

dr inż. Andrzej Kotowski

Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska
Politechniki Wrocławskiej

PROGNOZOWANIE WYDAJNOŚCI NIEINFILTRACYJNYCH UJĘĆ PROMIENISTYCH WODY

Ujęcia promieniste stanowią alternatywę dla tradycyjnego sposobu ujmowania wody podziemnej za pomocą studzien wierconych bądź kopanych. W określonych warunkach hydrogeologicznych mogą okazać się rozwiązaniem znacznie bardziej ekonomicznym w porównaniu do grupowych ujęć studziennych, równoważnych pod względem wydajności. Dotyczy to zwłaszcza warunków niewielkiej miąższości warstwy wodonośnej rzędu kilku do kilkunastu metrów [1, 9, 16]. Prezentowane w niniejszej pracy wybrane wyniki badań modelowych ujęć promienistych dotyczą takich właśnie warunków hydrogeologicznych lokalizacji ujęcia. Prognozowanie wydajności ujęć promienistych wody podziemnej przedstawia znaczną trudność, gdyż mimo istnienia wielu wzorów teoretycznych — jak np.: Citriniego, Abramova czy Wieczystego, bądź też empirycznych, np.: Falckego czy Offerhausza, obliczane na ich podstawie wydajności odbiegają najczęściej od rzeczywistych [13, 14, 16]. Rozbieżności między rezultatami pompowań i obliczeń (prognozy) wynikają m. in. z ograniczeń i uproszczeń modelowych, jak też z trudności w analitycznym rozwiązywaniu tego problemu. Ten stan rzeczy utrudnia wybór racjonalnych w danych

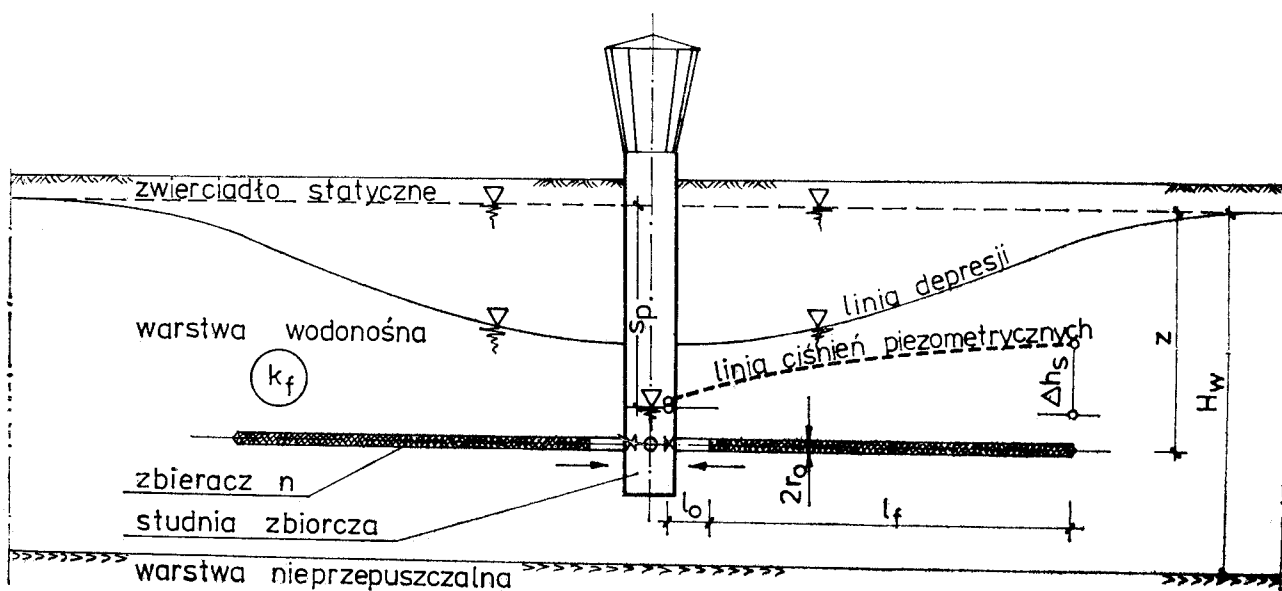
warunkach hydrogeologicznych (mała wysokość warstwy wodonośnej) parametrów konstrukcyjnych ujęcia, zwłaszcza długości, liczby i średnicy rur filtrowych. Wynika stąd konieczność kontynuowania badań na modelach fizycznych w celu uzyskania dokładniejszego opisu charakterystyk hydraulicznych tego typu ujęć.

Modelowanie fizyczne ujęć promienistych

Wydajność Q_u ujęcia promienistego zlokalizowanego w zbiorniku wód podziemnych o zwierciadle swobodnym (rys. 1) jest funkcją wielu zmiennych, które charakteryzują bądź to warunki hydrogeologiczne (H_w , k_f) czy eksploatacyjne (s , s_p) bądź też konstrukcję ujęcia:

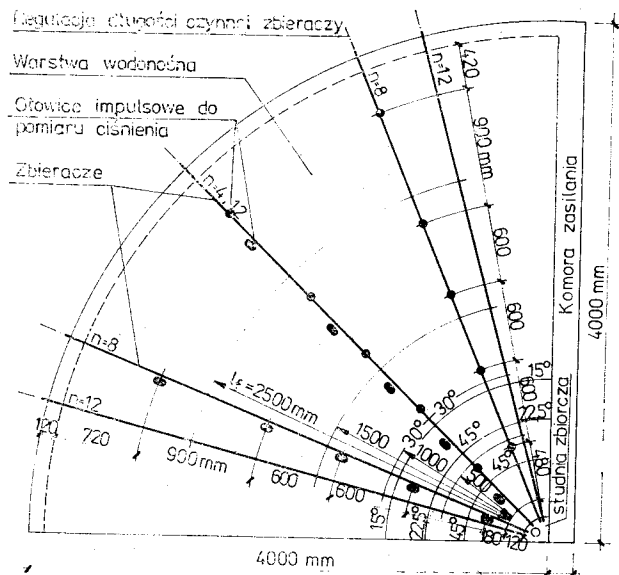
$$Q_u = F(H_w, k_f, s, s_p, l_f, n, r_0, z, \dots) \quad (1)$$

Wielkości te, za wyjątkiem depresji pozornej s_p , występują w większości znanych dotychczas wzorów na wydajność tego typu ujęć, aczkolwiek w różny sposób są w nich ujmowane [1, 7, 8, 13, 16].



Rys. 1 Schemat ujęcia promienistego wody podziemnej w warunkach małej miąższości warstwy wodonośnej

Celem badań podjętych w Instytucie Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej było określenie wpływu na wydajność wybranych parametrów konstrukcyjnych (l_f , n , z) i eksploatacyjnych (s_p) ujęcia promienistego, w warunkach jednorodnej i izotropowej warstwy wodonośnej o możliwie minimalnej wysokości H_w . Stanowisko doświadczalne, wybudowane w skali geometrycznej 1:25, przedstawiono schematycznie na rys. 2.



Rys. 2 Schemat stanowiska doświadczalnego

Zasadniczym elementem modelu jest zbiornik główny przedstawiający czwartą część obszaru geofiltracji, w którym zlokalizowano studnię zbiorczą ujęcia z symetrycznie rozmieszczonymi ($n=4, 8$ i 12) na dwóch poziomach zbieraczami. Warstwa wodonośna ma wysokość $H_w=360$ mm (9 m w skali naturalnej), umożliwiającą zabudowę zbieraczy na głębokości $z=120$ i 240 mm (3 i 6 m). Zbieracze wykonano z rur mosiężnych o wewnętrznej średnicy $2r_o \approx 10$ mm (0,250 m). Perforację zbieraczy stanowiły otwory okrągłe o średnicy 4 mm rozmieszczone w szachownicę. Stopień przepuszczalności ścian zbieraczy wynosi ca 0,20. Rury filtrowe owinięto podwójną warstwą siatki o splocie kwadratowym $\square 1/1$ mm i pojedynczą warstwą bandaży elastycznego. Warstwy te stanowią modelowy filtr naturalny średnicy ca 20 mm (0,50 m). Zmianę długości czynnej zbieraczy $l_f=500$ (12,5), 1000 (25,0), 1500 (37,5) i 2500 mm (62,5 m) uzyskiwano za pomocą prętów i uszczelki wprowadzanych do wnętrza rur filtrowych. System teleskopowych przelewów w komorze zasilania i w studni zbiorczej umożliwiał utrzymanie ustalonego reżimu filtracji — $s_p=40 \div 200$ mm (1,0 ÷ 5,0 m). W obszarze geofiltracji, w tym bezpośrednio przy zbieraczach oraz wewnątrz zbieraczy mierzono ciśnienie piezometryczne przy zastosowaniu punktowych głowic impulsowych (rys. 1).

Warstwę wodonośną modelu stanowił piasek średnioziarnisty ($d_{10}=0,215$ mm, $d_{60}=0,360$ mm,

$d_{60}=0,400$ mm) charakteryzujący się ustabilizowanym składem granulometrycznym ($U=1,86$) oraz znaczną porowatością ($n_p=37,5\%$). Współczynnik filtracji gruntu określono w wysokości $k_f=3,73 \cdot 10^{-4}$ m/s, tj ca 32,2 m/d metodą próbnych pompowań w modelu. Badania identyfikujące oraz wzorcujące złoza i zbieraczy [3] były niezbędne do przeniesienia rezultatów badań modelowych do natury.

W oparciu o teorię podobieństwa mechanicznego i analizę wymiarową ustalono następującą postać wzoru strukturalnego na prowadzoną wydajność ujęcia:

$$\frac{Q_u}{k_f r_o^2} = f(n, l_f/r_o, z/r_o, H_w/r_o, s_p/r_o) \quad (2)$$

— która po uszczegółowieniu przyjmuje postać:

$$\frac{Q_u}{k_f r_o^2} = Y n^{x_1} (l_f/r_o)^{x_2} (z/r_o)^{x_3} (s_p/r_o)^{x_4} \quad (3)$$

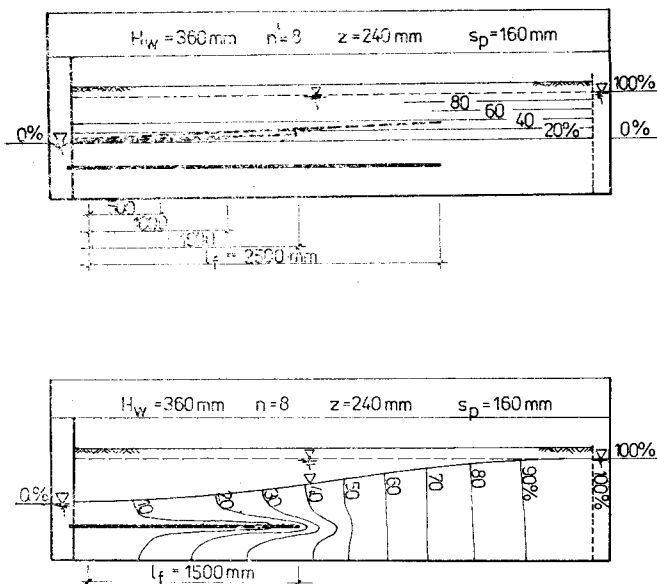
dla $H_w/r_o = \text{const}$.

Zapis (2) umożliwia dokonanie analizy jakościowej wpływu na wydajność poszczególnych parametrów geometrycznych ujęcia, natomiast postać wzoru (3) umożliwia ilościowy opis zjawiska po doświadczalnym ustaleniu wartości współczynników ($Y, x_1 \div x_4$).

Analiza wyników badań modelowych

Zmiany depresji w studni zbiorczej ujęcia podlegają ukształtowanie się w modelu określonych stanów równowagi energetycznej dopływu wody do zbieraczy. Stany te zależą przede wszystkim od parametrów charakteryzujących straty hydrauliczne w złożu filtracyjnym i w zbieraczach, tzn. od współczynnika filtracji warstwy wodonośnej k_f oraz długości l_f i średnicy $2r_o$ zbieraczy. Na straty hydrauliczne w zbieraczach składają się straty powstające na przepływie wody przez filtr naturalny, bądź przez obsypkę filtracyjną wokół rur filtrowych Δh_f , oraz straty wewnątrz zbieraczy Δh_s , powstałe wskutek przepływu o zmiennej masie, energii i średniej prędkości głównego strumienia wody, na długości perforowanej części zbieracza wraz ze stratami na odcinku pełnościennym i na wypływie wody do studni zbiorczej. Dla określonej wartości współczynnika filtracji złoza ($k_f=32,2$ m/d) i przyjętej średnicy zbieraczy ($2r_o \approx 10$ mm), obraz równowagi energetycznej w modelu zależy przede wszystkim od długości zbieraczy. Stosunek strat ciśnienia na przepływie w gruncie do strat energetycznych powstających w zbieraczach ma bezpośredni wpływ na wielkość i rozmieszczenie dopływów bocznych wzdłuż rur filtrowych, a także pośredni na wydajność ujęcia [3, 10]. Dla celów analizy wygodniej posługiwać się tutaj stosunkiem strat energetycznych, powstających wewnątrz zbieraczy do depresji pozornej $\Delta h_s/s_p$. Przyjmując energię depresji za 100%, straty wewnątrz zbieraczy za $x\%$, to wielkość $(100-x)$, wyrażona w procentach, określa stra-

tę ciśnienia w gruncie. Dla ilustracji na rysunku 3 przedstawiono przykładowe wykresy pomierzonego ciśnienia piezometrycznego wewnątrz rur filtrowych dla $l_f=500$; 1000; 1500 i 2500 mm oraz $n=8$ zbieraczy a także odpowiadające tej liczbie zbieraczy i $l_f=1500$ mm — rozkłady linii ekwipotencjalnych w złożu filtracyjnym ($H_w=360$ mm, $s_p=160$ mm, $z=240$ mm).

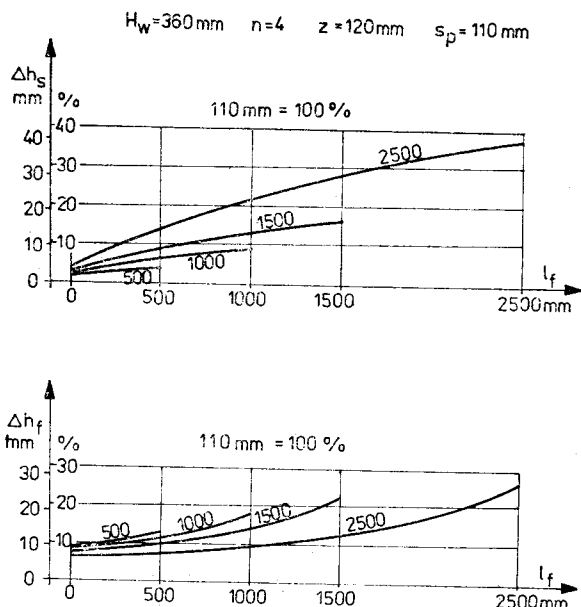


Rys. 3 Rozkłady ciśnień piezometrycznych wewnątrz zbieraczy na ich długości (wykres górny) oraz układy linii ekwipotencjalnych w złożu filtracyjnym modelu (wykres dolny)

Analiza tych wykresów upoważnia do sformułowania tezy o nierównomiernym dopływie wody na długości zbieraczy. W szczególności dopływ ten jest większy przy głowicy zbieracza w porównaniu do dopływu przy studni zbiorczej o czym świadczy procentowa wartość jak i kształt linii stałego potencjału. Stosunek $\Delta h_s/s_p$ jest przy tym zawsze mniejszy od 0,5, innymi słowy procentowy udział strat powstających wewnątrz zbieraczy jest niższy od udziału strat w gruncie — na dopływie wody do zbieraczy. Szczegółową ilustrację zaobserwowanego zjawiska przedstawiono graficznie na rysunku 4.

Wykresy górne przedstawiają różnice ciśnienia piezometrycznego, pomierzonego w bezpośrednim otoczeniu zbieraczy i w ich wnętrzu — $\Delta h_f(l_f)$ dla $l_f=500$, 1000, 1500 i 2500 mm, natomiast wykresy dolne — odpowiadające tym l_f straty energetyczne $\Delta h_s(l_f)$ wewnątrz zbieraczy ($H_w=360$ mm, $s_p=110$ mm, $z=120$ mm, $n=4$).

Nierównomierność rozumiana jako stosunek jednostkowego dopływu wody do zbieracza ($l_{fi}=100$ mm) na jego końcu (przy studni zbiorczej), do jednostkowego dopływu wody na początku zbieracza (przy głowicy) zależy przede wszystkim od długości rur filtrowych i wynosi od ca 1:1,5 dla $l_f=500$ mm (12,5 m w naturze) do ca 1:4 dla $l_f=2500$ mm (62,5 m) i $n=4$ zbieracze. Ekstremalnie dla $l_f=2500$ mm



Rys. 4 Rozkłady ciśnień piezometrycznych pomierzonych wewnątrz zbieraczy (wykres górny) oraz odpowiadające im różnice ciśnień piezometrycznych pomierzonych przy zbieraczach i w ich wnętrzu na długości rur filtrowych (wykres dolny)

i $n=12$ nierównomierność przyjmowała wartość ca 1:5.

Zagłębienie z zbieraczy i depresja s_p miały niewielki wpływ na omawiane zjawisko.

Wynikający z określonego stanu równowagi energetycznej w modelu nierównomierny dopływ wody do zbieraczy miał istotny wpływ na określone na podstawie analizy zależności funkcyjne (2) — umożliwiające przeprowadzenie analizy wpływu na wydajność podstawowych parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych ujęcia. Dla przykładu na rys. 5 przedstawiono zależność sprowadzonej wydajności $Q_u/k_f r_o^2$ ujęcia od liczby n rur filtrowych oraz sprowadzonej długości l_f/r_o zbieraczy ($H_w=360$ mm, $s_p=160$ mm, $z=240$ mm). W szczególności analiza tych wyników pozwala stwierdzić, iż długość zbieraczy ma istotniejszy wpływ na wydajność niż ich liczba.

Przyjmując za punkt odniesienia wydajność, np.: przy $n=4$ i $l_f/r_o=100$ to trzykrotny wzrost liczby zbieraczy ($n=12$, $l_f/r_o=100$) spowoduje ca 54-procentowy wzrost wydajności ujęcia. Analogicznie, przy trzykrotnym zwiększeniu długości zbieraczy tj. do $l_f/r_o=300$ i $n=4$ wydajność wzrośnie już o ca 116%, w porównaniu do przyjętego punktu odniesienia. W obu przypadkach sumaryczna długość rur filtrowych jest identyczna.

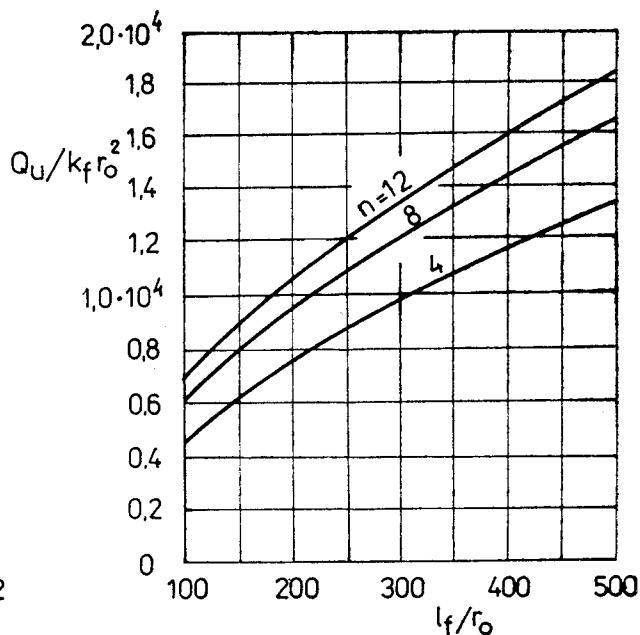
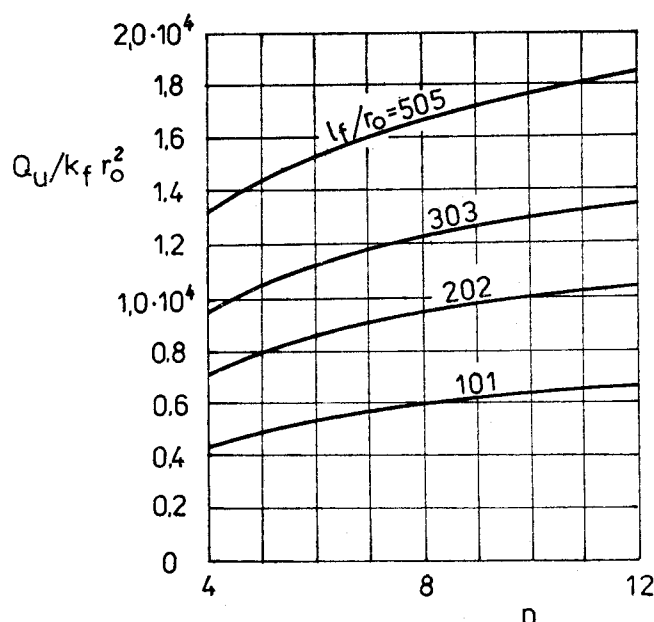
Wpływ depresji pozornej w studni zbiorczej na wydajność był zbliżony do zależności liniowej ze względu na zmiany liczby i długości zbieraczy.

Analizowane parametry konstrukcyjne ujęcia promienistego mają istotny wpływ na jego koszt budowy. Wybór tych parametrów zależy w pierwszym rzędzie od projektowanej wydajności ujęcia; nie mniej jednak przytoczona powyżej analiza wpływu l_f i n na Q_u , przy

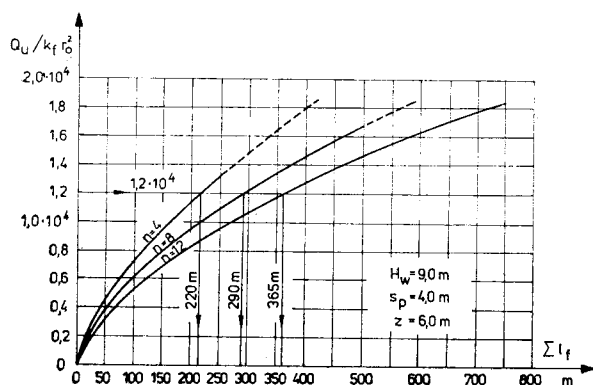
$$H_w/r_o=72,7$$

$$z/r_o=48,5$$

$$s_p/r_o=32,3$$



Rys. 5 Zależność sprowadzonej wydajności ujęcia od liczby zbieraczy oraz sprowadzonej długości czynnej rur filtrowych



Rys. 6 Zależność sprowadzonej wydajności ujęcia od sumarycznej długości czynnej zbieraczy

uwzględnieniu zjawiska nierównomiernego dopływu wody do zbieraczy, przemawia za wyborem mniejszej liczby dłuższych rur filtrowych. Miarodajna jest w tym względzie niezbędna sumaryczna długość zbieraczy. Na rysunku 6 przedstawiono przykład takiej właśnie analizy wyników badań modelowych po sprowadzeniu ich do natury.

Projektując ujęcie o wydajności np.: $Q_u / (k_f \cdot r_o^2) = 1,20 \cdot 10^4$ przy $s_p = 4,0$ m możliwe jest więc przyjęcie $n=4$ zbieraczy o długościach $l_f = 55,0$ m i długości sumarycznej $\Sigma l_f = 220$ m (przy parametrach: $l_o = 3$ m, $r_o = 0,125$ m, $z = 6,0$ m i $H_w = 9,0$ m). Zastosowanie w tym przypadku $n=12$ zbieraczy wymaga $l_f = 30,4$ m i długości sumarycznej rur filtrowych $\Sigma l_f = 365$ m, tj. o ca 66% więcej. Na tym etapie rozważań konieczne staje się dokonanie obliczeń chłonności ujęcia ze względu na nieprzekroczenie dopuszczalnych prędkości wlotowych wody na granicy filtra naturalnego bądź obsypki filtracyjnej

wokół zbieraczy, przy uwzględnieniu spodziewanej nierównomierności dopływu wody, która w obu analizowanych przypadkach jest porównywalna i wynosi ca 1:3,6. Biorąc pod uwagę średnią wartość obciążenia hydraulicznego zbieraczy, wówczas na odcinkach początkowych dopływ przyjmował będzie ca dwukrotną wartość średniej, natomiast na odcinkach przy studni zbiorczej będzie około dwukrotnie mniejszy od średniego obciążenia hydraulicznego zbieraczy. Ma to pewien wpływ na „żywność” zbieraczy [16].

Interesujące z punktu widzenia projektowania tego typu ujęć są wyniki badań współczynnika α wzajemnego oddziaływania zbieraczy, który zdefiniowano następująco:

$$\alpha = \frac{q_{(n)}}{q_{(4)}} \quad (4)$$

gdzie:

$q_{(n)}$ — wydajność pojedynczego zbieracza pracującego w zespole n zbieraczy ($n=8, 12$)
 $q_{(4)}$ — wydajność pojedynczego zbieracza pracującego w zespole czterech zbieraczy ($n=4$).

Wyniki obliczeń współczynnika α wg wzoru (4) upoważniają do stwierdzenia, iż wzajemne oddziaływanie rur filtrowych zależy głównie od liczby zbieraczy na ujęciu i przyjmuje wartość $\alpha = 0,66 \div 0,72$ dla $n=8$ oraz $\alpha = 0,48 \div 0,55$ dla $n=12$ zbieraczy, praktycznie niezależnie od ich długości. Wyniki tych badań zachowują swą ważność przy założeniu, że przy $n=4$ nie ma wzajemnego oddziaływania zbieraczy ($\alpha = 1,0$). Powyższe założenie jest konsekwencją przyjętego kształtu modelu (czwarta część walca) i przyjętej minimalnej liczby zbieraczy na ujęciu.

Interpretacja i ogólnienie wyników badań

Przedstawiony powyżej obraz działania modelowego ujęcia promienistego wody można odnieść do warunków naturalnych przy pomocy odpowiednich skal podobieństwa [3, 4, 5]. Różnicę przy tym należy odmienny charakter przepływu wody w gruncie i wewnątrz zbieraczy przy zachowaniu dla obu przypadków prawa ciągłości ruchu. Spełnienie warunków ciągłości, a także liniowego prawa filtracji w gruncie oraz przyjęcie kryterium Froude'a odnośnie do przepływu w zbieraczach umożliwia wyprowadzenie odpowiednich skal podobieństwa. Ponieważ geometryczne wymiary modelu określone są za pomocą jednej skali ξ_l , to spadki hydrauliczne J są modelowane w skali 1:1.

Korzystając z prawa Darcy możemy napisać:

$$\xi_v = \xi_{kf} \cdot \xi_J \text{ przy czym: } \xi_J = 1 \quad (5)$$

— z kryterium Froude'a:

$$\xi_v = \xi_l^{0,5} \cdot \xi_g^{0,5} \text{ przy czym: } \xi_g^{0,5} = 1 \quad (6)$$

— z prawa ciągłości ruchu:

$$\xi_{Qu} = \xi_l^2 \cdot \xi_{kf} \text{ lub} \quad (7)$$

$$\xi_{Qu} = \xi_l^2 \cdot \xi_l^{0,5} \quad (8)$$

Relacje (6) i (8) są prawdziwe przy równości współczynników oporów liniowych λ i λ_p zbieraczy w modelu i w rzeczywistości, tj. przy: $\xi\lambda = 1$ i $\xi\lambda_p = 1$. Ponieważ $\lambda = f_1(Re)$ i $\lambda_p = f_2(Re)$ — to wartości liczbowe tych współczynników są różne w naturze i modelu. Stąd relacje (6) i (8) przyjmują postać ogólniejszą:

$$\xi_v = \xi_l^x \quad (6a)$$

$$\xi_{Qu} = \xi_l^{2+x} \quad (8a)$$

Wartość nieznanego a priori wykładnika potęgowego „x” należy określić doświadczalnie, poprzez ustalenie wartości v_N/v_M , dla której stosunek strat hydraulicznych w zbieraczach Δh_{sN} — w skali naturalnej do strat Δh_{sM} — w skali modelowej równy jest skali geometrycznej modelu $\xi_l = 25$. Do obliczeń numerycznych wysokości strat energetycznych wewnątrz zbieraczy wykorzystano wzór wyjściowy w postaci [3, 15]:

$$\Delta h_s = \left(1 + \lambda \frac{1_o}{2r_o} \right) \frac{v_k^2}{2g} + \sum_{i=1}^k \left\{ \left(v_i^2 - v_{i-1}^2 \right) \frac{1,86}{2g} + \lambda_{pi} \frac{1_{fi}}{2r_o} \frac{v_i^2}{2g} \left[\left(\frac{v_{i-1}}{v_i} \right)^2 + \frac{v_{i-1}}{v_i} + 1 \right] \frac{1}{3} \right\} \quad (9)$$

W tym celu perforowaną część zbieracza dzielono na k odcinków jednostkowych o długości $l_{fi} = 100$ mm ($ke < 5$, $25 >$ szt.), na których dopływ boczny do zbieraczy mógł być traktowany jako równomierny. Następnie określano wysokość strat hydraulicznych Δh_{fi} (l_{fi}) i jednostkowy dopływ boczny q_i (l_{fi}), na podstawie którego obliczano prędkość v_i przepływu wody w końcowym przekroju odcinków jednostkowych zbieraczy. Współczynniki oporów linio-

wych λ i λ_p zbieraczy w skali naturalnej (ruch burzliwy) określano ze wzorów Siwonia [3, 15]:

$$\lambda = \left[-2 \log \left(\frac{5,28}{Re^{0,89}} + 0,269 \frac{k_z}{2r_o} \right) \right]^{-2} \quad (10)$$

$$\lambda_p = \left\{ -2 \log \left[\frac{5,28}{Re^{0,89}} + 0,269 \left(0,282 \varphi^{2,40} + \frac{k_z}{2r_o} \right) \right] \right\}^{-2} + 0,0106 \varphi^{0,413} \text{ przy:} \quad (11)$$

$$k_z/2r_o = 0,00606 \quad (k_z = 0,0015 \text{ m})$$

— a w skali modelowej (ruch laminarny, przejściowy i burzliwy) z odpowiednich wzorów przedstawionych w pracach [3, 4, 6]:

$$300 < Re \leq 2260$$

$$\lambda = 64,045/Re^{0,996} \quad (12)$$

$$\lambda_p = 70,312/Re^{0,939}$$

$$2260 < Re \leq 3400 \quad (13)$$

$$\lambda = (27,7 \log^2 Re - 197,3 \log Re + 356,1)^{-2} \quad (14)$$

$$\lambda_p = (57,7 \log^2 Re - 404,3 \log Re + 712,3)^{-2} \quad (15)$$

$$3400 < Re \leq 22100$$

$$\lambda = \left[-2 \log \left(\frac{5,28}{Re^{0,89}} + 269 \frac{k_z}{2r_o} \right) \right]^{-2} \quad (10)$$

$$\lambda_p = \left\{ -2 \log \left[\frac{5,28}{Re^{0,89}} + 269 \left(1,56 \varphi^{2,60} + \frac{k_z}{2r_o} \right) \right] \right\}^{-2} + 0,0204 \varphi^{0,83} \text{ dla: } k_z/2r_o = 0,00035. \quad (16)$$

Dodatkowym sprawdzianem obliczeń Δh_{sM} były pomiary w modelu. Ze względu na znaczną zmienność wartości λ_{pM} na długości zbieraczy w porównaniu do wartości λ_{pN} ścisłe rozwiązanie zadania nie było możliwe [3]. Średnie wartości λ_{pM} były relatywnie wyższe od średnich λ_{pN} . Stąd też najmniejsze odchylenia wyników pomiarów i obliczeń strat hydraulicznych Δh_s ($\pm 10\%$) uzyskano dla stosunku $v_N/v_M = 5,50$, skąd wartość wykładnika potęgowego „x” w relacji (6a) i (8a) wyniesie 0,530.

Charakterystyki hydrauliczne pomierzone na modelu można odnieść do natury, przy zachowaniu podobnego jak w modelu stosunku strat energetycznych w zbieraczach do depresji, tj. dla $r_{oN} = 0,125$ m i $k_{fN} = 2,05 \cdot 10^{-3}$ m/s, a wydajności modelowego ujęcia wody przeliczyć można na wielkości naturalne za pomocą zależności (8a), postaci:

$$Q_{uN} = 3437,5 \cdot Q_{uM} \quad (17)$$

Uogólnienie wyników badań modelowych przedstawiono w postaci formuły (3) na sprowadzoną wydajność nieinfiltracyjnego ujęcia promienistego wody:

$$\frac{Q_u}{k_f r_o^2} = 7,55 n^{0,350} (l_f/r_o)^{0,621} (z/r_o)^{-0,075} (s_p/r_o)^{0,940} \quad (18)$$

Wartości liczbowe współczynników empirycznych w formule (18) wyznaczono za pomocą regresji wielokrotnej stosując metodę mnożników Gaussa [3]. Formuła (18) odzwierciedla wyniki pomiarów na modelu z dokładnością $\pm 5\%$. Dokładność ta może być osiągnięta przy praktycznym jej zastosowaniu pod warunkiem nieprzekroczenia granic stosowności i założeń wynikających z zakresu przeprowadzonych badań, a mianowicie:

$$\begin{aligned} 4 &\leq n \leq 12 \\ 101,01 &\leq l_f/r_o \leq 505,05 \\ 24,24 &\leq z/r_o \leq 48,48 \\ 8,08 &\leq s_p/r_o \leq 40,40 \\ H_w/r_o &= 72,73 \end{aligned}$$

— przy czym: $r_o = 0,125$ m.

Po dokonaniu przekształceń ze względu na stałą wartość parametru r_o formuła (18) przyjmuje postać dogodną do zastosowań praktycznych:

$$Q_u = 2,58 k_f n^{0,350} l_f^{0,621} z^{-0,075} s_p^{0,940} \quad (19)$$

— przy ograniczeniach:

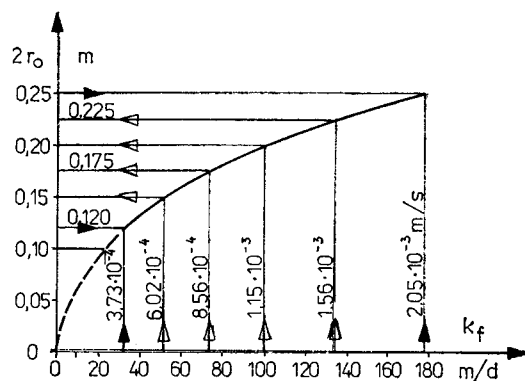
$$\begin{aligned} 4 &\leq n \leq 12 \\ 12,5 &\leq l_f \leq 62,5 \text{ m} \\ 3,0 &\leq z \leq 6,0 \text{ m} \\ 1,0 &\leq s_p \leq 5,0 \text{ m} \\ H_w &= 9,0 \text{ m}. \end{aligned}$$

Ponieważ stosunek strat energetycznych w zbieraczach do depresji determinuje stan równowagi energetycznej dopływu wody do zbieraczy (decydujący m. in. o wielkości i rozkładzie natężeń dopływu wody do rur filtrowych) istnieje również odmienna nie mniej dokładna, interpretacja wyników badań. Przyjmując, że $k_{fN} = k_{fM} = 3,73 \cdot 10^{-4}$ m/s pomierzone w modelu stosunki strat spełnia w naturze $r_{oN} = 0,060$ m ($r_{oN} \in <0,059, 0,062>$ m). Wówczas $\xi_{vf} = \xi_{kf} = 1$ oraz wydajność z równania (7) — $Q_{uN} = 625 Q_{uM}$ [5].

Fakt ten umożliwia wykorzystanie zmierzonych na modelu charakterystyk hydraulicznych ujęcia dla pośrednich wartości współczynnika filtracji warstwy wodonośnej $k_{fN} \in <3,73 \cdot 10^{-4}, 2,05 \cdot 10^{-3}>$ m/s i odpowiednio dla średnicy zbieraczy $2r_{oN} \in <120, 250>$ mm. Dla danej wartości współczynnika filtracji k_f gruntu wymóg podobnych jak w modelu stosunków $\Delta h_s/s_p$ spełnia określona średnica $2r_o$ zbieracza. Zalecenia w tym względzie przedstawiono na rysunku 7.

W przypadku zastosowania większej średnicy zbieraczy, niż to podano na rysunku 7 — dla określonej wartości k_f gruntu można oczekiwać nieznacznego wzrostu wydajności ujęcia w porównaniu z oszacowaniem wg wzoru (19), ze względu na zmniejszenie się udziału strat w zbieraczach w całkowitej energii depresji. Przykład zastosowania:

Należy zaprojektować ujęcie o wydajności rzędu $0,116$ m³/s ($10\,000$ m³/d). Dla war-

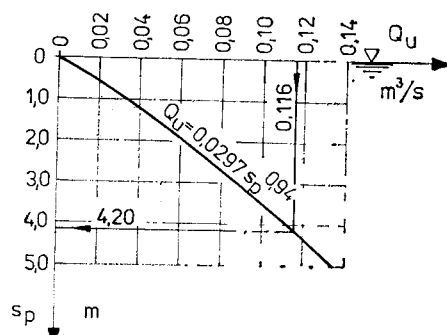


Rys. 7 Sposób doboru średnicy $2r_o$ zbieraczy dla podobnego jak w modelu stosunku $\Delta h_s/s_p$

tości współczynnika filtracji gruntu $k_f = 6,0 \cdot 10^{-4}$ m/s (ca 52 m/d) i miąższości warstwy wodonośnej H_w rzędu $8 \div 10$ m dobrano średnicę zbieraczy $2r_o = 0,15$ m (rys. 7). Przyjęto przy tym następujące parametry konstrukcyjne ujęcia:

- liczba zbieraczy $n = 6$ szt.
- długość perforowanej części zbieraczy $l_f = 47,0$ m
- długość pełnościennej części zbieracza $l_o = 3,0$ m
- zagłębienie zbieraczy $z = 6,0$ m.

Charakterystykę wydajności przykładowego ujęcia promienistego $Q_u = f(s_p)$ dla powyższych danych określono ze wzoru (19) i przedstawiono graficznie na rys. 8. Żadana wydajność ujęcia $Q_u = 0,116$ m³/s osiągnie się przy depresji $s_p = 4,20$ m.



Rys. 8 Charakterystyka wydajności promienistego ujęcia wody do przykładu obliczeniowego (dane w tekście)

Wnioski

Prezentowane wyniki badań modelowych ujęcia promienistego, zlokalizowanego w zbiorniku wód podziemnych, o zwierciadle swobodnym, w warunkach niewielkiej wysokości warstwy wodonośnej pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Działaniu ujęć promienistych wody podziemnej towarzyszy nierównomierny dopływ wody do zbieraczy, zależny przede wszystkim od ich długości, a wynikający między innymi ze specyfiki zasilania ujęcia.

2. Spośród parametrów konstrukcyjnych ujęć promienistych najistotniejszy wpływ na prognozę wydajności ma długość i liczba zbieraczy.

3. Prezentowana formuła empiryczna (19) umożliwia wybór odpowiednich wartości parametrów konstrukcyjnych, a także dokonanie poprawnej fizykalnie oceny wpływu podstawowych parametrów konstrukcyjnych (l_f , n , z) i eksploatacyjnych (s_p) ujęcia promienistego na jego wydajność przy zachowaniu w naturze podobnych jak w modelu stosunków $\Delta h_s/s_p$, jak też ograniczeń wynikających z zakresu przeprowadzonych badań modelowych.

4. Prezentowane wyniki badań modelowych powinny być poddane weryfikacji w warunkach naturalnych.

Ważniejsze oznaczenia stosowane w pracy

g — przyspieszenie ziemskie, m^2/s
 Δh_f — wysokość strat hydraulicznych wywołanych przepływem wody przez filtr naturalny bądź obsypkę filtracyjną wokół rury filtrowej, m
 Δh_s — wysokość strat hydraulicznych wywołanych przepływem wody wewnątrz perforowanego i pełnościennego odcinka zbieracza, łącznie ze stratami na wypływie wody do studni zbiorczej, m
 k_f — współczynnik filtracji, m/s
 l_f — długość perforowanej (filtrowej) części zbieracza, m
 l_o — długość pełnościennej (zafiltrowej) części zbieracza, m
 n — liczba zbieraczy
 r_o — wewnętrzny promień zbieracza, m
 s — depresja na zewnątrz studni zbiorczej, m
 s_p — depresja w studni zbiorczej, m
 v_i — średnia prędkość przepływu na końcu odcinka jednostkowego zbieracza, m/s
 v_{i-1} — średnia prędkość przepływu na początku odcinka jednostkowego zbieracza, m/s
 v_f — średnia prędkość filtracji, m/s
 v_k — średnia prędkość przepływu na końcu zbieracza, m/s
 z — zagłębienie zbieracza w stosunku do poziomu hydrostatycznego, m
 Fr — liczba Froude'a
 H_w — miąższość (wysokość) warstwy wodonośnej, m
 Q_u — wydajność ujęcia, m^3/s
 α — współczynnik wzajemnego oddziaływania zbieraczy

λ — współczynnik oporów liniowych w pełnościennej części zbieracza

λ_p — współczynnik oporów liniowych w perforowanej części zbieracza

ξ_{kf} — skala współczynnika filtracji: $\xi_{kf} = k_{fN}/k_{fM}$

ξ_1 — skala geometryczna (długości): $\xi_1 = l_N/l_M$

ξ_v — skala prędkości: $\xi_v = v_N/v_M$

ξ_{Qu} — skala wydajności: $\xi_{Qu} = Q_{uN}/Q_{uM}$

M — wielkość w skali modelowej; N — wielkość w skali naturalnej.

LITERATURA

1. P. A. ANATOLIEVSKIJ, G. A. RAZUMOV: Go-rizontalnyje vodozabornyje skvażiny. Izdatiel'stvo Nedra, Moskva 1970.
2. K. HÜNERBERG: Untersuchungen an Horizontalfilterbrunnen im Berliner Raum. GWF Wasser. Nr 34, 1959.
3. A. KOTOWSKI: Badania modelowe wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych infiltracyjnych ujęć promienistych wody na nich wydajność. Praca doktorska. Politechnika Wrocławska, Wrocław 1980.
4. A. KOTOWSKI: Modelowanie fizyczne infiltracyjnych ujęć promienistych wody. Arch. Hydrotech. t. XXIX, Nr 3, 1982 r.
5. A. KOTOWSKI: Podstawy modelowania fizycznego promienistych ujęć wody. Mat. IV Konferencji Naukowej PAN nt. Matematyczne modelowanie ujęć wody podziemnej. Janowice 1982.
6. A. KOTOWSKI, Z. SIWON: O laminarnym i przejściowym przepływach cieczy w rurach perforowanych. Arch. Hydrotech. t. XXVIII, Nr 1, 1981.
7. G. LASS: Berechnungsverfahren für Horizontalfilterbrunnen. Wasser und Boden. Nr 2, 1977.
8. K. LAUDA: Beitrag zur Berechnung von Horizontalfilterbrunnen. Wasserwirtschaft — Wassertechnik. Nr 3, 1961.
9. E. W. MIELCARZEWICZ: O czynnikach określających warunki pracy i wydajności ujęcia promienistego. Prace naukowe Politechniki Wrocławskiej, Nr 9, Wrocław 1971.
10. G. NAHRGANG, F. K. FALCKE: Modellversuche über die Strömungsvorgänge an Horizontalbrunnen. GWF Wasser 95 Jahrg. Nr 4, 1954.
11. E. NEMECEK: Horizontalfilterbrunnen zur Grundwassergewinnung. Wasserwirtschaft — Wassertechnik. Nr 3, 1961.
12. G. ÖLÖS: A csapóskutak hidraulikai kárdesei. Vizügyi Közlemények. Nr 2, 1962.
13. H. RÜCKERT: Neues Bemessungsverfahren für Horizontalfilterbrunnen. Wasserwirtschaft — Wassertechnik. Nr 7, 1979.
14. Z. SIWON: Zagadnienie depresji pozornej w niektórych typach ujęć promienistych. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej Nr 20, 1973.
15. Z. SIWON: Hydraulika rur z przepuszczalnymi ściankami. Arch. Hydrotech. t. XXIV, Nr 4, 1977.
16. A. WIECZYSTY: Hydrogeologia inżynierska. PWN, Warszawa 1982.