

**ANALIZA WPLYWU WARUNKÓW PRZEPROWADZANIA BADAŃ
WODOCHŁONNOŚCI SKAŁ LITYCH NA ICH WYNIKI DLA POTRZEB
INŻYNIERSKO-GEOLOGICZNYCH***

UKD 624.131.25:551.491.7

W ramach badań inżyniersko-geologicznych dla projektowania i posadawiania budowli hydrotechnicznych na skałach litych określa się wodoprzepuszczalność skał podłoża. Dane te uzyskuje się za pomocą szeroko stosowanych badań wodochłonności. Badania te wykonywane są w otworach wiertniczych i polegają na wtłaczaniu wody pod stałym ciśnieniem do określonej strefy otworu, pod którą rozumie się odsłoniętą w czasie badania część odwiertu. Na podstawie pomiarów ilości wprowadzonej wody w określonym czasie i przy stałym ciśnieniu w określonej strefie odwiertu oblicza się wodochłonność jednostkową wg wzoru:

$$\omega = \frac{W}{tS} = \frac{Q}{l \cdot s} \quad (l/\text{min} \cdot \text{m} \cdot \text{m}) \dots \quad [1]$$

gdzie: ω – wodochłonność jednostkowa, W – ilość wody wprowadzona do otworu podczas badania, mierzona w litrach; t – czas trwania badania, w min.;

Q – wydatek w l/min.; $Q = \frac{W}{T}$, l – długość badanej strefy, w m; S – wysokość ciśnienia w przeliczeniu na wysokość słupa wody w m, przy czym, jeżeli badanie prowadzi się metodą naciskową, wysokość ciśnienia oblicza się wg wzorów:

a) dla badania skał zawodnionych:

$$S_w = (10p + z) - \Delta h \dots \dots \quad [2]$$

b) dla badania skał niezawodnionych:

$$S_s = (10p + z^1 + 0,51) - \Delta h \dots \dots \quad [3]$$

gdzie: p – ciśnienie wytwarzane przez agregat pompowy, odczytane na manometrze, w at; z – różnica poziomów między położeniem manometru a statycznym zwierciadłem wody w m; z^1 – różnica poziomów między położeniem manometru i stropem badanej strefy w m; Δh – straty ciśnienia w przewodach tłoczonych w m słupa wody.

Uzyskaną w ten sposób wartość wodochłonności jednostkowej traktuje się często jako podstawowy wskaźnik wodoprzepuszczalności masywu skalnego. Z podanego wzoru (1) wynika, iż wodochłonność jednostkowa jest wielkością w pewnym stopniu zbliżoną do wydajności jednostkowej (uważanej za jedną z podstawowych charakterystyk ujęcia wód podziemnych) i jako taka jest wielkością ściśle powiązaną z własnościami filtracyjnymi ośrodka, a więc szczelinowato-

cią z jednej strony, a konstrukcją otworu i sposobem przeprowadzania badania z drugiej strony, przy czym związek ten będzie różny dla różnych typów filtracji. W celu przedstawienia tych zależności przeanalizowano kilka typowych w hydrogeologii wzorów, określających debit studni zależnie od wodoprzepuszczalności i konstrukcji studni oraz ogólnych warunków hydrogeologicznych. Wzory zestawiono dla wszystkich typów ruchów wody, a więc ruchu laminarnego, mieszanego i turbulentnego, uwzględniając przy tym w przypadku ruchu liniowego (laminarnego) obok filtracji ustalonej filtrację nieustaloną. W przypadku badania skał niezawodnionych wykorzystano wzory Wierigina (11) wprowadzone na podstawie równania iniekcji cieczy w środowisko porowate. Uwzględniono również kierunkowość własności filtracyjnych masywu, wyróżniając dwa podstawowe modele ośrodka szczelinowatego:

1. Model ośrodka izotropowego, charakteryzującego się bardzo gęstą i regularną siatką szczelin różnie zorientowanych w przestrzeni, rozchodzenie się wody ma tu charakter zbliżony do sferyczno-radialnego.

2. Model ośrodka skrajnie anizotropowego, charakteryzującego się występowaniem szczelin poziomych nie kontaktujących się ze sobą, rozchodzenie się wody ma charakter płasko-radialny.

Najważniejsze wzory na obliczanie współczynników filtracji (k) bądź fluacji (k_f) na podstawie badań wodochłonności dla różnego reżimu hydrodynamicznego, których analizy dokonali autorzy zostały zestawione w tabeli. Wzory te, przekształcono do możliwie najprostszej formy, ujmującej zależność między współczynnikami filtracji (k), fluacji (k_f) a wodochłonnością jednostkową (ω). Przekształcenie to oparto na wzorze (1), przy czym w celu uproszczenia przeliczeń zastosowano mnożnik 1,44 pozwalający na sprowadzenie jednostek do ogólnie przyjętych dla poszczególnych wielkości. Uzyskane w ten sposób nowe formy wzorów przedstawione są w kolumnie 5 tabeli.

Z analizy tych wzorów wynika, iż związek między współczynnikami filtracji bądź fluacji a wodochłonnością jednostkową jest znacznie bardziej skomplikowany, niż to wynika z ogólnie przyjętej i stosowanej w praktyce przybliżonej relacji między tymi wielkościami (9):

$$k \approx (1,5 \div 2) \omega \dots \dots \quad [4]$$

przy czym k w m/dobę, a ω w l/min \cdot m \cdot m.

Już z pobieżnej analizy zestawionych wzorów (tab.) wynika istnienie ścisłej zależności wodochłonności

* Skróc referatu wygłoszonego na otwartym zebraniu naukowym Katedry Geologii Inżynierskiej Uniwersytetu Warszawskiego w dniu 23.X.1964 r.

ZESTAWIENIE WAŻNIEJSZYCH WZORÓW NA OBLICZANIE WSPÓŁCZYNNIKA FILTRACJI NA PODSTAWIE
 BADAŃ WODOCHŁONNOŚCI PRZY RÓŻNYM REŻIMIE HYDRODYNAMICZNYM

Warunki przepr. badania	Typ filtracji	Forma wyjściowa wzoru	nr wzoru	Forma wzoru wg autorów	nr wzoru	Warunki stosowalności	
1	2	3	4	5	6	7	
Badanie prowadzone w skałach zawodnionych	Filtracja liniowa ustalona	I. Dupuit: $k = 0,366 \frac{Q}{MS} \lg \frac{R}{r}$	4	$k = 0,527 \omega \lg \frac{R}{r}$	4a	Model skrajnie anizotropowy lub badana cała warstwa	
		W. D. Babuszkin: $k = 0,366 \frac{Q}{IS} \lg \frac{0,66 l}{r}$	5	$k = 0,527 \omega \lg \frac{0,66 l}{r}$	5a	Badana strefa znajduje się w środkowych partiach masywu	
		N. N. Wierigin: $k = 0,366 \frac{Q}{IS} \lg \frac{1,47 l}{\zeta r}$	6	$k = 0,527 \omega \lg \frac{1,47 l}{\zeta r}$	6a	Położenie badanej strefy w stosunku do stropu i spągu warstwy obojętne	
		N. N. Wierigin: $k = 0,183 \frac{Q_1 Q_2}{(Q_1 - Q_2) IS} \lg \frac{t_2}{t_1}$	7	$k = 0,264 \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega_1 - \omega_2} \lg \frac{t_2}{t_1}$	7a	$\left \frac{M}{3} \right $	
	Filtracja nieliniowa ustalona	O. Smreker: $k_M = \frac{Q}{2\pi M} \left[(n-1) S r^{n-1} \right]^{-\frac{1}{n}}$ dla $n = 1 \div 2$	8	$k_M = 0,364 \omega \sqrt[3]{\frac{S}{r}}$ dla $n = \frac{3}{2}$	8a	Model skrajnie anizotropowy lub badana cała warstwa	
		T. Macioszczyk: $k_M = 0,131 \frac{Q}{\sqrt{S^2 l^2 r^2}}$	9	$k_M = 0,189 \omega \sqrt[3]{\frac{Sl}{r^2}}$	9a	Model izotropowy $8 < \frac{l}{r} < 400$	
		A. A. Krasnopolski: $k_r = 0,159 \frac{Q}{M \sqrt{rS}}$	10	$k_r = 0,229 \omega \sqrt{\frac{S}{r}}$	10a	Model skrajnie anizotropowy lub badana cała warstwa	
		T. Macioszczyk: $k_r = \frac{Q}{2\pi r \sqrt{3 Sl}}$	11	$k_r = 0,132 \frac{\omega}{r} \sqrt{Sl}$	11a	Model izotropowy $r \leq l$	
		Filtracja liniowa nieustalona	N. N. Wierigin: $k = 0,366 \frac{Q_1}{MS} \lg \frac{r_p}{r}$	12	$k = 0,527 \omega l \lg \frac{r_p}{r}$	12a	Model skrajnie anizotropowy lub badana cała warstwa
			N. N. Wierigin: $k = 0,366 \frac{Q_1}{IS} \lg \frac{1 + \frac{l}{\zeta r}}{1 + \frac{l}{\zeta r_p}}$	13	$k = 0,527 \omega l \lg \frac{1 + \frac{l}{\zeta r}}{1 + \frac{l}{\zeta r_p}}$	13a	Model izotropowy, położenie badanej strefy obojętne
							Istnieje otwór obserw.

OBJAŚNIENIA SYMBOLI

k – współczynnik filtracji liniowej (wsp. filtracji), w m/dobę,
 k_M – współczynnik filtracji mieszanej, w m/dobę,
 k_r – współczynnik filtracji turbulენტnej (wsp. fluacji), w m/dobę,
 Q – ustalony wydatek przy stałym ciśnieniu, w m³/dobę,
 Q_1 – wydatek (przy stałym ciśnieniu) w momencie pojawienia się wody w otworze obserwacyjnym, w m³/dobę,
 Q_2 – wydatki (przy stałym ciśnieniu) po upływie czasu t_1 i t_2 od początku badania, w m³/dobę,
 ω – ustalona wartość wodochłonności jednostkowej, w l/min \times m \times m,
 ω_1 – wodochłonność jednostkowa w chwili pojawienia się wody w otworze obserwacyjnym, w l/min \times m \times m,

ω_1, ω_2 – wodochłonność jednostkowa po upływie czasu t_1 i t_2 , w l/min \times m \times m,

l – długość badanej strefy, w m,

r – promień odwiertu, w m,

r_p – odległość otworu obserwacyjnego od centralnego, w m,

R – zasięg „stożka ciśnienia”, w m,

S – wysokość ciśnienia, w m słupa wody,

M – miąższość warstwy przepuszczalnej, w przypadku masywu skrajnie anizotropowego do obliczeń można przyjmować $M = 1$, w m,

ξ – współczynnik niepełności odwiertu; wg N. N. Wierigina $\xi = 1$, gdy badana strefa przylega do stropu bądź spągu warstwy przepuszczalnej i $\xi = 2$, gdy strefa zlokalizowana jest w środku warstwy.

jednostkowej od średnicy odwiertu ($2r$), szczególnie przy filtracji nieliniowej (turbulentnej i mieszanej), oraz długości badanej strefy (l) i wysokości ciśnienia (dla filtracji nieliniowej). Stąd też wynika konieczność przeprowadzenia szczegółowej analizy matematycznej wpływu poszczególnych czynników oraz warunków przeprowadzania badania na uzyskiwane wartości wodochłonności jednostkowej.

Analizę przeprowadzono w sposób następujący. Przyjęto jako wartość porównawczą ω_0 , odpowiadającą wodochłonności jednostkowej uzyskanej dla otworu o średnicy $2r=100$ mm i długości badanej strefy $l=5$ m. Wówczas stosowane w czasie badania ciśnienie wynosiło 5 at ($s=50$ m). Następnie przeanalizowano wpływ zmiany jednego z parametrów (przy założeniu stałości pozostałych) na wartość wodochłonności jednostkowej. Autorzy przyjęli, że ilustracją tego wpływu jest współczynnik równy:

$$\beta = \frac{\omega_0}{\omega_n} \dots \dots \dots [5]$$

gdzie ω_n – wodochłonność jednostkowa uzyskana dla wyników badań przy zmiennych parametrach technicznych.

Zależnie od zmienności analizowanego parametru wyznaczano wpływ jego na wartość wodochłonności jednostkowej, przyjmując następujące współczynniki β :

$\beta(r)$ – wyrażający wpływ zmiany średnicy odwiertu,

$\beta(l)$ – wyrażający wpływ zmiany długości badanej strefy,

$\beta(s)$ – wyrażający wpływ zmiany wysokości ciśnienia stosowanego podczas badania.

Przeprowadzoną w powyższy sposób analizę oparto na wzorach (5a, 8a, 10a, 11a i 13a podanych w tabeli 1), uwzględniając przy tym wyróżnione poprzednio modele ośrodka skalnego oraz podstawowe typy reżimu hydrodynamicznego. Analizę wyników przedstawiono graficznie w postaci wykresów, przy czym ryc. 1 obrazuje wpływ zmiany średnicy odwiertu, ryc. 2 zmiany długości badanej strefy, a ryc. 3 zmiany wysokości ciśnienia stosowanego w czasie badania.

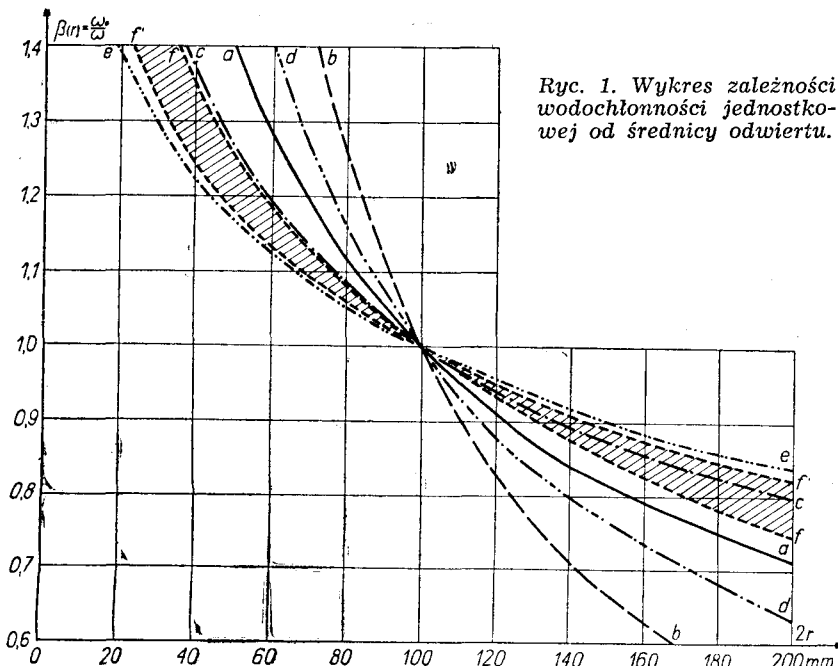
Z dokonanej analizy matematycznej (przedstawionej na wykresach) wynika, że:

1. Średnica odwiertu wykazuje znaczny wpływ na wartość wodochłonności jednostkowej, szczególnie w przypadku ruchu turbulentnego i mieszanego (krzywe: a, b, c i d na ryc. 1), gdzie w przedziale średnic $2r=60 \div 200$ mm rozbieżności w stosunku do wodochłonności jednostkowej dla otworu o średnicy $2r=100$ mm sięgają 50% i więcej, zaś w przedziale średnic $2r=80 \div 140$ mm do 25 ÷ 28%. W przypadku

ruchu laminarnego rozbieżności te są mniejsze i dla przedziału średnic $2r=60 \div 200$ mm maksymalnie sięgają 20 ÷ 25% – przy wtlaczaniu wody w skały suche (przy czym odległość otworu obserwacyjnego od centralnego jest stosunkowo mało istotna) i 16% przy badaniu skał zawodnionych. Ograniczając przedział stosowanych średnic do wartości $2r=80 \div 120$ mm, przy jednoczesnym założeniu, że wystąpić może jedynie ruch mieszany bądź laminarny, uzyska się zmniejszenie rozbieżności do ok. 15%.

2. Długość badanej strefy posiada tylko znaczenie w przypadku modelu izotropowego. I tak szczególnie silny wpływ obserwuje się dla ruchu turbulentnego (krzywa a na ryc. 2), natomiast przy ruchu mieszanym (krzywa b) wpływ ten wyraźnie maleje, zbliżając się do wartości charakterystycznych dla ruchu laminarnego. Podobnie jak przy wpływie średnicy, tak i tu stosując długości strefy rzędu 1 m i mniejsze uzyskuje się zawyżenie wartości wodochłonności sięgające czasem 40% i więcej. Przyjęcie długości badanej strefy zbliżonych do 5 m, szczególnie w przypadku stwierdzenia izotropii masywu, pozwoli na uzyskanie wyników najbardziej zbliżonych do rzeczywistych. Jeżeli warunki geologiczne wymagają prowadzenia badania w strefach o mniejszej miąższości, to celowe byłoby także prowadzenie badania w 5 strefie obejmującej kilka wydzielonych podstref.

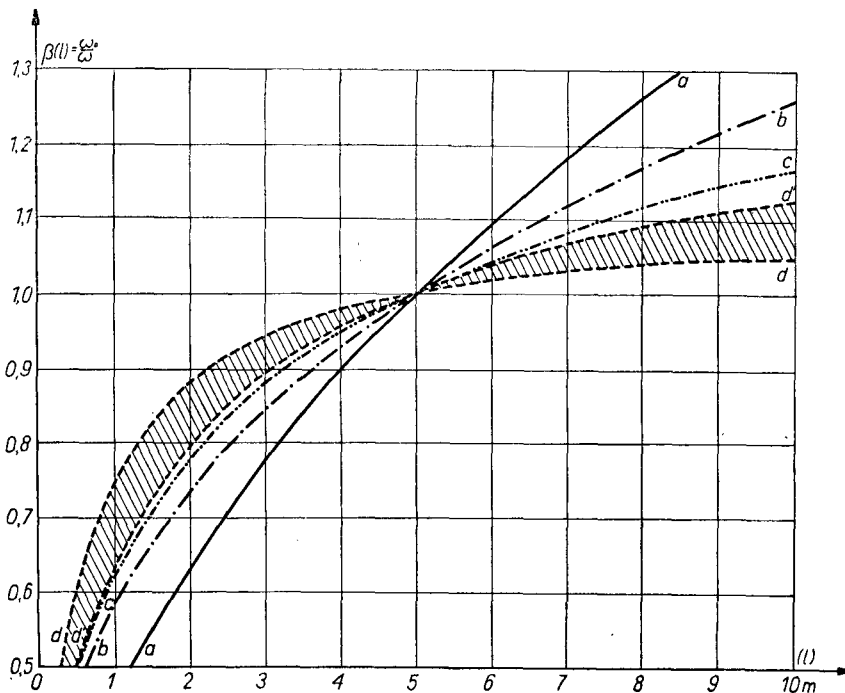
3. Wysokości ciśnienia stosowane podczas badania mają bardzo wyraźny wpływ na wartość wodochłonności jednostkowej, szczególnie przy filtracji nieliniowej (krzywa a i b na ryc. 3). I tak np. przy dwukrotnym zwiększeniu ciśnienia różnice w otrzymywanych wartościach wodochłonności jednostkowej sięgają mogą – przy ruchu turbulentnym (krzywa a) około 40% i 25% w przypadku ruchu mieszanego (krzywa b). Przy ruchu laminarnym wysokość ciśnienia nie odgrywa roli (prosta c). Ze względu na możliwość wystąpienia ruchu mieszanego wydaje się celowe przynajmniej częściowo uporządkowanie tego zagadnienia, gdyż całkowita normalizacja wysokości ciśnienia jest niemożliwa, z powodu różnorodności warunków geologicznych, w jakich prowadzi się badanie, jak również zróżnicowania wysokości ciśnień stosowanych w czasie badania. Tak więc w celu uzyskania porównywalnych ze sobą wyników badań wodochłonności proponuje się częściowe ujednoczenie wysokości ciśnień, stosowanych przynajmniej w obrębie konkretnego rejonu budowli hydrotechnicznej. Ujednoczenie to można osiągnąć np. przez wydzielenie 2 do 3 grup stref w badanych otworach bądź nawet całe poszczególne



Ryc. 1. Wykres zależności wodochłonności jednostkowej od średnicy odwiertu.

- a – ośrodek skrajnie anizotropowy: $\beta(r) = \left(\frac{r_0}{r}\right)^{1/2}$ } ruch turbulentny
 - b – ośrodek izotropowy: $\beta(r) = \frac{r_0}{r}$ } badanie prowadzone w skałach zawodnionych
 - c – ośrodek skrajnie anizotropowy: $\beta(r) = \left(\frac{r_0}{r}\right)^{1/2}$ } ruch mieszany
 - d – ośrodek izotropowy: $\beta(r) = \left(\frac{r_0}{r}\right)^{2/3}$ }
 - e – ośrodek izotropowy – ruch laminarny: $\beta(r) = \frac{\lg 0,661 - \lg r}{\lg 0,661 - \lg r_0}$ }
 - f, f' – ośrodek izotropowy – ruch laminarny: $\beta(r) = \frac{\lg\left(1 + \frac{l}{\xi r}\right) - \lg\left(1 + \frac{l}{\xi r_p}\right)}{\lg\left(1 + \frac{l}{\xi r_0}\right) - \lg\left(1 + \frac{l}{\xi r_p}\right)}$ } badanie prowadzone w skałach niezawodnionych
- odległość otworu obserwacyjnego od centralnego wynosi: f) $r_p=1,0$ m f') $r_p=10,0$ m

Ryc. 2. Wykres zależności wodochłonności jednostkowej od długości badanej strefy przy różnym reżimie filtracji (dla masywu izotropowego).



Badania prowadzone w skałach zawodnionych: a) ruch turbulentny: $\beta(l) = \left(\frac{l}{l_0}\right)^{1/2}$,

b) ruch mieszany: $\beta(l) = \left(\frac{l}{l_0}\right)^{1/3}$, c) ruch laminarny: $\beta(l) = \frac{\lg 0,66 l - \lg r}{\lg 0,66 l_0 - \lg r}$.

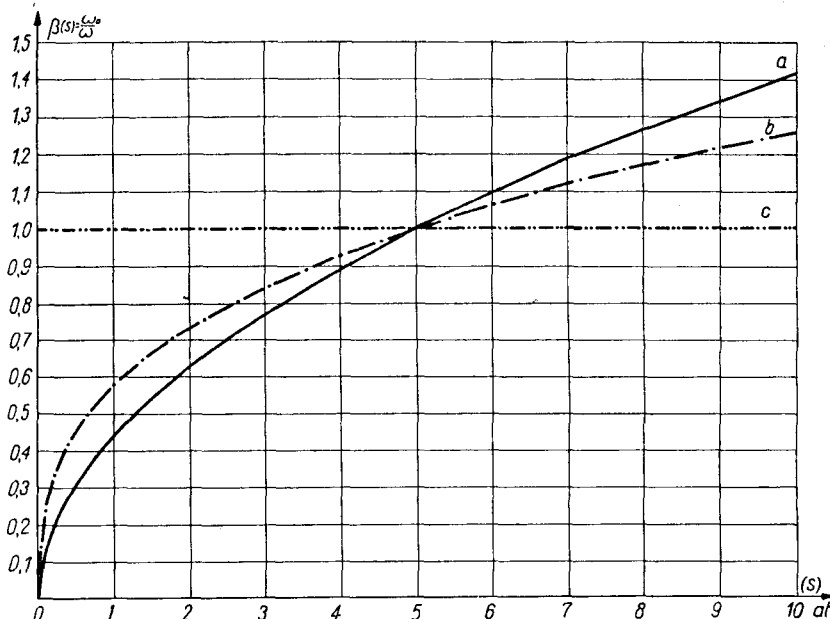
Badania prowadzone w skałach niezawdnlonych: d, d') ruch laminarny: $\beta(l) = \frac{\lg\left(1 + \frac{l}{\xi r}\right) - \lg\left(1 + \frac{l}{\xi r_p}\right)}{\lg\left(1 + \frac{l_0}{\xi r}\right) - \lg\left(1 + \frac{l_0}{\xi r_p}\right)}$ odległość otworu obserwacyjnego od centralnego wynosi: d) $r_p = 1,0$ m, d') $r = 10,0$ m. l — długość badanej strefy.

otwory o jednakowym schemacie badania, przy czym jedna określona wysokość ciśnienia występowałaby w każdej z tych grup.

Stosowanie podanych w punktach 1–3 zasad jest słuszne przy uwzględnieniu zjawiska wymywania szczelin w czasie trwania badania wodochłonności skał. Zjawisko to w praktyce przejawia się jako stały wzrost wodochłonności w miarę zwiększania ciśnienia, zniekształcając wyniki.

Uniknięcie zniekształceń wyników możliwe jest do osiągnięcia w dwojaki sposób przez: 1) wprowadzenie tzw. „właczkań wstępnych” prowadzonych przy stopniowo zwiększanych (aż do maksymalnych) ciśnieniach, co miałyby na celu przygotowanie odwiertu do badania podstawowego; 2) stosowanie dwuetapowego badania polegającego na tym, iż po osiągnięciu maksymalnego ciśnienia prowadzi się dalsze obserwacje przy ciśnieniach malejących. Uzyskuje się wówczas dwie krzywe zależności wydatku od ciśnienia, co znacznie ułatwia interpretację wyników. Dodać należy, że sposób ten bywa już niekiedy stosowany także i w Polsce.

Ryc. 3. Wykres zależności wodochłonności jednostkowej od wysokości ciśnienia przy różnym reżimie filtracji.



a) ruch turbulentny: $\beta(s) = \left(\frac{s}{s_0}\right)^{1/2}$,

b) ruch mieszany: $\beta(s) = \left(\frac{s}{s_0}\right)^{1/3}$,

c) ruch laminarny: $\beta(s) = 1$,
(s) wysokość ciśnienia.

Na obszarach, gdzie w przyszłości należy się spodziewać wystąpienia znacznych spadków hydraulicznych (głównie partie przyczółkowe) oraz gdzie nie można stosować wysokich ciśnień sugeruje się przedłużenie czasu badania poszczególnych stref do uzyskania pełnej stabilizacji wyników. Dotyczy to przede wszystkim badania w skałach suchych ze względu na czas rozmakania materiału wypełniającego szczeliny.

LITERATURA

1. Bogomołow G. W., Silin-Bekczurin A. J. — Specjalnaja gidrogeologija. Moskwa 1955.
2. Denisow N. J. — Inżeniernaja geologija i gidrogeologija. Moskwa 1957.
3. Griszin M. M. — Gidrotiechničeskie sooruzienija. cz. I, Moskwa 1954.
4. Jähde H. — Injektionen zur Verbesserung von Baugrund und Bauwerk. Berlin 1953.

5. Lugeon M. — Barrages et géologie. Lausanne 1933.
6. Łykoszin A. G. — Inżynieryjno-geologiczne warunki usłowania stroitelstwa plotin na karbonatnych porodach. Sb. Geologija i plot'ny. T. III, Moskwa — Leningrad 1963.
7. Macioszczyk T. — Dopływ do ujęć hydrogeologicznych w warunkach filtracji mieszanej i turbulentnej. Biul. Geol. Wydz. Geol. UW, t. IV, Warszawa 1964.
8. Mikucki Z. — Badania szczelności podłoża zapór wodnych. Mat. Konf. Nauk.-Techn. w Solinie. Solina 1964.
9. Siemienow M. P. — Inżynieryjno-geologiczeskije predposylki projektirowanija cementacjonnych zawies. Sb. Protiwofiltracjonnyje zawiesy plotin, Moskwa 1963.
10. Sprawozchnik gidrogeologa. Moskwa 1962.
11. Wierigin N. N. — Metody opriedielenija filtracjonnych swojstw gornych porod. Moskwa 1962.
12. Zaruba Q. — Wasserdurchlässigkeitsprüfungen und Probeinjektionen für den Talsperrenbau. Z. f. ang. Geol. 1962, B. 8, h. 2.

РЕЗЮМЕ

In the present paper the authors analyse the calculation formulae of filtration coefficient under various hydrodynamical conditions and tie this value to that of unit water absorbabilities, as shown in Tab. I. In addition, they make a detailed mathematical analysis of the influence of individual parameter change upon the obtained value of unit water absorbability. It results of this analysis that to secure the comparability of the results it is necessary to unify the construction of bore hole (the authors propose a restriction of bore hole diameters up to 80–120 mm and a limitation of the length of the zone investigated up to 5 m) and to unify, partly at least, the height of pressures applied during the water absorbability of fissured hard rocks.

SUMMARY

Авторы анализируют формулы определения коэффициента фильтрации при различном гидродинамическом режиме и связывают эту величину с удельной водопоглощаемостью, что представлено в табл. I. В дальнейшей части работы проводится детальный математический анализ влияния, какое оказывает изменение отдельных параметров на определяемую величину удельного водопоглощения. Как показывает этот анализ, для достижения сопоставимости результатов определения необходима унификация конструкции скважин (авторы предлагают вступительно ограничить предел диаметра скважин величиной 80 — 120 мм и длину исследуемой зоны до 5 м) и по крайней мере частичная унификация величин давления, применяемого во время исследований водопоглощаемости трещиноватых плотных пород.