

ANDRZEJ HAŁADUS*, RYSZARD KULMA*

Dopływy wody do studni położonej w pobliżu prostopadłych granic nieprzepuszczalnych

Słowa kluczowe

Hydrogeologia, ujęcia wód podziemnych, obliczenia prognostyczne

Streszczenie

Ujęcia wód podziemnych nie zawsze są wykonywane w sprzyjających warunkach hydrogeologicznych. Tym bardziej prognoza dopływów wody do studni i skutków jej eksploatacji w postaci obniżonego zwierciadła wody powinna być wiarygodna i dokładna. Zagadnicie to zostało podjęte w niniejszej pracy dla schematu obliczeniowego (modelu), w którym pojedyncza studnia położona jest w pobliżu dwóch, wzajemnie prostopadłych granic nieprzepuszczalnych.

Wyrowadzone przez autorów wzory analityczne umożliwiły wykonanie obliczeń i porównanie uzyskanych wyników z rezultatami badań symulacyjnych na modelu warunków hydrogeologicznych. Analiza błędów obliczeń wskazuje na dużą zbłążoność prognoz zarówno w ocenie wydajności studni, jak i wielkości depresji zwierciadła wód podziemnych. Fakt ten potwierdza przydatność formuł obliczeniowych i możliwość ich wykorzystania w praktyce hydrogeologicznej.

Wprowadzenie

Konieczność zaopatrzenia w wodę wymusza niejednokrotnie potrzebę lokalizacji ujęcia w mniej korzystnych warunkach hydrogeologicznych, np. w pobliżu granic nieprzepuszczalnych. Ilość wody pozyskana w takich warunkach może okazać się wystarczająca dla pokrycia istniejącego zapotrzebowania. Przy niekorzystnej lokalizacji studni ocena wiarygodności prognoz hydrogeologicznych ma duże znaczenie praktyczne. Nie zawsze, ze względów czasowych

* Dr inż., Zakład Hydrogeologii i Ochrony Wód AGH, Kraków.

Recenzował prof. dr hab. inż. Andrzej Szczepański

lub ekonomicznych, do rozwiązywania tych zagadnień mogą być wykorzystywane metody matematycznego modelowania uznane jako najbardziej wiarygodne. Obecnie do prognozowania hydrogeologicznych skutków eksploatacji ujęć wodnych powszechnie stosowane są jeszcze metody analityczne.

Autorzy przedstawili w pracy ocenę dokładności prognoz hydrogeologicznych wykonanych dla warunków przepływu ustalonego na podstawie obliczeń analitycznych i badań modelowych. Schemat obliczeniowy obejmuje pojedynczą studnię położoną w pobliżu granic nieprzepuszczalnych. Ogółem zrealizowano 48 wariantów obliczeniowych dla warstwy wodonośnej o zwierciadle naporowym i swobodnym. Wobec braku w literaturze stosownych formuł obliczeniowych, zostały one wyprowadzone przez autorów niniejszej pracy.

1. Założenia do schematu obliczeniowego

Przedmiotem badań było ujęcie studzienne położone w pobliżu granic nieprzepuszczalnych. Dla wykonania obliczeń analitycznych i badań modelowych przyjęto następujące założenia:

- ujęcie składa się z pojedynczej studni położonej w pobliżu granic wyklinowującej się warstwy wodonośnej,
- odległość studni od dwóch granic nieprzepuszczalnych, wzajemnie do siebie prostopadłych, ulega zmianie (rys. 1 — patrz rozdz. 2),
- przepływy filtracyjne w pojedynczej warstwie wodonośnej, o zwierciadle naporowym lub swobodnym, mają charakter ustalony,
- w warunkach naturalnych (początkowych) zwierciadło wód podziemnych zalega poziomo (spadek hydrauliczny $J_o = 0$),
- na nieprzepuszczalnych granicach ograniczających obszar filtracji symulowano warunek II rodzaju $Q = 0$, oznaczający brak zasilania; na pozostałych kierunkach warstwa ma nieograniczone rozprzestrzenienie, które przy poborze wody ze studni uwzględnione zostało jako warunek I rodzaju ($H = \text{const.}$) na odległości wyznaczonej zasięgiem leja depresji,
- warstwa wodonośna została odwzorowana na modelu dwuwymiarowym płaskim w planie,
- utwory wodonośne są jednorodne, izotropowe; oznacza to, że w warstwie wodonośnej o zwierciadle naporowym $T_x = T_y$, natomiast w warunkach swobodnych $k_x = k_y$,
- w spągu i stropie warstwy naporowej oraz w spągu warstwy o zwierciadle swobodnym zalegają utwory nieprzepuszczalne,
- w obliczeniach pominięto zasilanie infiltracyjne, tj. $q_{inf} = 0$,
- studnia eksploatująca warstwę wodonośną została wykonana jako zupełna, tzn. filtr obejmuje całkowitą miąższość utworów,
- depresja w studni eksploatacyjnej lub jej wydajność nie ulega zmianie ($s = \text{const.}$); na modelu studnię symulowano warunkami III rodzaju, uwzględniającymi deformacje radialnego strumienia wody podziemnej w bezpośrednim sąsiedztwie otworu pompowego,
- w obliczeniach analitycznych i badaniach modelowych przyjęto identyczne warunki eksploatacji studni oraz wielkości parametrów hydrogeologicznych (tab. 1).

TABELA 1

Parametry hydrogeologiczne i techniczno-eksploatacyjne studni dla przyjętego schematu obliczeniowego (modelu)

TABLE 1

Hydrogeological and technical/operational parameters of a well for assumed calculation method (model)

Rodzaj parametru	Wielkość
Miąższość warstwy wodonośnej M [m]	20,0
Współczynnik filtracji k [m/d]	2,5; 10,0
Przewodność warstwy wodonośnej T [m ² /d]	50,0; 200,0
Depresja w studniach eksploatacyjnych s [m]	2,5; 5,0; 10,0
Promień studni r [m]	0,2
Odległość studni od granic nieprzepuszczalnych x_o i y_o [m]	25,0—100,0

Dla uzyskania prognoz hydrogeologicznych pracy ujęcia studziennego wykonano 48 rozwiązań wariantowych (tab. 2 — patrz rozdz. 4). Badania zrealizowano dla warunków naporowych i swobodnych z uwzględnieniem zmiany depresji w studniach, odległości ujęcia od granic nieprzepuszczalnych oraz zróżnicowania parametrów charakteryzujących ujmowaną warstwę wodonośną (przewodności hydraulicznej lub współczynnika filtracji).

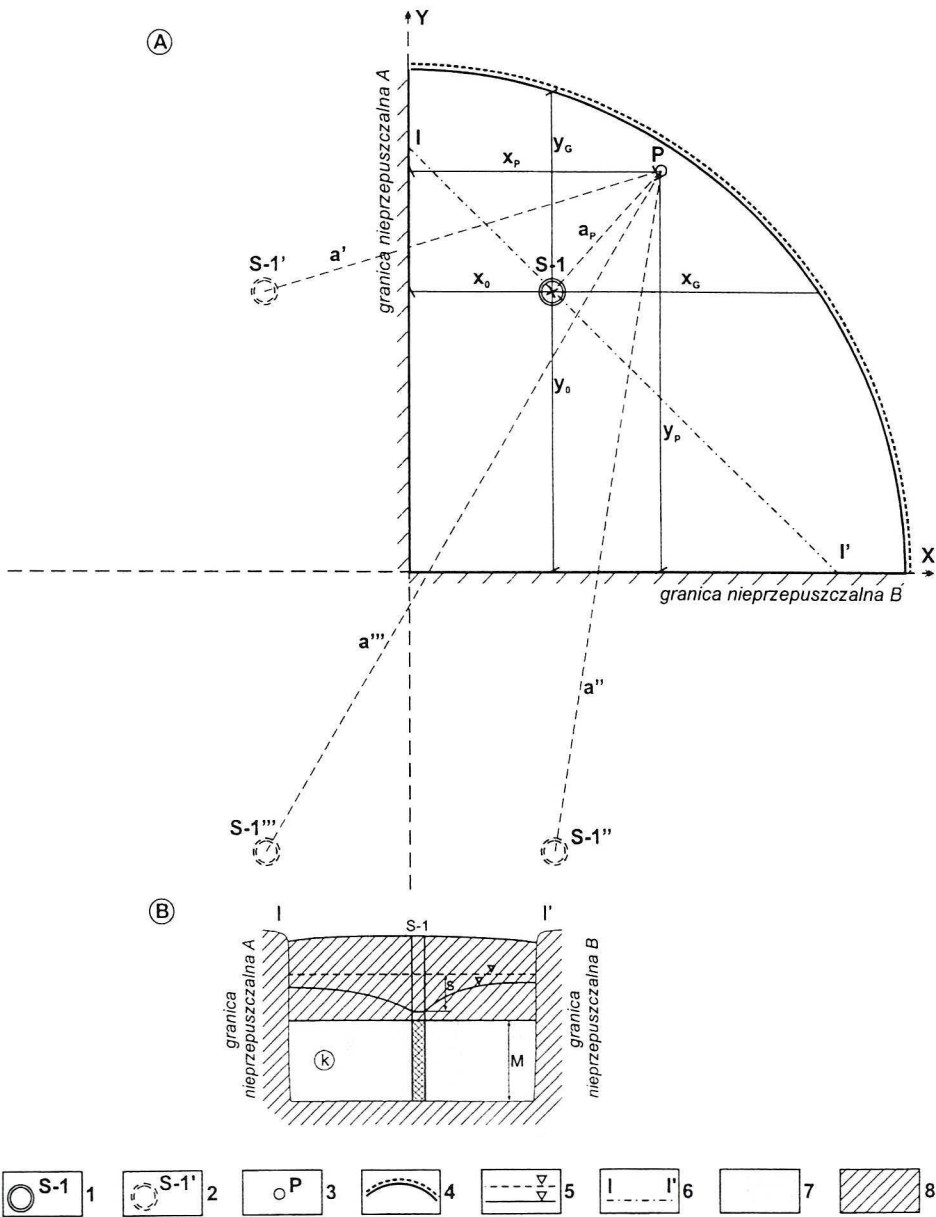
2. Obliczenia analityczne

Obliczenia analityczne, obejmujące wielkości dopływów i położenia zwierciadła wód podziemnych, wykonano dla otworu studziennego położonego w rejonie wzajemnie do siebie prostopadłych granic nieprzepuszczalnych. W literaturze nie ma wzorów analitycznych umożliwiających wykonywanie obliczeń dla takiej sytuacji. Autorzy wyprowadzili więc wzory wykorzystując zasadę odbić zwierciadlanych i superpozycji (zasada Forchheimera). Poniżej skrótowo przedstawiono sposób wyprowadzenia wzorów dla filtracji wód podziemnych w warunkach naporowych (rys. 1).

$$s = \Delta s_1 + \Delta s \quad (1)$$

$$\Delta s_1 = \frac{Q}{2\pi kM} \ln \frac{R}{r} \quad (2)$$

$$\Delta s = \frac{Q}{\pi kM} \ln \frac{R}{2x_o} + \frac{Q}{\pi kM} \ln \frac{R}{2y_o} + \frac{Q}{\pi kM} \ln \frac{R}{\sqrt{(2x_o)^2 + (2y_o)^2}}$$



Rys. 1. Plan sytuacyjny ujęcia jednootworowego (A) i schematyczny przekrój hydrogeologiczny I-I' (B)
 1 — studnia, 2 — studnia fikcyjna, 3 — otwór obserwacyjny (punkt pomiarowy), 4 — granica zasilaająca (zasięg leja depresji), 5 — statyczne i dynamiczne zwierciadło wód podziemnych, 6 — linia przekroju hydrogeologicznego, 7, 8 — utwory przepuszczalne (7) i nieprzepuszczalne (8)

Fig. 1. Sketch map of single-well intake (A) and schematic hydrogeological cross-section I-I' (B)
 1 — well, 2 — virtual well, 3 — observation well (measurement site),
 4 — recharge boundary (range of depression cone), 5 — static and dynamic groundwater table,
 6 — hydrogeological cross-section line, 7, 8 — permeable (7) and impermeable (8) rocks

$$\Delta s = \frac{Q}{\pi k M} \ln \frac{R^3}{8x_o y_o \sqrt{x_o^2 + y_o^2}} \quad (3)$$

gdzie:

$$R = \sqrt{x_G y_G} + \sqrt{x_o^2 + y_o^2} \quad (4)$$

Ostatecznie wzór na dopływ wody Q do studni S-1, ujmującej warstwę wodonośną o zwierciadle naporowym, przedstawia się następująco:

$$Q = \frac{\pi k M s}{\ln \frac{\left(\sqrt{x_G y_G} + \sqrt{x_o^2 + y_o^2} \right)}{2\sqrt{2rx_o y_o} + \sqrt{x_o^2 + y_o^2}}} \quad (5)$$

W powyższych wzorach:

- Q — wydatek studni [m³/d],
- k — współczynnik filtracji warstwy wodonośnej [m/d],
- M — miąższość warstwy wodonośnej [m],
- s — całkowita depresja w studni [m],
- Δs_1 — obniżenie zwierciadła wody w studni wywołane przez eksploatację studni S-1 [m],
- Δs — suma obniżeń zwierciadła wody w studni spowodowana przez studnie fikcyjne S-1', S-1'' i S-1''' [m],
- r — promień studni [m],
- x_o, y_o — odległości studni S-1 od granic nieprzepuszczalnych [m],
- R — zasięg oddziaływania studni [m],
- x_G, y_G — odległości studni od granicy zasilającej (zasięgu leja depresji) [m].

Obliczenia dopływów do otworu studziennego, pracującego w warstwie wodonośnej o zwierciadle swobodnym, zostały wykonane z wykorzystaniem wzoru (5) poprzez podstawienie do niego skorygowanej miąższości równej $(M - 0,5s)$. Ostatecznie otrzymano następującą relację:

$$Q = \frac{\pi k \left(2M - \frac{s}{2} \right) s}{\ln \frac{\left(\sqrt{x_G y_G} + \sqrt{x_o^2 + y_o^2} \right)^2}{2\sqrt{2rx_o y_o} + \sqrt{x_o^2 + y_o^2}}} \quad (6)$$

Poniżej przedstawiono formułę umożliwiającą obliczenie obniżenia zwierciadła wody (depresji) s_{DP} w rejonie eksploatowanej studni, również wyprowadzoną dla warstwy wodonośnej o zwierciadle naporowym, z wykorzystaniem przyjętej schematyzacji (rys. 1) i równania:

$$s_{DP} = \Delta s_P + \Delta s'_P \quad (7)$$

gdzie:

- Δs_P — obniżenie zwierciadła wody w punkcie P wywołane eksploatacją studni S-1 [m],
 $\Delta s'_P$ — suma obniżeń zwierciadła wody w punkcie P spowodowanych przez studnie fikcyjne S-1', S-1'' i S-1''' [m].

Podstawiając do wzoru (7) w miejsce Δs_P i $\Delta s'_P$ odpowiednie relacje (8) i (9) oraz (4) otrzymamy ostatecznie:

$$\Delta s_P = \frac{Q}{2\pi kM} \ln \frac{R}{a_P} \quad (8)$$

$$\Delta s'_P = \frac{Q}{2\pi kM} \ln \frac{R}{a'} + \frac{Q}{2\pi kM} \ln \frac{R}{a''} + \frac{Q}{2\pi kM} \ln \frac{R}{a'''} \quad (9)$$

$$s_{DP} = \frac{Q \ln \left(\frac{\sqrt{x_G y_G} + \sqrt{x_o^2 + y_o^2}}{\sqrt{a_P a' a'' a'''}} \right)}{\pi kM} \quad (10)$$

przy czym:

$$a' = \sqrt{(x_P + x_o)^2 + (y_P - y_o)^2}$$

$$a'' = \sqrt{(x_P - x_o)^2 + (y_P + y_o)^2}$$

$$a''' = \sqrt{(x_P + x_o)^2 + (y_P + y_o)^2}$$

$$a_P = \sqrt{(x_P - x_o)^2 + (y_P - y_o)^2}$$

gdzie:

- a_P — odległość punktu pomiarowego P od studni S-1 [m],
 a', a'', a''' — odległości punktu pomiarowego P od studni fikcyjnych S-1', S-1'' i S-1''' [m],
 s_{DP} — obniżenie zwierciadła wód podziemnych w punkcie P [m],
 x_P, y_P — odległości punktu P od granic nieprzepuszczalnych [m],
 pozostałe objaśnienia jak we wzorach (1)–(5).

Wielkość obniżenia zwierciadła wody w warstwie wodonośnej o zwierciadło swobodnym, w rejonie studni położonej w pobliżu prostopadłych granic nieprzepuszczalnych otrzymano po przekształceniu wzorów (6)—(10), a ostateczny zapis jest następujący:

$$s_{DP} = M - \sqrt{M^2 - \frac{2Q \ln \left(\frac{\sqrt{x_G y_G} + \sqrt{x_o^2 + y_o^2}}{\sqrt{a_P a' a'' a'''}} \right)}{\pi k}} \quad (11)$$

3. Badania modelowe

Przygotowanie modelu matematycznego ujęcia infiltracyjnego składającego się z jednej studni oraz wykonanie obliczeń symulacyjnych przeprowadzone zostało przy wykorzystaniu programu komputerowego Processing MODFLOW. Na jednowarstwowym, dwuwymiarowym modelu obszaru filtracji zrealizowano obliczenia ustalonych warunków przepływu strumienia wód podziemnych, dla naporowej i swobodnej warstwy wodonośnej (tab. 2 — patrz rozdz. 4).

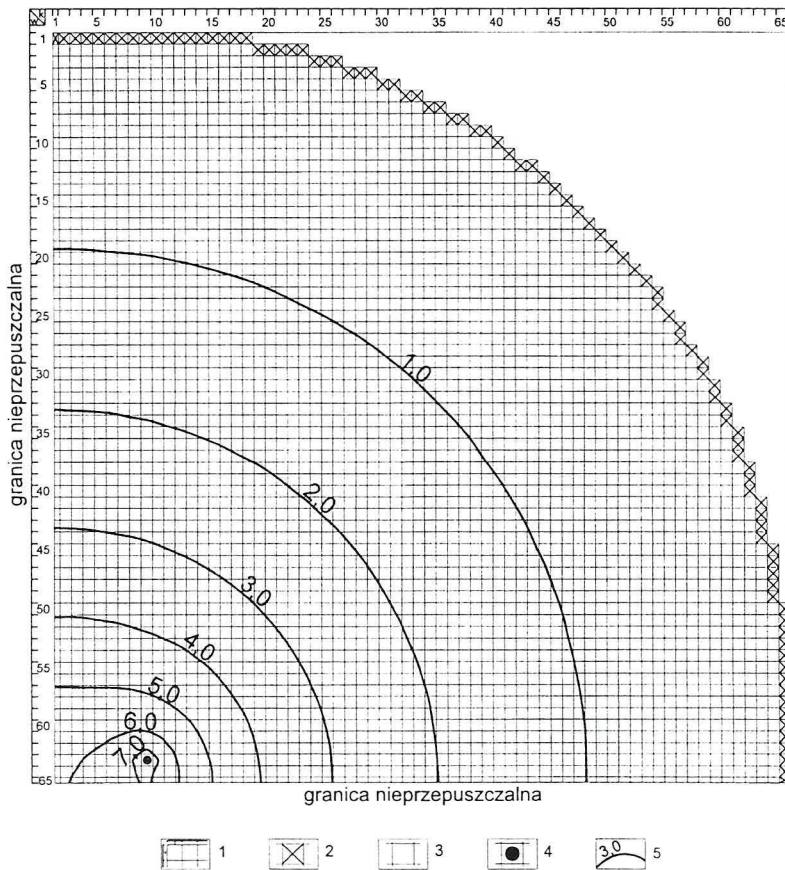
Wykonanie badań modelowych wymagało dyskretyzacji obszaru filtracji, który został podzielony na 3547 bloków obliczeniowych (rys. 2). W zdecydowanej większości były to bloki kwadratowe o boku $\Delta x = \Delta y = 12,5$ m. Jedynie ostatni wiersz i pierwsza kolumna modelu, przylegające do granic nieprzepuszczalnych, stanowią bloki o wymiarze $\Delta x = 12,5$ m i $\Delta y = 6,25$ m oraz $\Delta x = 6,25$ m i $\Delta y = 12,5$ m. Brzegi modelu stanowiły zewnętrzne warunki obliczeń, które odzwierciedlają schematyczny przebieg granic nieprzepuszczalnych oraz zdyskretyzowany kontur leja depresji. Studnia eksploacyjna stanowiła wewnętrzny warunek brzegowy obliczeń symulacyjnych, realizowany w środku ciężkości wybranego bloku obliczeniowego. Rozpatrzono różne lokalizacje otworu studziennego w stosunku do przyjętych granic modelowanego obszaru filtracji.

4. Wyniki prognoz hydrogeologicznych

Prognozy hydrogeologiczne, wykonane dla studni położonej w pobliżu prostopadłych granic nieprzepuszczalnych, dały możliwość porównania wyników uzyskanych za pomocą wzorów analitycznych i na modelu matematycznym. Obliczenia symulacyjne na modelu obszaru filtracji dają dokładniejszy i bardziej wiarygodny obraz warunków przepływu i obniżenia zwierciadła wody w rejonie ujęcia niż obliczenia analityczne. Dokładność prognoz modelowych zależy między innymi od przyjętego podziału warstwy wodonośnej na bloki obliczeniowe. Dyskretyzacja obszaru filtracji umożliwiła poprawne odwzorowanie granic obszaru filtracji i położenie studni eksploacyjnej. Dla rzeczywistych sytuacji stwarza ponadto możliwości uwzględnienia niejednorodności ośrodka skalno-gruntowego bądź zróżnicowanych warunków zasilania powierzchniowego.

Jako wyniki badań modelowych uzyskano wydajności pracującej studni oraz wielkości obniżenia zwierciadła wody w centrach bloków obliczeniowych. Analogiczne wielkości obliczone zostały na podstawie relacji (5) i (6) oraz (10) i (11) wyprowadzonych przez autorów dla studni położonej w pobliżu prostopadłych granic nieprzepuszczalnych. W pracy przykładowo dokonano porównania obniżenia zwierciadła wody tylko dla wybranych punktów obszaru filtracji.

Błąd obliczenia wydajności ujęcia metodą analityczną określono z następującej zależności:



Rys. 2. Model obszaru filtracji w rejonie ujęcia jednootworowego położonego w pobliżu wzajemnie do siebie prostopadłych nieprzepuszczalnych granic

- 1 — podział obszaru badań na bloki obliczeniowe z numeracją wierszy i kolumn, 2 — bloki obliczeniowe z zadaniem warunkiem brzegowym I rodzaju, 3 — bloki z zadaniem warunkiem II rodzaju $Q = 0$,
4 — bloki obliczeniowe modelujące studnie z zadaniem warunkiem brzegowym III rodzaju,
5 — izolinie depresji zwierciadła wód podziemnych przy depresji w studni $s = 10,0$ m

Fig. 2. Filtration model in the vicinity of single-well intake located close to mutually perpendicular impermeable boundaries

- 1 — subdivision of study area into the calculation blocks with symbols of columns and rows, 2 — calculation blocks for constant head boundary condition, 3 — calculation blocks for constant flux boundary conditions at $Q = 0$,
4 — calculation blocks for mixed boundary conditions, 5 — hydroisobaths of groundwater table at drawdown in the well $s = 10.0$ meters

$$B_Q = \frac{Q_M - Q_A}{Q_M} \cdot 100\% \quad (12)$$

gdzie:

- Q_M — wydatek ujęcia uzyskany z modelu matematycznego [m^3/d],
 Q_A — wydatek ujęcia obliczony analitycznie [m^3/d].

Błąd określenia depresji zwierciadła wody obliczonej formułami analitycznymi oceniono z zależności:

$$B_s = \frac{s_M - s_A}{s_M} \cdot 100\% \quad (13)$$

gdzie:

- s_M — obniżenie zwierciadła wody uzyskane z modelu matematycznego [m],
 s_A — obniżenie zwierciadła wody obliczone analitycznie, gdzie $s_A = s$ lub $s_A = s_{DP}$ [m].

Z obliczeń wynika, że wydajności studni położonej w pobliżu prostopadłych granic nieprzepuszczalnych określone wzorem (5) dla naporowej warstwy wodonośnej są bardzo do-

TABELA 2

Wielkość błędów względnych analitycznego obliczenia wydajności studni

TABLE 2

Relative errors of analytical calculation of well discharge

Depresja wody w studni s [m]	Odległość studni od granicy izolującej [m]		Błąd względny B_Q [%]			
			Poziom wodonośny o zwierciadle			
			naporowym		swobodnym	
			Przewodność warstwy wodonośnej [m^2/d]			
	x_o	y_o	$T = 50$	$T = 200$	$T = 50$	$T = 200$
2,5	25	25	-0,52	-0,53	-0,38	-0,37
	75	50	-0,02	-0,02	0,22	0,22
	100	25	0,39	0,39	0,62	0,62
	100	100	0,51	0,51	0,83	0,82
5,0	25	25	-0,54	-0,55	-0,13	-0,12
	75	50	-0,02	-0,02	0,56	0,56
	100	25	0,39	0,39	0,95	0,95
	100	100	0,11	0,11	1,23	1,67
10,0	25	25	-0,53	-0,54	0,70	0,70
	75	50	-0,02	-0,02	1,67	1,67
	100	25	0,39	0,39	2,02	2,02
	100	100	0,10	0,11	2,56	2,56

Wielkość błędów względnych przy analitycznym obliczaniu obniżenia zwierciadła wód podziemnych w rejonie studni eksploatującej poziom wodonośny o zwierciadle naporowym

TABLE 3

Relative errors of analytical calculations for groundwater table drawdown in the vicinity of a well draining the confined-table horizon

Depresja wody w studni s [m]	Odległość studni od granicy [m]		Błąd względny B_s [%]																			
			Przewodność warstwy wodonośnej [m ² /d]																			
			T = 50										T = 200									
			Odległość od granicy B (równoległe do granicy A)																			
x_o	y_o	12,5	25	37,5	50	75	100	150	200	300	400	12,5	25	37,5	50	75	100	150	200	300	400	
2,5	25	25	0,36	0,00	0,50	0,30	0,28	0,39	0,49	0,70	0,81	1,82	0,36	0,00	0,50	0,30	0,28	0,39	0,48	0,69	0,80	1,81
	75	50	0,00	0,18	0,28	0,00	0,13	-0,15	-0,26	-0,31	-0,42	-0,59	0,01	0,18	0,28	0,00	0,14	-0,14	-0,25	-0,32	-0,41	-0,60
	100	25	0,11	0,00	0,12	-0,13	-0,51	-0,57	-0,86	-1,12	-1,51	-2,29	0,11	0,00	0,12	-0,13	-0,50	-0,57	-0,85	-1,13	-1,51	-2,28
	100	100	-0,57	-0,57	-0,56	-0,55	-0,19	0,00	-0,70	-0,93	-1,67	-2,48	-0,57	-0,56	-0,56	-0,55	-0,20	0,00	-0,71	-0,95	-1,66	-2,48
5,0	25	25	0,36	0,00	0,44	0,33	0,25	0,32	0,49	0,70	1,14	1,71	0,35	0,00	0,44	0,33	0,26	0,31	0,48	0,69	1,14	1,70
	75	50	-0,03	0,12	0,31	0,00	0,13	-0,15	-0,22	-0,31	-0,42	-0,59	-0,03	0,13	0,30	0,00	0,13	-0,15	-0,21	-0,31	-0,42	-0,60
	100	25	0,14	0,00	0,15	-0,13	-0,48	-0,61	-0,81	-1,01	-1,51	-2,19	0,14	0,00	0,15	-0,14	-0,48	-0,62	-0,82	-1,01	-1,52	-2,18
	100	100	-0,64	-0,60	-0,60	-0,55	-0,19	0,00	-0,66	-0,93	-1,54	-2,48	-0,63	-0,61	-0,60	-0,55	-0,20	0,00	-0,65	-0,92	-1,53	2,48
10,0	25	25	0,39	0,00	0,44	0,35	0,26	0,34	0,51	0,73	1,18	1,71	0,38	0,00	0,44	0,35	0,26	0,33	0,51	0,73	1,18	1,70
	75	50	-0,05	0,12	0,31	0,00	0,13	-0,15	-0,22	-0,28	-0,39	-0,59	-0,05	0,12	0,31	0,00	0,13	-0,16	-0,23	-0,28	-0,39	-0,60
	100	25	0,14	0,00	0,13	-0,12	-0,48	-0,63	0,84	-1,01	-1,47	-2,13	0,14	0,00	0,12	-0,13	-0,48	-0,62	-0,83	-1,01	-1,49	-2,13
	100	100	-0,64	-0,62	-0,58	-0,52	-0,19	0,00	-0,64	-1,00	-1,60	-2,48	-0,63	-0,61	-0,59	-0,54	-0,20	0,00	-0,64	-0,98	-1,57	2,48

TABELA 4

Wielkość błędów względnych przy analitycznym obliczaniu obniżenia zwierciadła wód podziemnych w rejonie studni eksploatującej poziom wodonośny o zwierciadle swobodnym

TABLE 4

Relative errors of analytical calculations for groundwater table drawdown in the vicinity of a well draining the unconfined-table horizon

Depresja wody w studni s[m]	Odległość studni od granicy [m]		Błąd względny Q_s																			
			Przewodność warstwy wodonośnej [m ² /d]																			
			T = 50										T = 200									
			Odległość od granicy B (równoległe do granicy A)																			
x_o	y_o	12,5	25	37,5	50	75	100	150	200	300	400	12,5	25	37,5	50	75	100	150	200	300	400	
2,5	25	25	0,58	0,00	0,67	0,50	0,50	0,49	0,71	0,85	1,37	1,92	0,58	0,00	0,67	0,50	0,51	0,47	0,71	0,85	1,37	1,92
	75	50	0,25	0,36	0,63	0,00	0,39	0,15	0,09	0,00	-0,15	-0,21	0,25	0,37	0,62	0,00	0,38	0,14	0,10	0,01	-0,15	-0,21
	100	25	0,39	0,00	0,36	0,13	-0,23	-0,42	-0,60	-0,80	-1,27	-1,97	0,38	0,00	0,36	0,13	-0,25	-0,40	-0,60	-0,78	-1,25	-1,94
	100	100	-0,29	-0,29	-0,29	-0,21	0,13	0,00	-0,32	-0,68	-1,34	-2,04	-0,29	-0,27	-0,29	-0,21	0,12	0,00	-0,32	-0,68	-1,34	-2,02
5,0	25	25	0,88	0,00	0,97	0,83	0,74	0,80	0,95	1,21	1,62	2,16	0,84	0,00	0,95	0,83	0,74	0,80	0,96	1,20	1,62	2,15
	75	50	0,61	0,78	0,99	0,00	0,77	0,50	0,38	0,34	0,16	0,00	0,60	0,76	0,99	0,00	0,77	0,50	0,38	0,34	0,16	0,01
	100	25	0,77	0,00	0,76	0,47	0,08	-0,04	-0,26	-0,70	-0,92	-1,62	0,75	0,00	0,76	0,47	0,08	-0,04	-0,27	-0,69	-0,90	-1,62
	100	100	0,08	0,15	0,15	0,22	0,57	0,00	0,08	-0,30	-0,91	-1,76	0,07	0,16	0,15	0,22	0,57	0,00	0,08	-0,32	-0,91	-1,76
10,0	25	25	2,07	0,00	2,13	1,89	1,74	1,79	1,90	2,10	2,50	2,98	2,04	0,00	2,09	1,89	1,74	1,78	1,90	2,08	2,47	2,96
	75	50	1,99	2,21	2,38	0,00	2,15	1,81	1,64	1,56	1,40	1,23	1,98	2,20	2,40	0,00	2,15	1,80	1,64	1,56	1,40	1,23
	100	25	2,23	0,00	2,16	1,80	1,34	1,16	0,92	0,68	-0,19	-0,53	2,20	0,00	2,16	1,80	1,34	1,16	0,92	0,68	-0,20	-0,51
	100	100	1,66	1,69	1,71	1,77	2,23	0,00	1,59	1,19	0,55	-0,39	1,64	1,69	1,70	1,75	2,21	0,00	1,58	1,19	0,53	-0,37

kładne. Błąd nie przekracza $\pm 1\%$ i nie zależy od przewodności warstwy wodonośnej ani od depresji w studni (tab. 2). Większe błędy przy prognozowaniu wydajności studni popełnić można w warunkach swobodnego przepływu wód podziemnych (wzór 6). Obliczone analitycznie dopływy wody są na ogół zaniżone, a błędy wzrastają od około 0,8—1,5% — przy depresji 2,5 m, do około 2,6% — przy depresji 10 m (tab. 2).

Dużą zbieżność w ocenie wielkości obniżenia zwierciadła wody uzyskano z obliczeń analitycznych (wzory 10 i 11) i badań modelowych w bezpośrednim sąsiedztwie studni eksploatacyjnej oraz na obszarze położonym między studnią i obiema granicami nieprzepuszczalnymi. Maksymalne błędy nie przekraczają wówczas $\pm 3,0\%$ (tab. 3 i 4). Na ogół dokładność oceny wielkości depresji maleje wraz ze wzrostem odległości od studni. Należy jednak podkreślić fakt, że wydatek studni i obniżenia zwierciadła wody są obarczone niewielkimi błędami i mogą być z powodzeniem wykorzystywane w praktyce hydrogeologicznej.

Prace badawcze zostały zrealizowane w Akademii Górniczo-Hutniczej w ramach działalności statutowej (umowa nr 11.11.140.251).

LITERATURA

- Haładus A., Kulma R., 2002 — Analiza dopływów wody do studni położonych w pobliżu prostopadłych granic zasilania. *Gosp. Sur. Min.* t. 18, z. 1
- Haładus A., Kulma R., 2002 — Dopływy wody do dwóch studni położonych w pobliżu granicy zasilającej i nieprzepuszczalnej. *Gosp. Sur. Min.* t. 18, z. 2.
- Haładus A., Kulma R., Frączek P., 1999 — Wykorzystanie badań modelowych do oceny błędu wyników obliczeń analitycznych infiltracyjnego ujęcia wód podziemnych. *Gosp. Sur. Min.* t. 15, z. 1.
- Haładus A., Kulma R., Rychlik P., 2000 — Dokładność prognoz hydrogeologicznych wykonywanych dla studni położonej na obszarze międzyrzecza. *Gosp. Sur. Min.* t. 16, z. 2.

ANDRZEJ HAŁADUS, RYSZARD KULMA

INFLOWS TO A GROUNDWATER INTAKE LOCATED IN THE VICINITY OF PERPENDICULAR IMPERMEABLE BOUNDARIES

Key words

Hydrogeology, groundwater intakes, prognostic calculations

Abstract

Groundwater intakes cannot be always located in favourable hydrogeological conditions. However, the prognosis of an inflow to the intake and of the resulting drop in groundwater table position must always be credible and accurate. This problem is discussed in the following paper for the model in which a single water well is located in the vicinity of the two, mutually perpendicular, impermeable boundaries.

The formulae developed by the authors enabled the calculations and the comparison of calculated results with the simulation of hydrogeological conditions. Error analysis points to the high consistence of the prognoses for both the discharge of an intake and the range of depression cone. Hence, the obtained results support the opinion on applicability of formulae in hydrogeological practice.