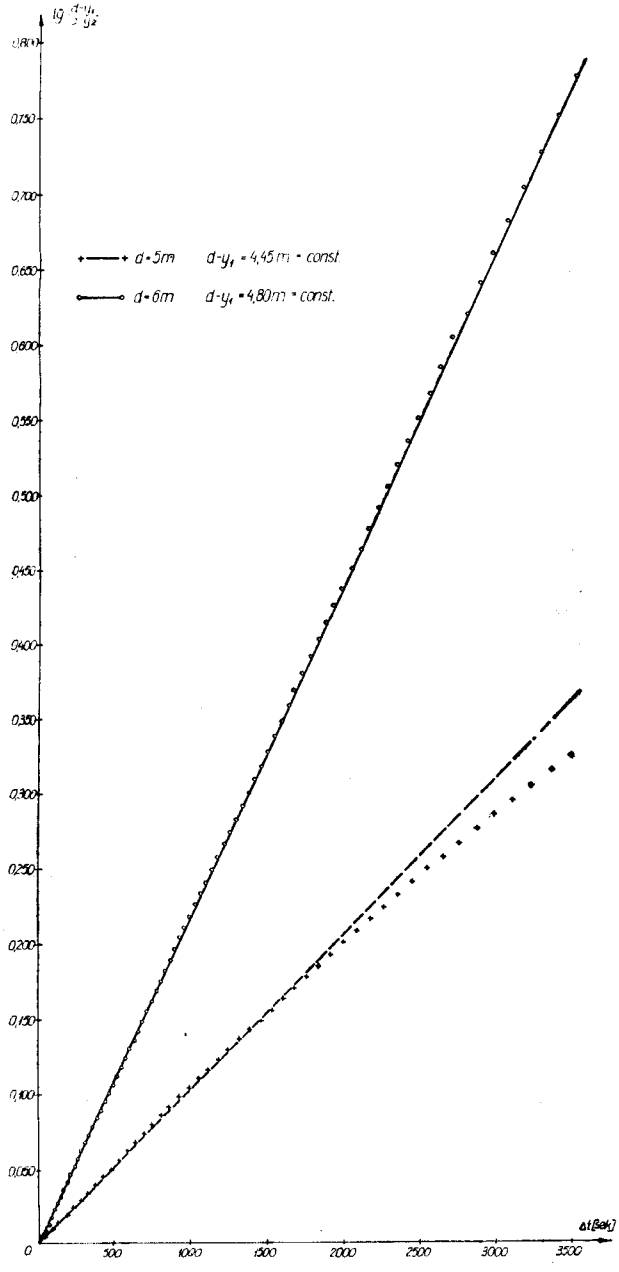
Dla uproszczenia obliczeń opracowano nomogram (ryc. 5) do bezpośredniego odczytywania wartości funkcji *F*. Sposób korzystania z nomogramu jest następujący: na nomogram nakłada się czystą kalkę kreślarską i odkłada się punkty o współrzędnych $\Lambda\ t_{1,2,3,..} t_n$, oznaczające kolejne czasy napływów mierzone od depresji początkowej ($t_o = 0$) do $t_{1,2,3...} n$ i odpowiadające im względne spadki depresji $(d - y_1)/(d - y_{2,3...} n)$ (ryc. 1). Punkty te uśrednia się prostą przechodzącą przez początek układu współrzędnych, która wyznacza z nomogramu wartość funkcji *F*.

Jeżeli przyjęta w nomogramie skala Δt okaże się za mała, można ją pomnożyć przez 5, 10, 100 itd. dzieląc przez tę samą liczbę wartość F.

Dla określenia współczynnika filtracji wystarczyło wartość *F* pomnożyć przez stałą C_1 lub C_2 zależnie od długości filtru. Dla innych filtrów wartość *C* należy obliczyć. Natomiast funkcję *F* można wyznaczyć z tego samego nomogramu. Wyniki obliczeń współczynników filtracji ze wzoru [5] dla różnych wariantów pomiarów i dwóch długości filtrów przedstawiono przykładowo dla hydrowęzła H_2 w Sulejowie (ryc. 6). Obok umieszczono profile geologiczne otworów z hydrowęzła, odległych od punktu pomiarowego o ok. 3—5 m, oraz wykresy stosunków współczynników filtracji k_1/k_2 *i* k_1/k_3 dla poszczególnych głębokości pomiarów dla porównania wyników uzyskanych zależnie od sposobu pomiaru.

Analizując przebieg zmian współczynnika *k* z głębokością dla różnych warunków pomiaru we wszystkich hydrowęzłach widać, że jest on ogólnie zgodny z profilem geologicznym, choć zróżnicowanie krzywych współczynnika filtracji jest znacznie większe, niż wynikałoby to z danych geologicznych. Fakt ten jednakże jest zrozumiały, jeśli się weźmie pod uwagę dokładność, z jaką można pobrać próbki gruntów sypkich spod wody przy ręcznych wierceniach okrętnych. Z porównania krzywych wynika, że najmniej

Punkt pomiaru	Współczynnik filtracji w cm/sek				$B_{1,2,3}$		
	kp	k śr	k_2 śr	k_3 śr	kp/k śr	kp/k_2 śr	kp/k_3 śr
Hydrowęzeł G w Jabłonnej	$8{,}21\cdot10^{-2}$	$4{,}56\cdot10^{-2}$	$5{,}05\cdot10^{-2}$	—	1,80	1,63	—
Hydrowęzeł H w Sulejowie	$5{,}3\cdot10^{-2}$	$8{,}31\cdot10^{-3}$	$1{,}67\cdot10^{-2}$	$1{,}11\cdot10^{-2}$	5,32	3,17	3,99
Hydrowęzeł H_2 w Sulejowie	$7{,}04\cdot10^{-2}$	$9{,}98\cdot10^{-3}$	$1{,}05\cdot10^{-2}$	$8{,}9\cdot10^{-3}$	5,87	6,70	6,58



Ryc. 4. Przebieg zmian depresji w czasie w układzie logarytmicznym przy długotrwałej stabilizacji wody po szczerpaniu.

Fig. 4. Changes in depression with time in the logarithmic system after a long-lasting stabilization of water after bailing process

zróżnicowane są krzywe dla filtru długości 10 cm i stałej depresji. Bardzo zbliżone są wyniki dla tegoż filtru przy zmiennej depresji gdyż stosunek k_1/k_3 we wszystkich trzech hydrowęzłach wyniósł od 0,36 do 2,3, średnio 1,16.

Dla porównania można podać, że współczynniki filtracji z próbnych pompowań w tych hydrowęzłach zależnie od przyjętego sposobu obliczeń różniły się od siebie 2,3 ÷ 3,9-krotnie, a z badań laboratoryjnych nawet 10-krotnie. Z tego względu można uznać, że w opisywanej metodzie wybór depresji początkowej do pomiarów nie ma praktycznie wpływu na uzyskiwane wyniki. Podobny wniosek nasunęły długotrwałe obserwacje stabilizacji wody po sczerpaniu (ryc. 4), gdzie liniowy wykres funkcji F w układzie logarytmicznym nawet przy k mniejszym od $1{,}3\cdot10^{-4}$ cm/sek. odbywa się na odcinku stanowiącym ponad 2/5 depresji początkowej.

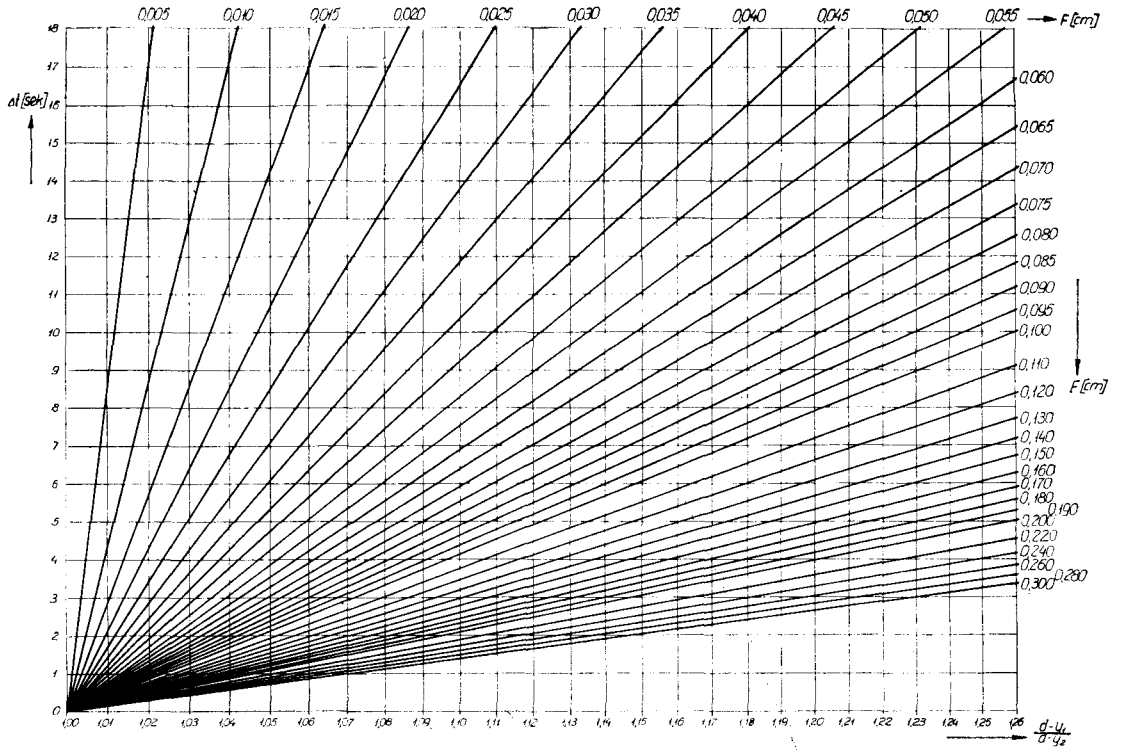
Porównując krzywe k obliczone z piezometrów o długości 2,5 cm i 10 cm okazuje się, że pierwsze daje obraz bardziej zróżnicowany. Należy to tym tłumaczyć, że jak wynika z minimalnych (rzędu 1—3 cm) depresji w trakcie wykonywania pomiarów obserwowany w piezometrach założonych bezpośrednio nio przy piezometrze badawczym, niemal całkowity napływ do filtru odbywa się ze strefy bezpośrednio z nim sąsiadującej. Fakt ten potwierdziły pomiary modelowe Freverta (5) jak też obserwacje Rosłońskiego (12) z badań współczynnika k metodą krótkotrwałego pompowania studni. Wobec tego rozdzielczość pomiaru filtrem krótszym jest większa. Z drugiej strony jednak istnieje większa obawa zasłonięcia lub zamazania, np. gliną filtru krótszego, co może wpłynąć na zaniżenie wyników. Z powyższych przyczyn stosunki współczynników dla obu długości (k_1/k_3) są nieco bardziej zróżnicowane — od 0,19 do 4,85 średnio 1,34. Ponieważ sposób pomiarów różnił się od przyjętego przez J. N. Luthina i D. Kirkhama, należało się liczyć z tym, że obliczony współczynnik filtracji może się różnić nieco od rzeczywistego. Z porównania współczynnika k z próbnego pompowania (kp) uznanego jako właściwy, acz średni dla całego profilu, z obliczonymi opisywaną metodą jako średnie ważone w profilu pionowym, przy stałej depresji dla filtrów długości 10 cm (k_1 śr) i 2,5 cm (k_2 śr) i zmiennej depresji dla filtru długości 10 cm (k_3 śr), obliczono współczynnik B do wzoru na rzeczywisty współczynnik filtracji (k_{rzecz}):

$$k_{rzecz} = B_{1,2,3} \cdot k_{1,2,3}$$

Wartości współczynników B_1, B_2 i B_3 wynoszące średnio dla pomiarów przy napiętym zwierciadle wody (Jabłonna) 1,80 i 1,63 oraz przy swobodnym zwierciadle wody (dla hydrowezłów H_1 i H_2 w Sulejowie) odpowiednio 5,6: 4,93 i 5,3 wymagają oczywiście uściślenia w toku dalszych prac (vide tabela).

WNIOSKI

1. Przedstawiona metoda z uwagi na niski koszt badań, szybkość i dokładność pomiaru oraz rozdzielczość w profilu pionowym zmian współczynników filtracji niemożliwą do osiągnięcia innymi znanymi dotąd metodami zasługuje na szerokie zastosowanie jej do badań geologiczno-inżynierskich, szczególnie



Ryc. 5. Nomogram dla wyznaczenia funkcji F do wzoru na współczynnik filtracji $k = C \cdot F\ (d, y, \Delta t)$.
Po lewej zamiast 18 do 1 powinno być 1,8 do 0,1, po prawej zamiast F (cm) powinno być Fl/sek.

Fig. 5. Nomogram for determination of function F to the formula for the permeability coefficient $k = C \cdot F\ (d, y, \Delta t)$.

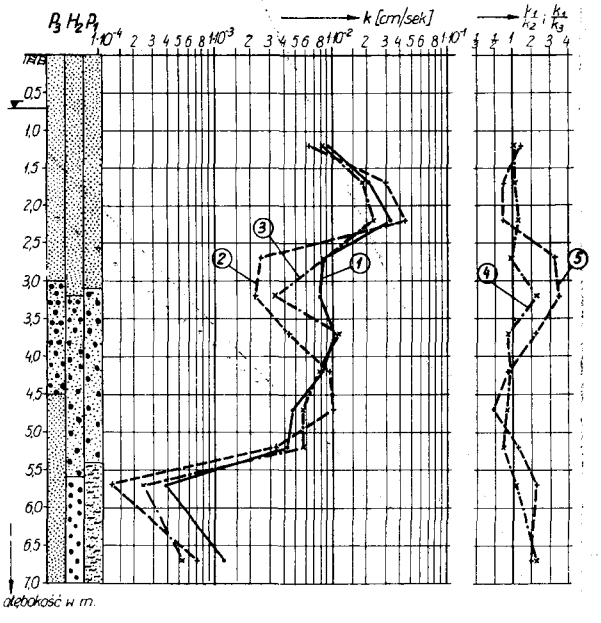
dla obiektów budownictwa wodnego, z równoczesnym wykorzystywaniem wyników otrzymywanych z próbnych pompowań dla uściślenia wartości B dla obliczeń współczynnika k.

2. Za najkorzystniejszy w pracach polowych uznano pomiar przy użyciu filtru długości 10 cm przy zachowaniu stałej depresji początkowej rzędu 50—70 cm. Ma to jeszcze tę dodatkową zaletę, że stosując takie same filtry i stałą depresję początkową obliczenie dalszych współczynników filtracji można sprowadzić do zależności:

$$\frac{k_{2,3,4\ldots n}}{k_1} = \frac{\Delta t_1}{\Delta t_{2,3,4\ldots n}}$$

o ile czasy pomierzono dla tego samego odcinka Δy krzywej stabilizacji wody. Jedynie przy małych dopływach (poniżej 1 cm/min.) pomiary ze względu na czas trwania należy prowadzić przy największej możliwie depresji początkowej. Filtr krótszy np. 2,5 cm powinno się stosować jedynie w przypadkach uzasadnionych koniecznością pomiaru współczynników filtracji warstw o miąższości do 20 cm. Stosując opisany wyżej przyrząd wystarczy wykonać 3 do 5 serii pomiarów szybkości napływu wody dla dostatecznie dokładnego wyznaczenia funkcji F z podanego nomogramu, co znacznie skróci cały cykl pomiarowy.

3. Zasięg głębokościowy pomiarów ze względu na użycie wibromłota BC-9 do zakładania piezometrów małośrednicowych wynosi 15 m. Zwiększenie zasięgu wymaga opracowania innego sposobu zakładania piezometrów i sczerpywania wody z otworu.



$1 - k_1,\ 2 - k_2,\ 3 - k_3,\ 4 - \frac{k_1}{k_3},\ 5 - \frac{k_1}{k_2}$

Ryc. 6. Zestawienie wyników pomiarów pionowej zmienności współczynnika filtracji metodą sczerpywania.

Fig. 6. Comparison of results of measuring the vertical changes in permeability coefficient by means of bailing method.

LITERATURA

1. Beers V. — The auger-hole method, a field measurement of the hydraulic conductivity of soil below the water table. Intern. Institute for Land Recl. and Improvement. Biul. 1958.

2. Borowczyk M. — Określenie współczynnika filtracji gruntów sypkich w zależności od stosowanej metody. Arch. IG, 1962.

3. Diserens T. — Beitrag zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Bodens in natürlicher Bodenlagerung. Schweitz. Landw. Monatschr. 12, 1934.
4. Dobrzański Z. — Polowe metody oznaczania współczynnika przepuszczalności skał wodonośnych i gruntów. Wyd. Geol. 1956.
5. Frevert R. K. — Development of a three dimentional electric analogue with application to field measurement of soil permeability below a water table — unpublished thesis, copy on file Iowa State College Library. Ames, 1948.
6. Kirkham D. — Proposed method for field measurement of permeability of soil below the water table. Contribution from the Naval Ordnance Laboratory. U.S. Navy Yard, Washington, D.C. 1949.
7. Kollbrunner C. F. — Fundation und Konsolidation, t. I. Zürich, 1945.
8. Kowalski J. — Określenie współczynnika filtracji metodą napływu wody do otworu wiertniczego o małej średnicy. Gosp. wod. 1962, nr 9.
9. Luthin J. N., Kirkham D. — A piezometer method for measuring permeability of soil in situ below a water table — Iowa Agricultural Experiment Station, Ames, Iowa, Soils Subsection. Project 998 — 1949.
10. Luthin J. N. — Drainage of Agricultural Lands. t. VII, Wisconsin, 1957.
11. Mroczkowski F. — Oznaczanie współczynnika filtracji w gruntach niezawodnionych aparatem ZWK oraz w gruntach zawodnionych metodą holenderską. Biul. 182; Z badań geologiczno-inżyn. w Polsce — t. II IG, 1963.
12. Rosłoński B. — Zbiornik wody w Pratkowicach nad Sanem pod Przemyślem. Prace PIG. Warszawa 1924.
13. Wieczysty A. — Obliczenie współczynnika wodoprzepuszczalności na podstawie wzniosu wody podziemnej w studniach dowolnej konstrukcji. Tech. Poszuk. 1965, nr 13.

SUMMARY

The article deals with the field method of measurements of vertical variation of permeability coefficient down to a depth of 15 m, on the basis of D. Kirkham's formula. The measurements have been made by means of bailing in small-diameter piezometers driven into the soil using vibrating hammer. The rate of inflow has been measured by means of a device constructed by the present author and by the other members of the team.

The article presents and discusses the results of the works, as compared with the results obtained during test pumping, and it gives methodical instructions as to the way of measurement and calculation. In addition to this the accuracy of the measurements is emphasized and economical aspects are given to accentuate the necessity of introducing the method considered.

РЕЗЮМЕ

В статье рассмотрен полевой метод определения вертикальных колебаний коэффициента фильтрации до глубины 15 м, основанный на формуле Д. Киркгама. Замеры производились способом откачки в пьезометрах малого диаметра, внедряемых в грунт с помощью вибромолота. Темпы притока измерялись прибором, сконструированным автором и коллективом.

В статье дается описание проведенных замеров и сопоставление данных с результатами опытной откачки. Предлагаются методические указания по способам проведения замеров и расчетов. В заключение отмечается точность замеров и эффективность предложенного метода, который заслуживает более широкого внедрения.