

OKREŚLANIE HORYZONTALNEJ ANIZOTROPII WARUNKÓW FILTRACJI W UTWORACH SZCELINOWYCH NA PODSTAWIE ANALIZY NIEUSTALONEGO DOPŁYWU DO STUDZIEN

UKD 556.332.44:551.252:552.542:556.343.24:763.33 (438-11)

Anizotropia strukturalna warunków filtracji w utworach węglanowych senonu wschodniej Polski była przedmiotem badań prowadzonych w Instytucie Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej Uniwersytetu Warszawskiego w latach 1972—76. Badania terenowe poświęcone temu zagadnieniu wykonywano dwoma metodami.

Pierwsza była oparta na szczegółowych pomiarach szczelinowości, m. in. w dwu dużych czynnych kamieniołomach eksploatujących margle, opoki i kredę piszącą do produkcji cementu. Stwierdzono powszechne występowanie jednego systemu ciosu ortogonalnego — o kierunkach NW-SE do WNW-ESE oraz NE-SW do NNE i SSW — i niemal pionowych upadach. Zespół o kierunku zbliżonym do przebiegu dyslokacji tnącej utwory mezozoiczne, a często także i do uskoku w podłożu paleozoicznym, jest z reguły lepiej wykształcony, co wyraża się wyższą gęstością i rozwartością spękań od zespołu komplementarnego. Zjawisko to jest przyczyną anizotropii strukturalnej filtracji horyzontalnej, która może być określana ilościowo na podstawie średnich wartości w poszczególnych zespołach ciosu takich parametrów szczelinowości, jak szczelinowość powierzchniowa n_{ji} i rozwartość rzeczywista szczelin b_i (5).

W drugiej metodzie zastosowano analizę wyników pomiarów dopływu nieustalonego w węzle hydrogeologicznym, składającym się z pompowanej studni badawczej i kilku studzien obserwacyjnych. Jej opis oraz wyniki przeprowadzanych badań zamieszczono w niniejszej pracy. Do analizy tej zastosowano metodę obliczeń filtracji nieustalonej w nieskończonej, jednorodnie anizotropowej warstwie wodonośnej o zwierciadle napiętym (8). Dyskusja wyników pomiarów badawczych pozwoliła określić optymalną geometrię węzła hydrogeologicznego oraz najodpowiedniejsze wydajności badanych studzien i związane z nimi depresje, redukujące do minimum błędy wynikające ze stosowania metody Papadopoulosa do obli-

czeń filtracji w warstwie o zwierciadle swobodnym, ujętej studniami niezupełnymi. Jednocześnie stwierdzono, że analiza dopływu nieustalonego w utworach szczelinowych powinna być prowadzona jedynie metodami uwzględniającymi anizotropię horyzontalną warunków filtracji.

OPIS ZASTOSOWANEJ METODY

W warstwach anizotropowych wektor prędkości filtracji \vec{v}_f i wektor spadku hydraulicznego $\text{grad } \Phi$ ogólnie nie są równoległe. W quasi-jednorodnym dwuwymiarowo anizotropowym ośrodku szczelinowym równanie liniowej filtracji Darcy'ego przybiera postać:

$$\vec{v}_f = \frac{1}{12\eta} \left[\sum_{j=1}^k \bar{b}_j \bar{\Gamma}_j \cos \alpha_j \vec{n}_j \right] \text{grad } \Phi = - \frac{\bar{K}_{ps}}{\eta} \text{grad } \Phi \quad [1]$$

gdzie: η — lepkość dynamiczna wody,

\bar{b}_j — średnie rozwarście spękań w j zespole,

$\bar{\Gamma}_j$ — średnia gęstość rzeczywista w j zespole,

α_j — kąt pomiędzy jednostkowym wektorem prędkości \vec{n}_j w kierunku biegu danego zespołu spękań j , a jednostkowym wektorem \vec{B} w kierunku spadku potencjału $\text{grad } \Phi$;

natomiast stała proporcjonalności K_p , z klasycznej postaci prawa Darcy'ego

$$v_f = \frac{K_p}{\eta} \frac{\Delta p}{L} \quad [2]$$

staje się symetrycznym tensorem pierwszego rzędu \bar{K}_{ps} , zwanym tensorem przepuszczalności szczelino-wej.

W wypadku płasko-radialnego dopływu do otworu studziennego w warunkach filtracji liniowej tensor przepuszczalności przybiera postać ogólną:

$$\bar{K}_{ps} = \begin{vmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{vmatrix} \quad [3]$$

gdzie x i y są dowolnie zorientowanymi osiami układu współrzędnych prostokątnych. Jeżeli osie współrzędnych pokrywają się z głównymi osiami $\xi\eta$ tensora przepuszczalności, wzór [3] przybiera postać

$$\bar{K}_{ps} = \begin{vmatrix} K_{\xi\xi} & 0 \\ 0 & K_{\eta\eta} \end{vmatrix} \quad [4]$$

W obliczeniach filtracji nieustalanej celowe jest stosowanie tensora przewodnictwa T , który jest iloczynem tensora przepuszczalności \bar{K}_{ps} , miąższości m warstwy wodonośnej i stosunku $\frac{\eta}{\gamma}$:

$$\bar{T} = \begin{vmatrix} T_{xx} & T_{xy} \\ T_{yx} & T_{yy} \end{vmatrix}, \text{ o wartości } T = \sqrt{T_{xx}T_{yy} - T_{xy}^2}, \quad [5]$$

$$\bar{T} = \begin{vmatrix} T_{\xi\xi} & 0 \\ 0 & T_{\eta\eta} \end{vmatrix}, \text{ o wartości } T = \sqrt{T_{\xi\xi}T_{\eta\eta}}. \quad [6]$$

Równanie [5] jest słuszne dla dowolnie przyjętego układu współrzędnych prostokątnych x, y , a [6] — dla wypadku gdy osie współrzędnych pokrywają się z głównymi osiami $\xi\eta$ tensora przewodnictwa T .

Równanie depresji wytworzonej przez studnię zupełną o stałej wydajności, ujmującą naporową warstwę wodonośną o nieskończonym poziomym rozprzestrzenieniu, ograniczoną od stropu i spągu poziomymi granicami nieprzepuszczalnymi, zbudowaną z jednorodnie anizotropowych — po osiach xy — utworów wodonośnych, oraz przy założeniu, że

$$T_{xx} \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + 2T_{xy} \frac{\partial^2 s}{\partial x \partial y} + T_{yy} \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} + Q\delta(x)\delta(y) = \beta \frac{\partial s}{\partial t} \quad [7a]$$

$$s(x, y, 0) = 0 \quad [7b]$$

$$s(\pm\infty, y, t) = 0 \quad [7c]$$

$$s(x, \pm\infty, t) = 0, \quad [7d]$$

ma postać:

$$s = \frac{Q}{4\pi\sqrt{T_{xx}T_{yy} - T_{xy}^2}} W(u_{xy}), \quad [8]$$

(J. S. Papadopoulos, 8)

gdzie:

$$u_{xy} = \frac{\beta}{4t} \left(\frac{T_{xx}y^2 + T_{yy}x^2 - 2T_{xy}xy}{T_{xx}T_{yy} - T_{xy}^2} \right), \quad [9]$$

$$W(u) = -0,5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \dots \quad [10]$$

(Ch. V. Theis, 9)

W wypadku gdy osie układu współrzędnych pokrywają się z głównymi osiami przewodnictwa $\xi\eta$, równania [8] i [9] przyjmują postać:

$$s = \frac{Q}{4\pi\sqrt{T_{\xi\xi}T_{\eta\eta}}} W(u_{\xi\eta}) \quad (J. S. Papadopoulos, 8)$$

[11]

$$u_{\xi\eta} = \frac{\beta}{4t} \left(\frac{T_{\xi\xi}\eta^2 + T_{\eta\eta}\xi^2}{T_{\xi\xi}T_{\eta\eta}} \right) \quad [12]$$

Dla małych wartości argumentu u (wg Papadopoulosa $u < 0,02$) funkcja charakterystyczna $W(u)$ może być przybliżona do postaci logarytmicznej

$$W(u) = 2,303 \lg_{10} \frac{2,25}{4u} \quad [13]$$

co po podstawieniu do wzorów [8] i [11] daje:

$$s = \frac{2,303 Q}{4\pi\sqrt{T_{xx}T_{yy} - T_{xy}^2}} \lg \times \left[\frac{2,25t}{\beta} \left(\frac{T_{xx}T_{yy} - T_{xy}^2}{T_{xx}y^2 + T_{yy}x^2 - 2T_{xy}xy} \right) \right] \quad [14]$$

(J. S. Papadopoulos, 8)

dla dowolnego układu współrzędnych prostokątnych, oraz

$$s = \frac{2,303 Q}{4\pi\sqrt{T_{\xi\xi}T_{\eta\eta}}} \lg \left[\frac{2,25t}{\beta} \left(\frac{T_{\xi\xi}T_{\eta\eta}}{T_{\xi\xi}\eta^2 + T_{\eta\eta}\xi^2} \right) \right] \quad [15]$$

(J. S. Papadopoulos, 8)

dla układu współrzędnych prostokątnych zgodnych z kierunkami głównymi osi przewodnictwa (największego T_{MAX} oś ξ i najmniejszego T_{MIN} oś η).

Rozkład przestrzenny depresji w świetle powyższych równań jest taki, że izolinie obniżenia dla danego czasu t są elipsami o stosunku osi wielkiej do małej, równym A'

$$A' = \sqrt{\frac{T_{\xi\xi}}{T_{\eta\eta}}}, \quad [16]$$

i przebiegu tych osi zgodnym z kierunkami osi $\xi\eta$ głównego przewodnictwa $T_{\xi\xi}$ i $T_{\eta\eta}$.

Wyznaczenie wartości trzech składowych tensora przewodnictwa T_{xx} , T_{yy} i T_{xy} oraz współczynnika zasobności sprężystej β możliwe jest przy obserwacji w minimum trzech otworach obserwacyjnych (co daje układ trzech równań z trzema niewiadomymi w postaci iloczynów: βT_{xx} , βT_{yy} , βT_{xy}). J. S. Papadopoulos (8) podaje dwie metody obliczenia tensora przewodnictwa:

— dla pompowania krótkotrwałego, przez porównanie geometryczne krzywych $\lg s_t = f(\lg t)$ z krzywą Theisa $\lg[W(u)] = f(\lg u)$ (przy zachowaniu równoległości odpowiednich osi) w celu znalezienia podwójnych współrzędnych punktu P na odcinku najlepszej zgodności (s_{Pt} , t_{Pt} , $W(u)_{Pt}$, u_{Pt}), spełniających równanie [8] dla każdego z t piezometrów,

— dla pompowania długotrwałego, w którym argument $u \leq 0,02$, dającego po pewnym czasie wykres

DANE POCZĄTKOWE DO OBLICZEŃ FILTRACJI NIEUSTALONEJ W ANIZOTROPOWEJ WARSTWIE NAPOROWEJ (wzór tabeli)

Symbol punktu obserwacji i	Współrzędne punktu obserwacji w obliczeniowym układzie XY (m)		Azymut osi x (o)	wydajność studni Q (m^3/h)	Wyniki próbnego pompowania i obserwacji depresji							
					Parametry krzywych opadania zwierciadła wody				parametry krzywej			
	pompowanie krótkotrwałe ($u_j > 0,02$), wykres $lg s_i = f(lg t)$				pompowanie długotrwałe ($u \leq 0,02$), wykres $s_i = f(lg t)$		współrzędne punktu P na odcinku zgodności					
	$W(u)_{Pi}$	u_{Pi}			s_{Pi} (m)	t_{Pi} (h)	t_{oi} (h)	C_i (m)	\bar{C} (m)			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
			α_x	Q								

Tabela II

SCHEMAT OBLICZENIA PARAMETRÓW FILTRACJI NIEUSTALONEJ W NAPOROWEJ WARSTWIE ANIZOTROPOWEJ

Nr kolejny obliczenia	Metoda obliczeń					
	Analiza wykresu krzywej $lg s_i = f(lg t)$ — pompowanie krótkotrwałe			Analiza wykresu krzywej $s_i = f(lg t)$ — pompowanie długotrwałe		
	Wykorzystany wzór lub jego przekształcenie	wynik	uwagi	wykorzystany wzór lub jego przekształcenie	wynik	uwagi
1	2	3	4	5	6	7
1	$[5] \sqrt{T_{xx}T_{yy} - T_{xy}^2} = T$ $[8] T_i = \frac{Q}{4\pi s_{Pi}} W(u)_{Pi}$ $T = \frac{1}{3} \sum T_i$	T	wartość skalar-na tensora przewodnictwa	$[5] \sqrt{T_{xx}T_{yy} - T_{xy}^2} = T$ $[14] T = \frac{2,303 Q}{4\pi \bar{C}}$	T	wartość skalar-na tensora przewodnictwa
2	$T^2 u_{Pi}^4 t_{Pi} = \beta T_{xx} y_i^2 + \beta T_{yy} x_i^2 - 2\beta T_{xy} x_i y_i$ <p>([9], $i = 1, 2, 3$)</p>	$\beta T_{xx} = M$ $\beta T_{yy} = N$ $\beta T_{xy} = R$	układ trzech równań z trzema niewiadomymi: M, N, R	$([14], \text{gd}y s=0, i=1, 2, 3)$ $T^2 \cdot t_{oi} \cdot 2,25 = \beta T_{xx} y_i^2 + \beta T_{yy} x_i^2 - 2\beta T_{xy} x_i y_i$	$\beta T_{xx} = M$ $\beta T_{yy} = N$ $\beta T_{xy} = R$	układ trzech równań z trzema niewiadomymi: M, N, R
Obliczenia wspólne dla obydwu metod						
wykorzystany wzór lub jego przekształcenie		wynik	uwagi			
3	$\beta = \sqrt{\frac{MN - R^2}{T^2}}$	β	współczynnik zasobności sprężystej			
4	$T_{xx} = \frac{M}{\beta}; T_{yy} = \frac{N}{\beta}; T_{xy} = \frac{R}{\beta}$	T_{xx}, T_{yy}, T_{xy}	składowe tensora przewodnictwa w obliczeniowym układzie współrzędnych x, y			
5	$T_{\xi\xi} = T_{MAX} = 0,5 [(T_{xx} + T_{yy}) + \sqrt{(T_{xx} - T_{yy})^2 + 4T_{xy}^2}]$ $T_{\eta\eta} = T_{MIN} = 0,5 [(T_{xx} + T_{yy}) - \sqrt{(T_{xx} - T_{yy})^2 + 4T_{xy}^2}]$	T_{MAX}, T_{MIN}	wartości głównych składowych tensora przewodnictwa (po osiach ξ, η)			
6	$\Theta = \arctg \frac{T_{MAX} - T_{xx}}{T_{xy}}$	Θ	kąt pomiędzy osiami x i ξ , mierzony odwrotnie do kierunku ruchu wskazówek zegara			

$s_i = f(lg t)$ w postaci linii prostej i pozwalającego zastosować aproksymację logarytmiczną (wzór [14]) po określeniu parametrów krzywej opadania zwierciadła wody w i piezometrze (t_{oi} — czas opóźnienia, C_i — spadek nachylenia).

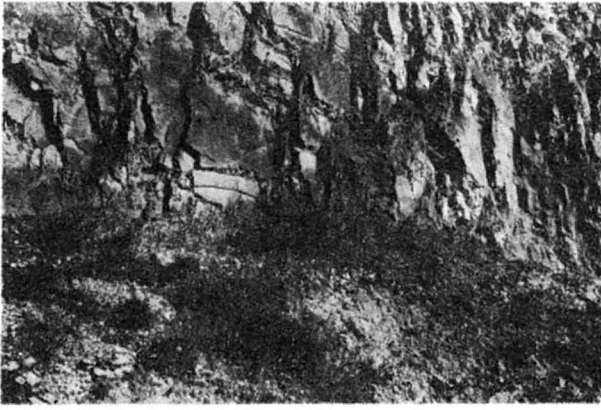
Kolejność i sposób prowadzenia obliczeń podają tab. I i II.

ZASTOSOWANIE METODY PAPAPOPOULOSA DO OBLICZANIA FILTRACJI NIEUSTALONEJ W ANALIZOWANYCH WARUNKACH

Jak już poprzednio wspomniano, opisana metoda została wyprowadzona przez Papadopoulosa (8) dla

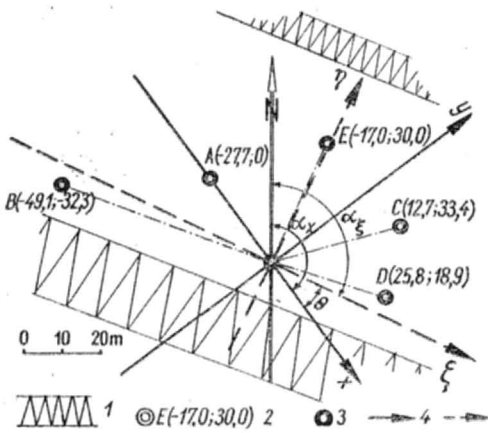
warstwy wodonośnej o zwierciadle napiętym ujętej studnią zupełną. Natomiast przedmiotem zainteresowania autorów niniejszej pracy było określenie przydatności tej metody do obliczeń filtracji nieustalanej w warstwie wodonośnej o zwierciadle swobodnym, zbudowanej ze spękanych margli, kredy piaszczącej i opok senonu wschodniej Lubelszczyzny, ujętej przez studnię niezupełną. Odmienność zjawiska filtracji, wywołanego w warstwie wodonośnej o zwierciadle swobodnym w stosunku do warstwy naporowej, została scharakteryzowana w tab. III.

Zastosowanie, prostej w obliczeniach, metody analizy dopływu nieustalonego w postaci strumienia



Ryc. 1. Fragment ściany eksploatacyjnej kopalni margla.

Fig. 1. Fragment of exploitation wall of marl quarry.



Ryc. 2. Szkic sytuacyjny rozmieszczenia studni i otworów obserwacyjnych.

1 — skarpa, 2 — otwór obserwacyjny, E — symbol otworu, w nawiasie — współrzędne x, y, z w m; 3 — studnia, 4 — oś obliczeniowego układu współrzędnych x, y, z , 5 — oś znalezionej układu współrzędnych ξ, η , zgodnego z orientacją głównych składowych tensora przewodnictwa: $T_{\xi\xi}, T_{\eta\eta}$; α_x — azymut osi x , α_ξ — azymut osi ξ , θ kąt pomiędzy osią x i ξ .

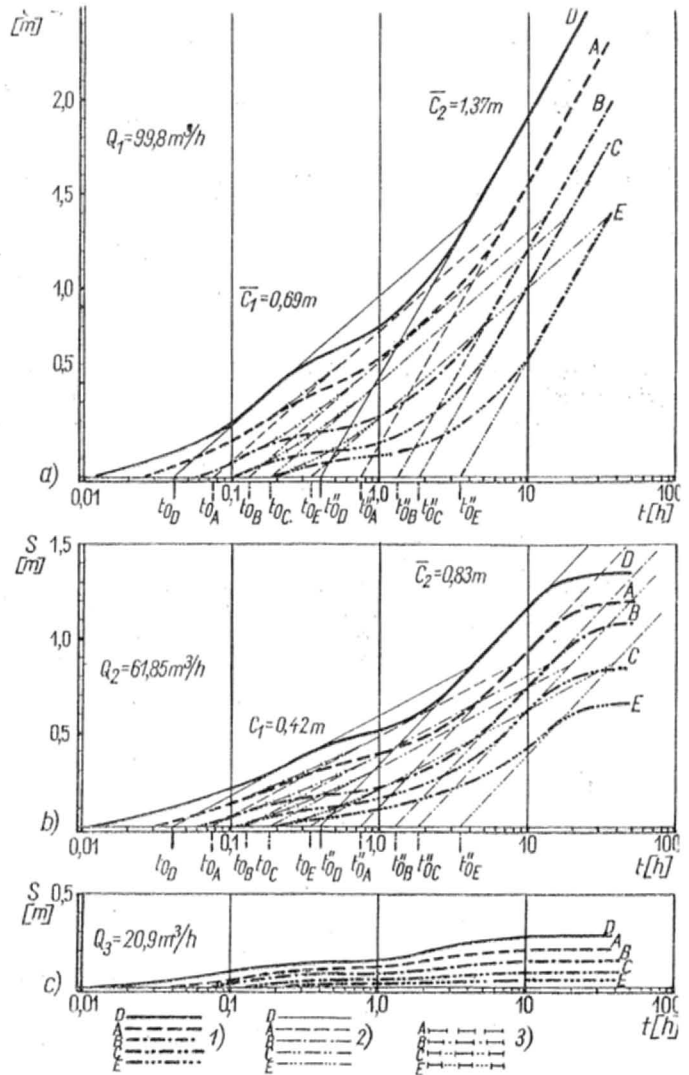
Fig. 2. Location map of wells and observation wells.

1 — escarpment, 2 — observation well, E — symbol of borehole, coordinates x, y, z given in meters in brackets, 4 — axis of calculation system of coordinates x, y, z , 5 — concordant with orientation of main components of conductivity tensor: $T_{\xi\xi}, T_{\eta\eta}$; α_x — azimuth of axis x , α_ξ — azimuth of axis ξ , θ angle between axes x and ξ .

dwuwymiarowego do obliczeń filtracji nieustalanej w warstwie o zwierciadle swobodnym wymaga spełnienia wielu warunków. Mają one na celu zredukowanie różnic w istocie przepływu oraz odsączania między warstwą naporową i warstwą o zwierciadle swobodnym.

W praktyce hydrogeologicznej potwierdziła się słuszność reguł, wg których można bezpośrednio stosować wzory Theisa, Jacoba i Hantusha, pomijając trójwymiarowość strumienia: gdy depresja wywołana pompowaniem nie przekracza $0,1 H$ (H — miąższość początkowa strefy zawodnienia) w rozpatrywanym przekroju lub znajduje się w przedziale $0,1 H \leq s \leq 0,3 H$, po wprowadzeniu depresji skorygowanej $s_K = s_M^2 - s_M^2 \cdot 0,5 H^{-1}$ (s_M — depresja zmierzona).

Mechanizm powstawania zjawiska odsączalności opóźnionej jest następujący: w początkowej fazie pompowania przeważa, z powodu swej gwałtowności, dekompresja wodonośna — w swej istocie podobna do natychmiastowego oddawania wody w warunkach naporowych. Współczynnik odsączalności natychmiastowej jest liczbowo bardzo mały i zbliżony do wy-



Ryc. 3. Krzywe opadania zwierciadła wody w otworach obserwacyjnych podczas pompowania studni badawczej z wydajnością Q_n , $n = 1, 2, 3$.

a) $Q_1 = 99,8 \text{ m}^3/\text{h}$; b) $Q_2 = 61,85 \text{ m}^3/\text{h}$; c) $Q_3 = 20,9 \text{ m}^3/\text{h}$; 1 — krzywe opadania w piezometrach A, B, C, D, E; 2 — wykresy odcinków przybliżenia logarytmicznego fazy początkowej i końcowej krzywych opadania; 3 — odcinki krzywych Theisa prawdopodobnego dalszego opadania zwierciadła wody w pierwszej fazie pompowania, przy braku zjawiska odsączalności opóźnionej; C_1 (średni spadek) i t_0 (czas opóźnienia) — parametry krzywej przybliżenia logarytmicznego pierwszej fazy opadania zwierciadła wody; s — depresja, w m; t — czas narastający od początku pompowania z wydajnością Q_n , w h.

Fig. 3. Curves of drop of water level in observation wells during pumping from test well with output equal Q_n , $n = 1, 2, 3$.

a) $Q_1 = 99,8 \text{ m}^3/\text{h}$; b) $Q_2 = 61,85 \text{ m}^3/\text{h}$; c) $Q_3 = 20,9 \text{ m}^3/\text{h}$; 1 — curves of drop in piezometers A, B, C, D, E; 2 — graphs of sections of logarithmic approximation of initial and end phases of curves of drop; 3 — sections of Theis curves of probable further drop of water table in the first phase of pumping when there is no delayed drainage; C_1 (mean drop) and t_0 (time of delay) — parameters of curve of logarithmic approximation of the first phase of drop of water table; s — depression in m; t — time from the beginning of pumping with the output Q_n in h.

sokich wartości współczynnika zasobności sprężystej. W strefie ponad gwałtownie obniżonym zwierciadłem wody pozostaje woda, która utraciła kontakt hydrauliczny ze studnią i odsącza się grawitacyjnie zasilać zdepresjonowaną warstwę. Zasoby jej mogą być tak duże, że są w stanie zahamować przyrost depresji aż do momentu wyczerpania się ich. Współczynnik odsączalności opóźnionej liczbowo porównywalny jest ze współczynnikiem odsączalności *sensu stricto* — grawitacyjnym. W kolejnej, końcowej fazie

Tabela III

ODMIENNOŚĆ PRZEBIEGU ZJAWISKA FILTRACJI SPOWODOWANA ODMIENNYM CHARAKTEREM ZWIERCIADŁA WODY

Cecha filtracji	Charakter zwierciadła wody	
	napięte	swobodne
przewodnictwo wodne	wartość stała w czasie pompowania (gdy $(H - s) > m$)	wartość malejąca w czasie pompowania, wskutek zmniejszania się miąższości strefy zawodnienia: $(H - s) = f(t)$
strumień wody podziemnej	dla studni zupełnej lub odpowiednio dużej odległości od studni niezupełnej — płasko-radialny (dwuwymiarowy)	półsferycznoradialny lub sferyczno-radialny (zależnie od stopnia ujęcia warstwy) — trójwymiarowy, o wzrastającej składowej pionowej wektora prędkości filtracji w kierunku studni
odwadnianie strefy zdepresjonowanej	z założenia natychmiastowe, z zasobów pojemności sprężystej $\beta = \text{const}$	trzyfazowy charakter odsączania, $\mu = f(t)$; dokładniejszy opis zjawiska w tekście

Tabela IV

Studnia badawcza			Otwory obserwacyjne							
*głębokość strefy ujęcia	średnica rury perforowanej	głębokość do ustabilizowanego zwierciadła wody	symbol	odległość od studni badawczej	współrzędne wg układu XY przyjętego do obliczeń		rodzaj za-filtrowania	głębokość otworu	głębokość do ustabilizowanego zwierciadła wody	
(m)	(m)	(m)	i	r _i	x _i	y _i		(m)	przed rozpoczęciem badań (m)	po zakończeniu badań (m)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
16,0—56,0	0,470	6,10	A	27,2	-27,7	0,0	rura perforowana	53	5,45	5,36
			B	58,9	-49,1	-32,5	otwory nie-zafiltrowane	45	6,05	6,01
			C	35,7	12,7	33,4		55	5,20	5,28
			D	32,0	25,8	18,9		52	6,02	6,11
			E	34,5	-17,0	30,0		40	5,60	5,52

* Wszystkie wartości głębokości liczone od powierzchni poziomu eksploatacyjnego, na którym jest zlokalizowany węzeł hydrologiczny.

próbnego pompowania prędkości: opadania zwierciadła wody w danym przekroju hydrogeologicznym i odsączania grawitacyjnego wyrównują się; współczynnik odsączalności całkowitej charakteryzujący tę fazę zbliża się liczbowo do porowatości efektywnej i ma wartość stałą.

Zjawisko opóźnionej odsączalności jest czasowo ograniczone w danym przekroju hydrogeologicznym prostopadłym do kierunku filtracji a intensywność jego — proporcjonalna do prędkości przyrostu i wielkości wywoływanej depresji. Stąd wniosek, że obserwacje z odpowiednio daleko położonego piezometru, prowadzone z tą samą dokładnością, jaka wystarcza w wypadku piezometrów blisko położonych, mogą tego zjawiska nie uchwycić lub zanotować jego końcowe fazy (ryc. 3).

Wpływ omówionych zjawisk, a mianowicie:

- trójwymiarowości strumienia wód podziemnych,
- maleńia przewodnictwa wodnego w czasie pompowania,
- opóźnienia odwodnienia strefy zdepresjonowanej,
- czasu stabilizacji leja depresji wywołanego naturalnym przepływem w warstwie wodonośnej,
- konsekwencji niezupełności studni

został zbadany w węźle hydrogeologicznym składającym się ze studni badawczej i pięciu otworów obserwacyjnych (tab. IV, ryc. 2). Studnia i piezometry zostały wykonane na poziomie eksploatacyjnym kopalni odkrywkowej marglu, znajdującym się przy skarpie filaru ochronnego złoża, ok. 20 m poniżej powierzchni terenu w stosunku do obszaru poza wyrobiskiem — znacznie poniżej strefy zasięgu in-

tensywnego spękania wietrzeniowego; pozwoliło to założyć z dużą dokładnością pionową niezmienność parametrów szczelinowatości w strefie ujętej przez węzeł hydrogeologiczny i przyjąć występowanie jedynie poziomej anizotropii warunków filtracji.

Zwierciadło ustabilizowane wody w okresie badań znajdowało się średnio na głęb. 5,5 m poniżej rzędnej poziomu eksploatacyjnego i nie wykazywało tendencji do naturalnych wahań. Zarówno studnia, jak i otwory obserwacyjne ujmowały w przybliżeniu jednakową miąższość warstwy wodonośnej — około 50 m strefy zawodnienia — wykształconej w postaci twardych i średniotwardych margli, o rosnącej w kierunku spagu zawartości węgla wapnia od 60% do 80% całkowitego składu mineralnego. Poniżej ujętej strefy margle przechodzą w marglistą kredę piaszczącą i niżej, na głębokości około 60 m — w kredę piaszczącą.

W wyniku badań szczelinowatości przeprowadzonych w sąsiedztwie hydrowęzła w ścianie otwieranego niższego poziomu eksploatacyjnego stwierdzono występowanie systemu ciosu ortogonalnego o praktycznie pionowych upadach płaszczyzn spękań, prostopadłego do powierzchni uławicenia, oraz spękań międzyławicowych o upadach 0—3°, a więc praktycznie poziomych (ryc. 1). Zespół spękań ciosowych o azymucie biegu spękań 119°±8° charakteryzuje się znacznie większą gęstością i rozwartością od zespołu prostopadłego oraz dużą regularnością wykształcenia i ciągłością przebiegu szczelin, tnących przeważnie wszystkie ławice w obrębie odkrywki.

W zespole o azymucie biegu spękań 27°±5° cecha ta jest rozwinięta w znacznie mniejszym stopniu albo wręcz zanika — spękania zachowują ciągłość w

WYNIKI PÓMIARÓW SZCZELINOWATOŚCI

Średnie wartości azymutu biegu spękań			Średnie wartości parametrów szczelinowości mierzone prostopadle do kierunku				Szczelinowa porowatość objętościowa n_{vs} (%)	$A = \frac{b_{WNW}^3 c_{WNW}}{b_{NNE}^3 c_{NNE}}$
spękania ciosowe		spękania międzyławicowe [3] (°)	WNW [1] + [3]		NNE [2] + [3]			
zespół [1] (°)	zespół [2] (°)		rozwartość b (mm)	długość właściwa cs (m/m ²)	rozwartość b (mm)	długość właściwa cs (m/m ²)		
1	2	3	4	5	6	7	8	
119±8	27±5	35±15	0,71	8,9	0,46	2,9	0,765	3,36

Tabela VI

WYNIKI OBLICZEŃ PRZEPROWADZONYCH METODĄ PODWOJNIE LOGARYTMICZNĄ BOULTONA

Symbol otworu obserwacyjnego	Wydajność studni badawczej, Qn (m ³ /h)							
	99,80				61,85			
	T_1	μ	T_2	μ''	T_1	μ	T_2	μ''
	m ² /h	%	m ² /h	%	m ² /h	%	m ² /h	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	27,2	0,545	13,4	2,95	27,8	0,521	13,7	3,01
B	28,0	0,194	12,8	1,48	28,1	0,179	13,2	1,52
C	28,2	0,941	13,3	4,38	27,7	0,990	12,9	4,27
D	25,6	0,275	13,6	1,18	26,2	0,282	13,9	1,09
E	25,5	1,83	13,4	9,12	26,8	1,91	13,5	8,95

obrębnie jednej lub paru sąsiednich ławic a częstotliwość ich występowania jest różna (tab. V). Badania te potwierdziły poprzednie pomiary szczelinowości, stwierdzając istnienie strukturalnej horyzontalnej anizotropii warunków filtracji, wyrażającej się wartością współczynnika A nierównomierności rozwoju lejów depresji różną od jedności (5).

Próbne pompowania prowadzono w węźle hydrogeologicznym trzema wydajnościami, rozpoczynając od najwyższej, po każdym stopniu stosując przerwy w pracy pomp, trwającą do czasu powrotu zwierciadła wody do poziomu z okresu poprzedzającego pompowanie. Wyniki pomiarów opadania zwierciadła wody w otworach obserwacyjnych naniesiono na wykresy w układach współrzędnych: $\lg s_t = f(\lg t)$ oraz $s_t = f(\lg t)$. Po przeanalizowaniu kształtu krzywych stwierdzono ich podobieństwo do krzywych teoretycznych Boultona $S = f\left(u', u', \frac{r}{B'}\right)$ (2), opisujących zjawisko opóźnionej odsączalności w warstwie o zwierciadle swobodnym. Załamanie się krzywych opadania zwierciadła wody spowodowane dodatkowym zasilaniem z zasobów odsączalności opóźnionej i ponowne ich przegięcie przy przejściu do fazy końcowej pompowania, po wyczerpaniu tych zasobów, jest dobrze widoczne na wykresach $s_t = f(\lg t)$ (ryc. 3a, 3b).

Naniesione na wykresy krzywych $s_t = f(\lg t)$ odcińki krzywych Theisa, przeniesione z krzywych teoretycznych Boultona w położeniu wzajemnej geometrycznej zgodności krzywych: 1) opadania w początkowej fazie pompowania i teoretycznej z rodziny A $\left[s = f\left(u', \frac{r}{B'}\right)\right]$, 2) opadania w końcowej fazie pompowania z teoretyczną z rodziny B $\left[s = f\left(u', \frac{r}{B'}\right)\right]$ — dały, po dokonaniu ich przybliżenia logarytmicznego, krzywą łamaną o dwu odmiennych spadkach C_1 i C_2 . Potwierdza to zmiana przewodnictwa wodnego T w czasie próbnego pompowania stwierdzona obliczeniami metodą podwójnie logarytmiczną Boultona, prowadzonymi przy założeniu izotropii warunków filtracji (tab. VI).

Porównanie przewodnictwa wodnego obliczonego w fazie początkowej i końcowej pompowania ze zmianą miąższości ujętej strefy zawodnienia $m\alpha$ nie pozwala tłumaczyć tego zjawiska jedynie zmniejszeniem się wartości $m\alpha$; przewodnictwo wodne maleje około dwukrotnie, gdy $m\alpha$, w czasie stabilizacji t

wartości $C = \frac{As}{A \lg t}$ w fazie końcowej pompowania

o wartość mniejszą niż 0,05 początkowej wielkości $m\alpha$. Jednocześnie, jak wykazały obliczenia, nie do przyjęcia jest interpretacja tego faktu oddziaływaniem bocznej granicy nieprzepuszczalnej: w wypadku skokowego pogorszenia się warunków przewodnictwa poza badaną strefą wartość A' (wzór [16]) wyznaczona z fazy końcowej byłaby różna od wartości A' określonej w fazie początkowej, czego nie stwierdzono.

Przez analogię do metody obliczeń filtracji nieustalanej podanej przez Berkloffa (1), nazywanej „metodą warstwy przewodzącej-uprzywilejowanej”, przyjęto że rolę elementu uprzywilejowanego pod względem przewodzenia w warstwie wodonośnej spełnia system porowatości szczelinowej, natomiast porowatość międzyagregatowa i mikroszczelinowa calizny skalnej — rolę elementu magazynującego. Za słusznością tej tezy przemawiają wartości odsączalności natychmiastowej μ , porównywalne liczbowo z porowatością objętościową szczelinową n_{vs} (tab. VIII, tab. V) oraz znacznie wyższa od niej wartość odsączalności całkowitej μ'' . W takim ujęciu odsączalność opóźniona byłaby spowodowana odsączeniem się pewnej ilości wody z porów w caliznie skalnej do szczelin, wskutek wytworzenia się różnicy ciśnień hydraulicznych między wodami wypełniającymi obydwie typy porowatości. W pierwszej fazie pompowania dekompresja obejmowałaby jedynie wody szczelinowe, a obliczone przewodnictwo wodne T_1 w świetle ujęcia Berkloffa należałoby pomniejszyć o połowę i ta wartość charakteryzowałaby przewodnictwo całości masywu skalnego; w istocie — wartość T_2 , wyznaczona z końcowej fazy próbnego pompowania jest równa 0,5 T_1 (tab. VI, tab. VIII).

Analiza wyników obliczeń prowadzonych przy założeniu izotropii ośrodka (tab. VI), a szczególnie wartości μ_1 i μ_1' wskazuje jednoznacznie na konieczność

PARAMETRY KRZYWYCH $s_t = f(\lg t)$ OPADANIA ZWIERCIADŁA WODY W PIEZOMETRACH

Symbol otworu obserwacyjnego	Wydajność studni badawczej, Q (m ³ /h)							
	99,80				61,85			
	t_{01} (h)	C_1 (m)	t_{01} (h)	C_2 (m)	t_{01} (h)	C_1 (m)	t_{01} (h)	C_2 (m)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	0,075		0,76		0,073		0,74	
B	0,130		1,35		0,125		1,30	
C	0,185	0,69	1,80	1,37	0,190	0,42	1,85	0,83
D	0,041		0,40		0,040		0,395	
E	0,355		3,60		0,35		3,60	

Tabela VIII

WYNIKI OBLICZEŃ DOPŁYWU NIEUSTALONEGO Z UWZGLĘDNIENIEM ANIZOTROPII WARUNKÓW FILTRACJI

Wydajność studni Q_n (m ³ /h)	Symbole otworów obserwacyjnych wchodzących w skład węzła hydrogeologicznego obliczeniowego	Wyniki obliczeń początkowej fazy dopływu nieustalonego							Wyniki obliczeń końcowej fazy dopływu nieustalonego						
		składowe tensora przewodnictwa w obliczeniowym układzie XY (m ² /h)			odsączalność natychmiastowa μ (%)	główne składowe tensora przewodnictwa w układzie $\xi \eta$ (m ² /h)		Kąt θ pomiędzy osiami X i ξ (°)	składowe tensora przewodnictwa w obliczeniowym układzie XY (m ² /h)			odsączalność całkowita μ'' (%)	główne składowe tensora przewodnictwa w układzie $\xi \eta$ (m ² /h)		Kąt θ pomiędzy osiami X i ξ (°)
		T_{xx}	T_{yy}	T_{xy}		T_{MAX}	T_{MIN}		T_{xx}	T_{yy}	T_{xy}		T_{MAX}	T_{MIN}	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
99,80	A,B,C	60,6	25,0	28,5	0,618	76,4	9,20	29,0	30,5	12,6	14,4	3,11	37,8	5,35	26,8
	A,D,E	60,1	24,8	28,2	0,608	75,7	9,18	28,8	30,8	12,8	14,7	3,07	38,3	5,30	27,0
	B,D,E	60,6	24,8	28,3	0,620	76,2	9,25	28,7	31,2	13,1	15,2	3,03	39,8	4,46	29,6
61,85	A,B,D	56,1	26,1	27,2	0,596	72,2	10,10	30,6	28,4	13,2	13,7	3,02	36,4	5,12	30,5
	A,C,D	64,3	25,2	29,9	0,618	80,4	9,10	28,4	32,5	12,8	15,1	3,13	40,7	4,59	28,5

uwzględnienia anizotropii warunków filtracji. Do dalszych obliczeń wybrano wyniki pompowań z wydajnością $Q_1 = 99,80$ m³/h oraz $Q_2 = 61,85$ m³/h. Pompowanie trzecie — z wydajnością $Q_3 = 20,9$ m³/h — dało krzywe opadania zwierciadła wody o tak małych wartościach spadków $C = \frac{ds}{d \lg t}$, że wahania zwierciadła wody w otworach obserwacyjnych wywołane drobnymi zmianami wydajności studni oraz błędy pomiarowe i inne czynniki zaburzające nie pozwoliły na jednoznaczną interpretację wykresów krzywych. Ponadto, przy tak małej wydajności stabilizacja lejów depresji, wywołana istnieniem naturalnego przepływu w warstwie wodonośnej, uchwycona już przy drugiej wydajności, nastąpiła w tym wypadku o tyle wcześniej, że ustalenie się wartości s wystąpiło tylko dla krzywej opadania z jednego piezometru. Wobec faktu, że wartości przewodnictwa, obliczone metodą Boultona, były bardzo zbliżone do siebie (co wskazuje na jednorodny charakter anizotropii i jest warunkiem możliwości zastosowania metody Papadopoulou), w celu zwiększenia dokładności wyników znaleziono — oddzielnie dla każdego stopnia pompowania — średnie wartości spadku C_3 krzywych $s = f(\lg t)$ fazy końcowej próbnego pompowania i krzywych Theisa dla fazy początkowej (znalezionych w opisanym uprzednio sposób). W ten sposób uzyskano dane wyjściowe do przeprowadzenia obliczeń dopływu nieustalonego z uwzględnieniem anizotropii warunków filtracji metodą przybliżenia logarytmicznego (tab. II — część prawa, tab. VII, ryc. 3a i 3b).

Obliczenia wykonano grupując otwory obserwacyjne po trzy, w celu uniknięcia przypadkowości doboru piezometrów oraz uzyskania wyników uśrednionych. W tak uformowanych obliczeniowych węzłach hydrogeologicznych analizowano oddzielnie początkową i końcową fazę pompowania badawczego. Na podstawie czasów opóźnienia t_{01} i spadku C_1 pierwszej części krzywych opadania zwierciadła wody z piezometrów otrzymano każdorazowo:

— główne składowe tensora przewodnictwa T_{1MAX} i T_{1MIN} oraz ich zorientowanie,
— odsączalność natychmiastową μ .
Parametry krzywych opadania t_{01} i C_2 z końcowej fazy pompowania były podstawą wyznaczenia:

— głównych składowych tensora przewodnictwa T_{2MAX} i T_{2MIN} oraz ich zorientowania,
— odsączalności całkowitej μ'' (tab. VIII).

Wstępna analiza uzyskanych wyników pozwala stwierdzić, że pozioma anizotropia warstwy wodonośnej ma charakter niemal jednorodny (w obszarze zasięgu oddziaływania studni): w każdym miejscu warstwy objętej badaniami wartości tensora przewodnictwa, jego składowych i ich zorientowanie są w przybliżeniu jednakowe. Wskazuje na to mała różnica między wartościami T tensora przewodnictwa obliczoną z jego składowych (wzór [6]) a wartością przewodnictwa wodnego wyznaczoną bezpośrednio ze spadku $C_{at} = \frac{ds}{d \lg t}$ krzywej opadania z

piezometru w n fazie pompowania (tab. VI i VIII): wielkości te mają się odpowiednio $13,6$ m²/h \pm $0,5$ m²/h i $13,2$ m²/h \pm $0,9$ m²/h.

Jednocześnie wartość współczynnika A' [16] wykazuje dużą zbieżność w obliczeniach poszczególnych węzłów hydrogeologicznych: $A' = 2,83 \pm 0,17$. Wartość ta koresponduje z wielkością A uzyskaną z badań szczelinowatości (tab. V): $A = 3,36$. Znaleziona średnia wartość kąta $\Theta = 28^\circ 50' \pm 2^\circ$ pozwoliła na określenie azymutu osi ξ maksymalnego przewodnictwa wodnego:

$$T_{MAX}: \alpha_\xi = \alpha_x - \Theta = 144^\circ - 28^\circ 50' = 115^\circ 10' \quad [17]$$

Przyjmując, że kąt ten został wyznaczony dokładnie, różnicę jaką wykazuje w stosunku do średniego azymutu sphań lepiej rozwiniętego zespołu ciśsu ($\alpha_{[1]} = 119^\circ$) można wytłumaczyć wpływem naturalnego lokalnego spadku zwierciadła wody z ENE na WSW (podana metoda zakłada, że spadek naturalny

zwierciadła wody $i=0$). Niewielka wartość odchyłki pozwala stwierdzić, że w wypadku analizowanej warstwy wodonośnej o wartości $A' \infty A \infty 3$ wpływ nachylenia naturalnej powierzchni zwierciadła wód podziemnych jest praktycznie nieistotny.

Zastosowana metoda obliczeń filtracji nieustalonej pozwoliła określić wartości odsączalności natychmiastowej μ i całkowitej μ'' , interpretowane przez autorów odpowiednio jako odsączalność systemu porowatości szczelinowej i odsączalność całkowita masywu (łącznie z odsączalnością systemu porowatości interagregatowej i mikroszczelinowej calizny skalnej); wynoszą one $\mu = 0,61\%$ oraz $\mu'' = 3,07\%$. Porównanie uzyskanej wartości odsączalności natychmiastowej μ ze szczelinową porowatością objętościową $n_{vs} = 0,765\%$ potwierdza słuszność przyjętej interpretacji.

Brak odpowiednio dokładnych wyników analizy próbnego pompowania przy więcej niż dwóch poziomach dynamicznych nie pozwala jednoznacznie określić wpływu niezupełności ujęcia warstwy wodonośnej przez studnię i otwory obserwacyjne. Porównanie rezultatów obliczeń dopływu nieustalonego przy wydajnościach 99,8 m³/h i 61,85 m³/h nie wykazuje istotnej różnicy, która sugerowałaby wyraźne oddziaływanie niezupełności ujęcia. Niewykluczone, że wpływ na to wywiera zmiana charakteru litologicznego profilu na głębokości poniżej dna studni i otworów obserwacyjnych i związana z nią oraz ze zjawiskiem zaciskania szczelin — zmiana stopnia przepuszczalności.

Analiza początkowej fazy próbnego pompowania przeprowadzona na wykresach $s_t = f(\lg t)$ nie wykazała wpływu pojemności studni w odległości najbliższej położonych piezometrów.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Jak wykazały przedstawione wyniki analizy próbnego pompowania metodami zakładającymi izotropię warunków filtracji i metodą wychodzącą z założenia anizotropowego charakteru poziomej filtracji — jedynie ta ostatnia pozwala w sposób jednoznaczny określić przewodnictwo wodne i odsączalność w szczelinowej warstwie wodonośnej. Przystosowanie metody Papadopouloosa zaproponowane przez autorów sprowadza się do następujących zasad:

- pompowanie należy prowadzić z wydajnością, która nie powoduje przekroczenia granicznych depresji na rozpatrywanych przekrojach hydrogeologicznych, umożliwia pominięcie zmiany miąższości warstwy wodonośnej i trójwymiarowości strumienia wód podziemnych; jednocześnie wydajność powinna być tak duża, aby wykresy krzywych opadania zwierciadła wody $s = f(\lg t)$ charakteryzowały się spadkiem wielokrotnie wyższym od wahań wynikających z błędów pomiarów i zmian wydajności studni;

- wydajność powinna być w takim stopniu wyższa od naturalnego przepływu w warstwie wodonośnej, aby faza stabilizacji leża depresji nastąpiła po odpowiednio długim czasie;

- obserwacje należy prowadzić w piezometrach zlokalizowanych tak, aby czasy opóźnienia pojawienia się depresji grupowały się w możliwie wąskim przedziale, co w rezultacie da krzywe opadania wykształcone w podobny sposób;

- w wypadku gdy obliczenia, przeprowadzone metodą podwójnie logarytmiczną Boultona, wykażą około dwukrotne zmniejszenie wartości przewodnictwa wodnego T w końcowej fazie w stosunku do fazy początkowej przy jednoczesnym wzroście współczynnika μ , należy — zgodnie z interpretacją Berkalooffa tego zjawiska — uważać za wartość reprezentatywną przewodnictwa T obliczone z fazy końcowej próbnego pompowania;

- przy spełnieniu warunku podanego na wstępie, do określenia wartości i zorientowania składowych tensora przewodnictwa oraz współczynnika odsączalności całkowitej wystarczy aproksymacja logarytmiczna końcowej fazy, która jest tym dokładniejsza, im dłuższy jest odcinek prostoliniowy wykresu $s_t = f(\lg t)$ po jego graficznym przybliżeniu logarytmicznym. Parametry charakteryzujące te odcinki z trzech piezometrów: t_{oi} (czas opóźnienia) i C (średnia wartość nachylenia) są danymi wyjściowymi do

rozwiązania równania [13] wg schematu z prawej części tab. II. Aby rozwiązanie było jednoznaczne, piezometry muszą być zlokalizowane w różnych kierunkach od studni.

Na podstawie tak wyznaczonych parametrów t_{oi} i C i przy zachowaniu powyższych warunków, metoda przedstawiona w niniejszej pracy może być sposobem obliczeń dopływu nieustalonego do studni w warstwie wodonośnej, zbudowanej ze spękanej skały o innej budowie litologicznej od badanej warstwy wodonośnej w podanym przykładzie.

Gdy znajomość parametrów określających porowatość masywu skalnego upoważnia do wiązania odsączalności natychmiastowej μ z odsączalnością systemu szczelin, dokładne wyznaczenie wartości μ jest istotne. W tym celu można posłużyć się wykresami krzywych teoretycznych Boultona dla znalezienia przypuszczalnego przebiegu krzywej funkcji Theisa podczas geometrycznie zgodnego położenia krzywej opadania $\lg s_t = f(\lg t)$ zwierciadła wody w i piezometrze w pierwszej fazie pompowania, z odpow-

wiednią krzywą funkcji Boultona $e = f\left(u', \frac{r}{B'}\right)$. Przeniesienie tak wykreślonej krzywej Theisa wraz z krzywą opadania — na wykres w skali półlogarytmicznej $s_t = f(\lg t)$, pozwoli na wykonanie jego graficznej aproksymacji logarytmicznej, znalezienie parametrów t_{oi} oraz C_{1i} i w końcu — rozwiązanie równania [14], jeżeli $i = 1, 2, 3$.

Przeprowadzone obliczenia zostały porównane z wynikami badań szczelinowatości. Analiza odpowiednich elementów (kierunku osi ξ maksymalnego przewodnictwa i azymutu spękań ciosowych zespołu dominującego — równanie [17], tab. V; współczynników A i A' — równanie [18], tab. V, współczynnika odsączalności natychmiastowej μ i porowatości szczelinowej n_{vs} — tab. VIII i V) wykazała podobieństwo jakościowe i ilościowe rozpatrywanych elementów. W wyniku tego podobieństwa, opisaną w niniejszej pracy próbę przystosowania analizy dopływu nieustalonego do studni zupełnej w warstwie naporowej o jednorodnej anizotropii horyzontalnej warunków filtracji, do obliczeń dopływu nieustalonego w warstwie o zwierciadle swobodnym, zbudowanej z margli o regularnie wykształconym ciosie ortogonalnym, można uznać za udaną.

LITERATURA

1. Berkalooff E. — Interpretation des pompages d'essai. Cas de nappes captive avec une strate conductrice d'eau privilégiée, BRGM, 695GL HY D, 1969.
2. Boulton N. S. — Unsteady radial flow to a pumped well allowing for delayed yield from storage. Assoc. int. hydrol. scient. publ., 1954, no. 37.
3. Dagan G. — A method of determining the permeability and effective porosity of unconfined anisotropic aquifers. Water Resources Research 1967, no. 3.
4. Forkasiewicz J. — Interpretation des données des pompages d'essai pour l'évaluation des paramètres des aquifères. Aide — mémoire. BRGM SGL 293 HYD, 1969.
5. Herbich P., Krajewski S. — Ocena anizotropii warunków filtracji w skałach na podstawie pomiarów szczelinowatości. Biul. geol. UW, 1976, nr 21.
6. Krajewski S. — Charakterystyka dróg krążenia wód podziemnych w utworach szczelinowych górnej kredy na Wyżynie Lubelskiej. Prz. geol., 1970, nr 8—9.
7. Liszkowski J., Stochlak J. — Szczelinowatość masywów skalnych. Wyd. Geol., 1976.
8. Papadopoulos I. S. — Nonsteady flow to a well in an infinite anisotropic aquifer, Louvain, 1965.
9. Theis V. — The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground water storage. Trans. Amer. Geoph. Union. Nat. Research Council 16th Ann. Meeting, Washington, 1935.

SUMMARY

The paper presents a method of estimating horizontal anisotropy of filtration conditions in fissured rocks which is based on analysis of groundwater table observations made with the use of a set of piezometers during test pumping in well taking water from aquifer with a free table. The studies were carried out in an area built of fractured marls with two principal systems of orthogonal joint differing from one another in density and width of fractures and resulting in horizontal anisotropy of filtration conditions.

Orientation and values of main components of conductivity tensor t were determined using J. S. Papadopoulos (8) formulae for aquifers with table under pressure and comprised by complete well. A mode of interpretation of the curves $s = f(lgt)$ of drop of water table in observational wells is given. It makes possible to estimate values of instantaneous and total filtrability coefficients characterizing particular stages of drainage of aquifer with free water table. The results of estimations of these parameters made for an aquifer built of Upper Senonian marls were subsequently compared with results of field measurements of fissurity. This made it possible to state that the role of fissure system is almost completely limited to water transport whilst water storage is mainly determined by interaggregate and microfissure porosity.

In concluding there are listed factors bearing a decisive influence on accuracy of estimations of hydrogeological parameters of fractured massif, carried out with the use of this method.

РЕЗЮМЕ

В статье представлен метод определения горизонтальной анизотропии условий фильтрации в трещиноватых породах, основанный на анализе результатов наблюдений уровня подземных вод в группе пьезометров, проведенных во время испытательного качания в колодце каптирующим водной горизонт со свободным зеркалом. Исследования были проведены в районе сложенным трещиноватыми мергелями с двумя главными системами ортогональной отдельности, отличающимися между собой плотностью и раскрытием трещин, что является причиной горизонтальной анизотропии условий фильтрации. Для определения ориентации и величины составляющих тензора проводимости T применялись формулы Пападопулоса (8) для водных горизонтов с напорным зеркалом, каптированных полным колодцем. Приведен способ интерпретации кривых $s = f(lgt)$ понижения уровня воды в наблюдательных скважинах, дающий возможность определения коэффициента водоотдачи — мгновенной μ и полной μ'' , характеризующих этапы осушения водных горизонтов со свободным зеркалом. Результаты вычислений этих параметров для горизонта сложенного верхнесенонскими мергелями были сравнены с результатами полевых измерений трещиноватости. Из этого видно, что трещины играют решающую роль в течении воды, а в её хранении — интерагрегатная и микротрещинная пористость. В заключение приведены условия решающие о точности определения гидрогеологических параметров трещиноватого массива при помощи описанного метода.