

## ZASTĘPCZY PROMIENŃ STREFY NIELINIOWEJ FILTRACJI WOKÓŁ STUDNI ZGLĘBIONEJ W SKAŁACH SZCZELINOWO-KRASOWYCH

UKD 556.332.2/4 promień zastępczy:556.342/343.2(1-0)

### TEORETYCZNE PODSTAWY OBLICZEŃ KRYTYCZNEGO GRADIENTU HYDRAULICZNEGO JAKO WYNIK PRÓBNYCH POMPOWAŃ

Niniejszy artykuł powstał na gruncie badań dokładności prognoz hydrogeologicznych wykonywanych w Instytucie Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej AGH dla potrzeb górnictwa rud cynku i ołowiu (5). Panuje pogląd, że w szczelinowo-krasowych skałach wapienia muszlowego, pośród których zalegają rudy cynku i ołowiu istnieją szczególnie dogodne warunki dla powstawania turbulentnego przepływu wód podziemnych. Ponieważ obliczenia hydrogeologiczne i badania modelowe, za pomocą których opracowywane były wspomniane prognozy opierały się na założeniu laminarnego ruchu wody, przeto zrodziły się wątpliwości odnośnie do ich wiarygodności względnie dokładności. Powstała zatem kwestia określenia wielkości błędu tych prognoz, wynikającego z faktu nieuwzględnienia domniemanego istnienia strefy ruchu nielaminarnego wokół wyrobisk górniczych.

Wyjaśnienie tej kwestii wymagało przedtem, m.in., teoretycznego określenia wpływu obecności strefy turbulentnego przepływu wokół studni na jej wydajność, empirycznego stwierdzenia czy i przy jakich gradientach krytycznych dochodziło do wystąpienia nielaminarnego ruchu wody w trakcie próbnych pompowań przeprowadzonych w skałach wapienia muszlowego oraz określenia zasięgu nielaminarnego przepływu wokół otworów pompowych.

Na podstawie uzyskanych i przedstawionych rezultatów, znając z pomiarów piezometrycznych rozkład pola hydrodynamicznego wokół kopalń i współczynniki filtracji (12) można było przeprowadzić porównawcze obliczenia z uwzględnieniem i bez uwzględnienia istnienia strefy ruchu nielaminarnego. Uzyskaną różnicę można było z kolei uznać za miarę wpływu nieuwzględnienia zjawiska turbulencji na dokładność opracowanych prognoz. Jest to jednak tematem odrębnej publikacji.

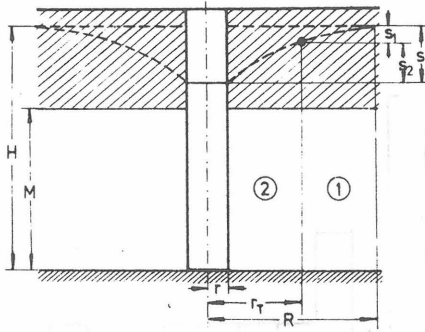
Krytycznym gradientem Pazdro (15) nazywa taki, przy którym przestaje obowiązywać liniowe prawo przepływu wody przez ośrodek skalny. Autorzy przyjęli za Kerkisem (6) podstawowe założenie, w myśl którego krytyczny gradient hydrauliczny odpowiada przejściu ruchu laminarnego, podlegającego prawu Darcy'ego w turbulentny, opisany przez Krasnopolskiego (10) równaniem drugiego stopnia. Pierwsza z przytoczonych definicji jest mniej wymagająca, ponieważ dopuszcza dowolny i zmieniający się stopień równania filtracji. Natomiast założenie Kerkisa jest bardziej ograniczone, gdyż uwzględnia tylko skokowe przejście od równania liniowego do zależności drugiego stopnia pomiędzy przepływem a spadkiem hydraulicznym. Podobne założenia wyjściowe przyjęli Jacob i Rorabaugh dla opracowania teorii ruchu wód podziemnych w strefie przystudziennnej (fide 16).

Wielkość obniżenia napiętego zwierciadła wody w studni zupełnej (ryc. 1), przy założeniu istnienia strefy ruchu turbulentnego o określonym promieniu można, według Kerkisa (6), obliczyć z następującego równania:

$$s = s_1 + s_2 = \frac{Q}{2\pi kM} \ln \frac{R}{r_T} + \left( \frac{Q}{2\pi k_T M} \right)^2 \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_T} \right) [1]$$

w którym:

- $s$  – obniżenie zwierciadła wody w studni,
- $s_1$  – obniżenie zwierciadła wody w strefie ruchu laminarnego,
- $s_2$  – obniżenie zwierciadła wody w strefie ruchu turbulentnego,



Ryc. 1. Schemat dopływu do studni zupełnej w warstwie o zwierciadle napiętym

1 – strefa ruchu laminarnego, 2 – strefa nieliniowego ruchu wód podziemnych. Oznaczenia literowe jak we wzorze (1)

Fig. 1. Scheme of inflow to fully penetrating well in confined aquifer

1 – zone of laminar movement, 2 – zone of nonlinear movement of groundwater. Letter symbols as used in the equation (1)

- $Q$  – wydajność studni,
- $k$  – współczynnik filtracji warstwy wodonośnej,
- $k_T$  – współczynnik filtracji nieliniowej (przepływu turbulentnego) warstwy wodonośnej,
- $M$  – miąższość warstwy wodonośnej,
- $r$  – promień studni,
- $r_T$  – promień strefy filtracji nieliniowej (przepływu turbulentnego),
- $R$  – promień lejka depresji.

Wychodząc z prawa Darcy'ego i równania ciągłości strugi można obliczyć wielkość dopływu do studni, wokół której istnieje strefa nieliniowego przepływu wód podziemnych:

$$Q = 2\pi k M r_T \cdot I_{kr} \quad [2]$$

gdzie:

$I_{kr}$  – krytyczny gradient hydrauliczny.

Pozostałe objaśnienia jak we wzorze [1].

Po wstawieniu obliczonej z wzoru [2] wielkości promienia turbulencji do równania [1] i odpowiednim przekształceniu uzyskamy zależność:

$$\frac{Q}{2\pi k M r} \cdot \frac{1}{J_{kr}} + \ln J_{kr} = \frac{2\pi k M s}{Q} - \ln \frac{2\pi k M R}{Q} + 1 \quad [3]$$

Duża liczba próbnych pompowań w trzaskie krakowsko-śląskim była wykonywana w warunkach odpowiadających pompowaniom w studniach niezupełnych. W związku z tym przyjęto za słuszne ogólne założenie Paukera (14), według którego całkowita depresja w otworze niezupełnym z cylindryczną strefą nieliniowego przepływu wód podziemnych (ryc. 2) wynosi:

$$s = s_1 + s_2 + s_3 \quad [4]$$

gdzie:

$s_1, s_2$  – jak we wzorze [1],

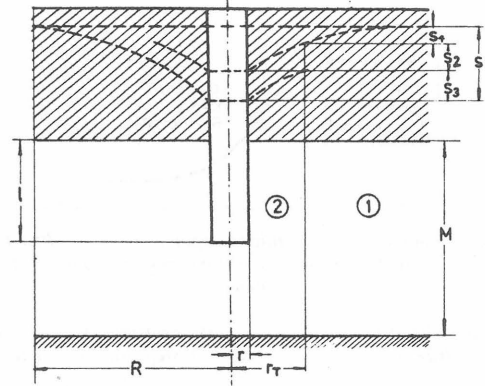
$s_3$  – dodatkowe obniżenie wywołane oporami przepływu spowodowanymi niezupełnością studni.

Wielkość depresji ( $s_3$ ) można obliczyć według wzoru podanego przez Borewskiego (1):

$$s_3 = \frac{Q}{2\pi k M} \cdot \xi_1 \quad [5]$$

w którym:

$\xi_1$  – dodatkowy opór hydrauliczny spowodowany niezupełnością studni przy filtracji ustalonej  $\xi_1 =$

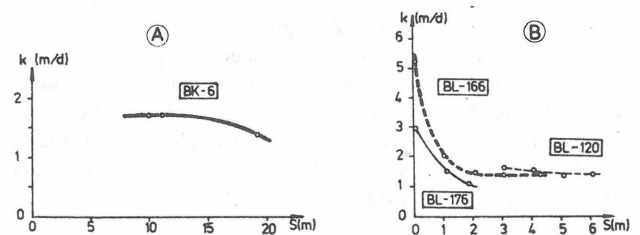


Ryc. 2. Schemat dopływu do studni niezupełnej w warstwie o zwierciadle napiętym

1 – strefa ruchu laminarnego, 2 – strefa nieliniowego ruchu wód podziemnych. Oznaczenia literowe jak we wzorach (1) i (4)

Fig. 2. Scheme of inflow to partially penetrating well in confined aquifer

1 – zone of laminar movement, 2 – zone of nonlinear movement of groundwater. Letter symbols as in the equations (1) and (4)



Ryc. 3. Wykresy zależności współczynników filtracji ( $k$ ) od depresji ( $s$ ), wytwarzanej w trakcie próbnego pompowania

A – początkowy fragment uogólnionej krzywej  $k = f(s)$ , B – środkowe lub końcowe fragmenty uogólnionej krzywej  $k = f(s)$  – por. ryc. 4

Fig. 3. Graphs of relationship of permeability ( $k$ ) on drawdown ( $s$ ) originating in the course of test pumping

A – initial fragment of generalized curve  $k = f(s)$ , B – middle and end fragments of generalized curve  $k = f(s)$  – compare Fig. 4.

$$= f \frac{1}{M}, \frac{M}{r} \text{ przy czym } l - \text{ czynna długość otwo-}$$

ru pompowego.

Pozostałe objaśnienia jak we wzorze [1].

Liczbowa wartość dodatkowego oporu hydraulicznego  $\xi_1$  można odczytać z tablic lub wykresów, zamieszczonych w cytowanej pracy Borewskiego. Po rozwinięciu wzoru [4] można go zapisać w formie następującego równania:

$$s = \frac{Q}{2\pi k M} \cdot \ln \frac{R}{r_T} + \left( \frac{Q}{2\pi k_T M} \right)^2 \cdot \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_T} \right) + \frac{Q}{2\pi k M} \cdot \xi_1 \quad [6]$$

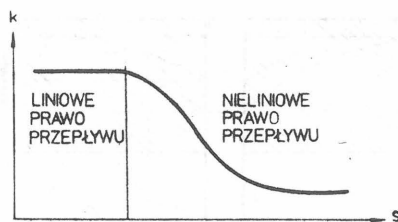
Po wstawieniu do wzoru [6] zależności:

$$k_T = k \sqrt{\frac{Q}{2\pi k M r_T}} \quad [7]$$

oraz

$$r_T = \sqrt{\frac{Q}{2\pi k M J_{kr}}} \quad [8]$$

i dokonaniu odpowiednich przekształceń otrzymamy:



Ryc. 4. Uogólniona krzywa zmian współczynników filtracji ( $k$ ) od depresji ( $s$ ) w przypadku wielostopniowego próbnego pompowania

Fig. 4. Generalized curve of changes of permeability ( $k$ ), depending on drawdown ( $s$ ) in the case of step-drawdown test

$$\frac{Q}{2\pi k M r} \cdot \frac{1}{J_{kr}} + \ln J_{kr} = \frac{2\pi k M s}{Q} - \ln \frac{2\pi k M R}{Q} + 1 - \zeta_1 \quad [9]$$

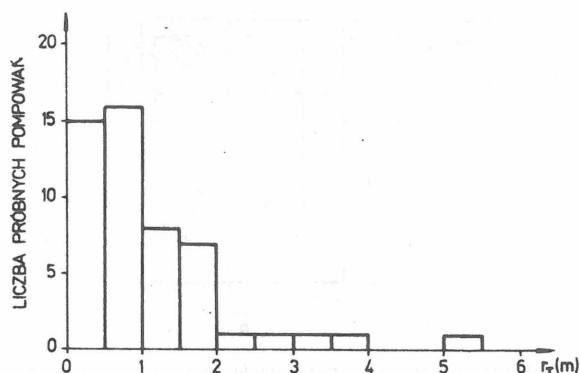
W równaniach [3] i [9] szukana wartość krytycznego gradientu hydraulicznego występuje w postaci funkcji uwikłanej i dla jej obliczenia stosowano metodę kolejnych przybliżeń. Wyniki wcześniejszych niepublikowanych badań autorów dowiodły, że metoda określania charakteru ruchu wód podziemnych w warunkach zwierciadła swobodnego daje niepewne rezultaty. Z tego powodu nie określano krytycznego gradientu hydraulicznego na podstawie wyników próbnego pompowań w warstwie o zwierciadle swobodnym. Zmniejszyło to bardzo poważnie liczbę próbnego pompowań, które można było uwzględnić w obliczeniach gradientów krytycznych i wielkości promieni strefy nieliniowego ruchu wód podziemnych.

#### WIELKOŚĆ KRYTYCZNEGO GRADIENTU HYDRAULICZNEGO I PROMIENI STREFY NIELINIOWEJ FILTRACJI

Krytyczne gradienty hydrauliczne i promienie strefy nieliniowej filtracji obliczono na podstawie wyników próbnego pompowań w 27 otworach badawczych, spośród których 7 było studniami zupełnymi, a pozostałe 20 niezupełnymi. Podstawowym kryterium wyboru studni, w otoczeniu których określono krytyczny gradient hydrauliczny i promień zasięgu turbulencji były wartości współczynników  $m$  do wzoru Smrekera (17). Brano pod uwagę tylko te studnie, w których przeprowadzone pompowania spełniały warunek  $m > 1$ .

Określenie liczbowych wartości dopływu, miąższości, depresji, promienia otworu oraz współczynnika dodatkowych oporów przepływu, występujących we wzorach [3] i [9] nie naszczęła trudności. Były to bowiem wielkości pomierzone w trakcie wykonywania otworu lub próbnego pompowania względnie, w przypadku współczynnika dodatkowych oporów przepływu, odczytane z odpowiednich wykresów. Pewne trudności pojawiają się z doбором współczynnika filtracji i promienia lejka depresji.

Współczynnik filtracji jest wartością stałą, charakteryzującą liniową zależność między natężeniem przepływu strumienia wód podziemnych a spadkiem hydraulicznym. Niemniej jednak w trakcie analizy wyników próbnego pompowań w tym samym otworze, ale przy różnych stopniach depresji stwierdzono, że współczynniki filtracji obliczone dla różnych depresji zwykle różniły się wyraźnie między sobą (12). Najczęściej, w miarę wzrostu depresji, uzyskiwano coraz to mniejsze wartości współczynnika filtracji, co autorzy przypisują wpływowi powiększania się zasięgu strefy odchyłek od liniowego prawa filtracji wokół studni. Najczęstsze typy zmian współczynnika filtra-



Ryc. 5. Histogram rozkładu wartości promieni stref filtracji nieliniowej

Fig. 5. Histogram of distribution of radii of nonlinear filtration zones

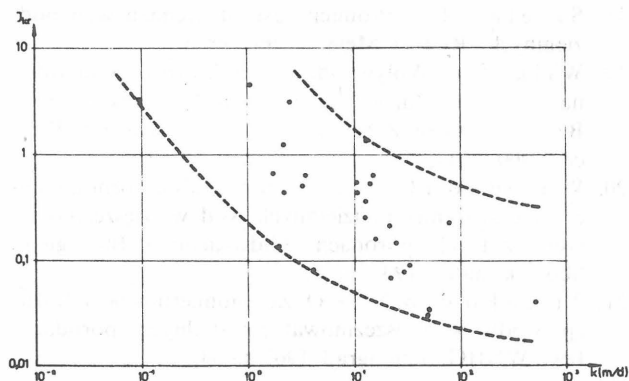
cji ze wzrostem depresji przedstawiono na ryc. 3. Na podstawie tych wykresów można było skonstruować hipotetyczny przebieg uogólnionej krzywej  $k = f(s)$  w trakcie wielostopniowego próbnego pompowania (ryc. 4).

Do wzorów [3] i [9] powinno się wstawiać wartości współczynników filtracji, które zostały obliczone na podstawie pompowań w warunkach ruchu wód podziemnych, zgodnego z liniowym prawem filtracji. Niestety tylko w 5 przypadkach próbnego pompowań spośród 27 poddanych analizie zmiana współczynnika filtracji ze wzrostem depresji odpowiadała początkowemu odcinkowi uogólnionej krzywej  $k = f(s)$ , pokazanej na ryc. 4. W pozostałych przypadkach zmiany współczynnika filtracji ze wzrostem depresji układały się zgodnie ze środkowym lub nawet końcowym odcinkiem wspomnianej krzywej  $k = f(s)$ . Przykłady tego rodzaju zależności pokazano na ryc. 3B.

W przypadkach próbnego pompowań, w których nie wystąpił początkowy odcinek uogólnionej krzywej  $k = f(s)$ , a zatem nie było możliwości określenia współczynnika filtracji, odpowiadającego liniowemu prawu przepływu, do obliczeń krytycznego gradientu hydraulicznego i promienia turbulencji przyjmowano wartość tego współczynnika, obliczoną na podstawie wyników pompowania przy najmniejszej depresji. Przyjęcie takiej zasady postępowania jest przyczyną trudnego do oszacowania błędu w obliczeniu krytycznego gradientu hydraulicznego i promienia turbulencji. Błąd ten może być szczególnie duży w przypadkach próbnego pompowań w tych otworach badawczych, w których zmiana współczynnika filtracji ze wzrostem depresji układała się zgodnie z końcowym odcinkiem krzywej  $k = f(s)$ , jak to przypuszczalnie miało miejsce w otworze BL-120 (ryc. 3B).

Promień lejka depresji w 26 hydrogeologicznych otworach badawczych obliczono za pomocą empirycznego wzoru Sichardta, bowiem były one wykonane bez otworów obserwacyjnych. Pozostały otwór był wykonany jako hydrowęzeł z dwoma otworami obserwacyjnymi i tylko w tym jednym przypadku określono zasięg lejka depresji na podstawie bezpośrednich obserwacji.

Doświadczenia badaczy, zajmujących się problematyką krążenia wód podziemnych w skałach szczelinowych i szczelinowo-krasowych dowodzą, że promień lejka depresji w tych skałach, obliczony za pomocą klasycznych wzorów empirycznych, w tym także i wzoru Sichardta, jest znacznie mniejszy niż określony na podstawie wyników pomiarów w otworach obserwacyjnych (8, 9, 13, 18, 19). W związku z tym, przez wstawienie do wzorów [3] i [9] wartości promienia lejka depresji, obliczonych wzorem Sichardta, z góry



Ryc. 6. Diagram punktowy zależności krytycznego gradientu hydraulicznego ( $J_{kr}$ ) od współczynnika filtracji ( $k$ )

Fig. 6. Point diagram of dependence of critical hydraulic gradient ( $J_{kr}$ ) on permeability ( $k$ )

zakłada się konieczność popełnienia pewnego błędu ze znakiem ujemnym. Jego wielkości nie da się określić bez porównania wartości promieni lejów depresji obliczonych wzorami empirycznymi z rzeczywistymi, pomierzonymi w konkretnych warunkach. Trzeba mieć jednak również i to na uwadze, że we wzorach [3] i [9] zasięg lejów depresji występuje pod znakiem logarytmu, a zatem nawet znaczne błędy w jego określaniu tylko w niewielkim stopniu wpływają na dokładność obliczeń krytycznego gradientu hydraulicznego, a w dalszej kolejności, obliczonego z wzoru [8] promienia turbulencji wokół otworu hydrobadawczego.

Próbnym pompowaniem zostały przeprowadzone przy depresjach mieszczących się w przedziale od 0,1 do 40 m, a zatem bardzo szerokim. Niemniej jednak prawie 60% pompowań było wykonanych przy depresjach mieszczących się w przedziałach od 1 do 5 m, a tylko trzy przy maksymalnych depresjach, przekraczających 20 m. Obliczone wzorami [3] i [9] wielkości krytycznych gradientów hydraulicznych mieściły się w granicach od 0,04 do 4,6 przy czym ponad 80% tych wartości nie przekraczało  $J_{kr} = 1$ . Wielkości promienia strefy nieliniowej filtracji wokół studni, obliczone wzorem [8] mieściły się w przedziale od 0,4 do 5,1 m, przy czym ponad 60% wartości tego promienia nie przekraczało 1 m, nawet przy stosunkowo dużych depresjach (ryc. 5).

Wynika stąd wniosek, potwierdzający pogląd, że strefa odchyłek od liniowego prawa przepływu wód podziemnych zwana potocznie strefą turbulencji ma niewielki zasięg wokół otworu pompowego.

## INTERPRETACJA I DYSKUSJA WYNIKÓW OBLICZEŃ

W niniejszym artykule autorzy zajęli się przede wszystkim zależnością pomiędzy krytycznym spadkiem hydraulicznym a współczynnikiem filtracji, bowiem znając krytyczny gradient można ze wzoru [8] obliczyć interesującą nas wielkość promienia strefy turbulencji wokół otworu pompowego. Związek tych dwóch wielkości przedstawiono na ryc. 6.

Wynika z niej, że nawet przy dużym rozproszeniu punktów zaznacza się wyraźna tendencja do zmniejszania się krytycznego gradientu hydraulicznego ze wzrostem współczynnika filtracji. Wniosek ten pokrywa się z licznymi wynikami badań, usystematyzowanymi przez Macioszczyka (11). Przyczyny dużego rozproszenia punktów na omawianym diagramie są dwójakiego rodzaju. Pierwszy rodzaj przyczyn wiąże się ze wspomnianymi w poprzednim roz-

dziale błędami metodycznymi obliczenia krytycznego gradientu, spowodowanymi koniecznością wstawienia do wzorów [3] i [9] obciążonych błędami wartości współczynników filtracji i promieni lejów depresji.

Drugi rodzaj przyczyn jest związany z niezgodnością podstawowego założenia o jednorodności i izotropowości badanego ośrodka szczelinowo-krasowego z rzeczywistą budową przestrzeni przewodzącej wodę w tego rodzaju skałach. Można nawet przyjąć hipotezę, że stopień rozproszenia punktów na diagramie zależności  $J_{kr} = f(k)$  jest tym większy im bardziej niejednorodny jest badany ośrodek skalny. Skały szczelinowo-krasowe są ośrodkiem wybitnie niehomogenicznym a także, co podkreśla wielu badaczy, anizotropowym. W takim ośrodku wartość współczynnika filtracji zależy od liniowych wymiarów przekroju pustek przewodzących wodę i ich gęstości. Stąd też, w różnych jego punktach możemy w wyniku próbnego pompowania uzyskać identyczną wartość współczynnika filtracji, pomimo znacznych różnic w wymiarach poprzecznych pustek przewodzących wodę. Możemy tu mieć do czynienia z rzadką siecią dużych lub gęstą siecią drobnych pustek. Wielkość krytycznego gradientu hydraulicznego w skałach szczelinowo-krasowych zależy natomiast wyłącznie od liniowych wymiarów pustek skalnych i szorstkości ich ścianek (4, 7, 20, 21). W związku z tym temu samemu współczynniki filtracji mogą odpowiadać znacznie różniące się wartości tego gradientu. Podobne rozważania należy odnieść do wielkości promienia turbulencji.

Przez przyjęcie założenia o jednorodności i izotropowości ośrodka szczelinowo-krasowego, a w konsekwencji, że przepływ odbywa się przez pobocznice walca (ryc. 1, 2) obraz rzeczywistego pola hydrodynamicznego wokół studni znacznie się upraszcza. W dalszej konsekwencji należałoby przyjąć, że najbliższa studni powierzchnia przekroju strumienia nieliniowego przepływu skierowanego ku studni jest także pobocznice walca o promieniu  $r_T$  (ryc. 1, 2). Wiadomo jednak, że w rzeczywistości jest inaczej, ponieważ w systemach hydraulicznych o dużych wymiarach przekroju przepływu strefa filtracji nieliniowej może sięgać znacznie dalej niż to wynika z obliczeń, a z kolei w systemach o małych wymiarach może ona mieć niewielki zasięg. Dlatego też przez „zastępczy promień turbulencji wokół studni” należy rozumieć pewną uśrednioną w sposób naturalny wartość promienia strefy o skomplikowanym kształcie pobocznic.

Trzeba także zaznaczyć, że w przyjętym przez autorów pojęciu „zastępczy promień strefy filtracji nieliniowej wokół studni”, oprócz wymienionych wyżej, mieszczą się także inne zjawiska, których nie można jednak określić w sposób ilościowy bez specjalnych badań, a także takich które można dyskutować tylko na płaszczyźnie teoretycznej. Do najważniejszych z nich należą: efekt pojemności i bezwładności studni, badany przez Bredehoefta i in. (3) oraz Boultona i Streltsova (2), oddziaływanie nierozpoznanych granic pola filtracji, dopływy wody z niezidentyfikowanych źródeł, konstrukcja samej studni itp. Tak więc, zastępczy promień strefy turbulencji, podobnie jak większość parametrów hydrogeologicznych używanych w obliczeniach a określanych metodami polowymi ze współczynnikiem filtracji na czele nie jest cechą „czystą”, lecz ma sens statystyczny i jest wypadkową znanych i nieznanymi czynników częściowo o charakterze losowym, wpływającym na ruch wód podziemnych w strefie przystudziennej.

## LITERATURA

1. B o r e w s k i j L.W. — Uzet niesowierszenstwa skwazin. [W:] Izyskanie i ocena zapasow promyszlennych.

- nych podziemnych wód. Sbornik pod red. S.S. Bondarenki i N.W. Jefremoczkina. Izd. Niedra, Moskwa 1971.
2. Boulton N.S., Streltsova T.D. — The drawdown near an abstraction well of large diameter under non-steady conditions in an unconfined aquifer. *J. of Hydrology*, 1976.
  3. Bredehoeft J.D., Cooper jr. H.H. — Inertial and Storage Effects in Well — Aquifer Systems: An Analog Investigation. *Water Res. Res.* 1966 no. 4.
  4. Chramuszew A.S. — Teoriēticheskiye osnovy grafo-analiticheskogo metoda opriedielenija koeficienta wodoprowodimosti trieszczinowatych i gruboobłomocznych gornych porod. *Gidrogeol. i Inż. geol.* Sbornik statej No 8, Moskwa—Leningrad 1941.
  5. Haładus A., Motyka J. i in. — Prognozowanie metodą modelowania analogowego dopływów wody do kopalń pracujących w skałach szczelinowo-krasowych. *Roczn. Pol. Tow. Geol.* Vol. 48, 1978 z. 3.
  6. Kerkis E.E. — Opriedielenije wodopronicajemosti gornych porod i pritoka wody k wodozaboram pri razwitii turbulentnogo dżiwienija podzemnych wod. *Zap. Leningr. Gorn. Inst. Moskwa—Leningrad* 1956 t. 22.
  7. Kerkis E.E. — Metody izuczenija filtracjonnych swojstw gornych porod. *Izd. Niedra, Leningrad* 1975.
  8. Kleczkowski A.S., Jureczko J., Myszk a J. — Some Hydrodynamic Phenomena in Fissured Triassic and Jurassic Rocks. *Bull. de l'Acad. Pol. des Sci.* vol. 19, 1959 no 3—4.
  9. Krajewski S., Herbich P. — Ocena anizotropii warunków filtracji w skałach szczelinowych na podstawie pomiarów szczelinowatości. *Biul. Geol. Wyd. Geol. UW.* 1977 t. 21.
  10. Krasnopolski A.A. — Gruntowyje i artieżjanskije kołodcy. *Gornyj Żurnał*, 1912 no. 7.
  11. Macioszczyk T. — Zmienność parametrów nieliniowej filtracji wód podziemnych. *Biul. Geol. Wyd. Geol. UW.* 1973 t. 15.
  12. Motyka J., Wilk Z. — Pionowe zróżnicowanie wodoprzepuszczalności węglanowych skał triasowych w świetle statystycznej analizy wyników próbnych pompowań (monoklina śląsko-krakowska). *Kwart. Geol.* 1976 nr 2.
  13. Myszk a J. — Wodonośność jury w rejonie Bato-wic na podstawie głębokich wierceń. *Geotechnika i Hydrogeologia*, 1962 z. 2a.
  14. Pauker N.G. — O pritokie wody k niesowierszen-nym skważinam pri naliczii turbulentnogo i laminarnogo režima filtracji. *Zap. Leningr. Gorn. Inst.* 1958 t. 24.
  15. Pazdro Z. — *Hydrogeologia ogólna.* Wyd. Geol. 1977.
  16. Siwek Z. — Amerykańskie mierniki usprawnienia ujęcia wód podziemnych (cz. 1). *Techn. Posz. Geol.* 1978 nr 6.
  17. Smreker O. — Entwicklung eines Gesetzes für den Widerstand bei der Bewegung des Grundwassers. *Z. des Vereines Deutscher Ingenieure.* 1978 B. 22, H. 5.
  18. Sztelak J. — Promień zasięgu drenażu wód podziemnych. *Rudy i Metale.* 1965 nr 3.
  19. Wilk Z. — Wpływ odtopienia kopalni „Matylda” na stosunki hydrogeologiczne niecki chrzanowskiej. *Biul. Inst. Geol. Z badań hydrogeologicznych w Polsce.* 1960 t. 1.
  20. Wołodko I.F. — K metodikie laboratornogo izuczenija dżiwienija podziemnych wod w trieszczinowatych skalnych porodach. *Gidrogeol. i Inż. geol.* Sbornik statej. 1941 nr 8.
  21. Żilenkow W.N. — O zakonomiornostiach filtracji wody w trieszczinowatych skalnych porodach. *Izw. WNIIG, Leningrad* 1967 t. 84.

## SUMMARY

The paper presents an equation in which the value of critical hydraulic gradient (i.e. gradient corresponding to a transition from laminar movement to the turbulent) occurs in complex form. The equation is proposed using the Kerkis equation for drawdown in well and assuming that there exists turbulent movement zone with a definite radius, the equation for continuity of fluid flow and the Darcy Law as starting points. Using the new equation, critical gradients and radii of zone of turbulent movement are evaluated on the basis of results of test pumpings.

The obtained values of critical hydraulic gradients give further support to the point of view that the zone of turbulence around pumped well is fairly narrow also in fissured-karstified aquifer rocks when drawdowns are moderately large. The analysis of correlation of critical hydraulic gradient and permeability showed that the former decreases in irregular (nonlinear) way along with increase of the latter.

## РЕЗЮМЕ

Исходя из уравнения Керкиса на величину депрессии колодца и принимая существование зоны турбулентного движения с определенными радиусами, а также из уравнения неразрывности потока жидкости и закона Дарси, авторы выводят зависимость, в которой в неявной форме находится величина критического гидравлического градиента, т.е. такого, который соответствует переходу движения из ламинарного в турбулентное. При помощи этой зависимости, на основании результатов опытного качания, авторы определили критические градиенты и радиусы зоны турбулентции.

Величины критических гидравлических градиентов подтверждают мнение, что зона турбулентции вокруг колодца, при небольших депрессиях, также в трещинно-карстовых породах имеет небольшую дальность. Авторы исследовали коррелятивную связь между критическим гидравлическим уклоном и коэффициентом фильтрации. Они приходят к выводу, что критический градиент криволинейно уменьшается с увеличением коэффициента фильтрации.