

## METODA SZYBKIEGO OBLICZANIA POJEDYNCZEJ STUDNI PEŁNEJ O ZWIERCIADLE NAPIĘTYM

UKD 551.491.56(083.57)+628.112.1(083.57)

W związku z opublikowanym poprzednio artykułem pt.: „Graficzna metoda wyznaczania maksymalnej wydajności studni, powierzchni filtra, dopuszczalnej prędkości wlotowej na filtry i zasięgu leja depresyjnego” (Prz. Geol. 1966, nr 1) oraz zainteresowaniem, które wzbudził ten artykuł, wydaje się pożyteczne przedstawienie trzeciego nomogramu dla często używanego wzoru Dupuit, stosowanego przy projektowaniu pojedynczej studni pełnej o zwierciadle napiętym (ryc. 1).

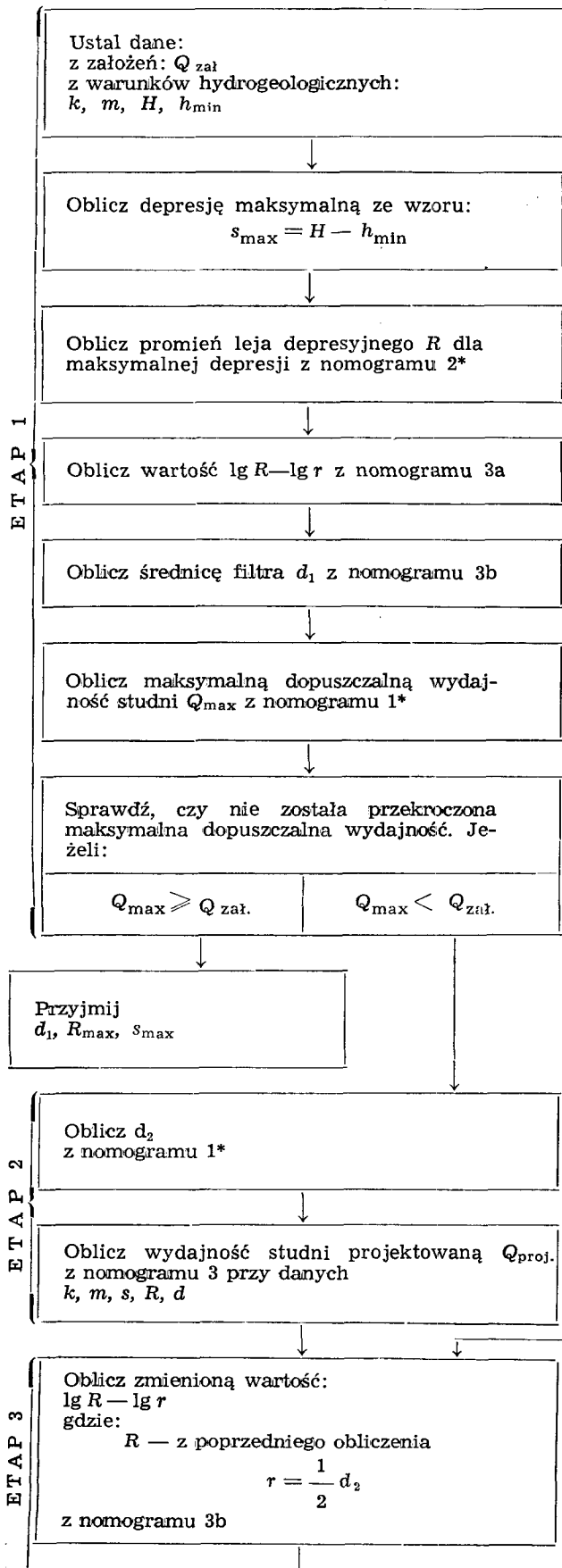
W artykule podano również sposób obliczania niektórych parametrów studni metodą kolejnych przybliżeń, przy użyciu opublikowanych nomogramów. Metodę tę zastosowano dla rozwiązania takich problemów, które można przedstawić w postaci układu dwu równań z dwoma niewiadomymi. Rozwiązanie układu równań dla wzorów Dupuita i Sicharda nastęrcza dużo trudności. Zaproponowany sposób roz-

wiązania takiego układu metodą kolejnych przybliżeń pozwala na otrzymanie wystarczająco dokładnych wyników już w drugim lub trzecim przybliżeniu, pod warunkiem zachowania kolejności obliczeń podanej niżej w przykładach 2 i 3 oraz na schematach (ryc. 4 i 5). Odwrócenie kolejności obliczeń prowadzi do wyników rozbieżnych.

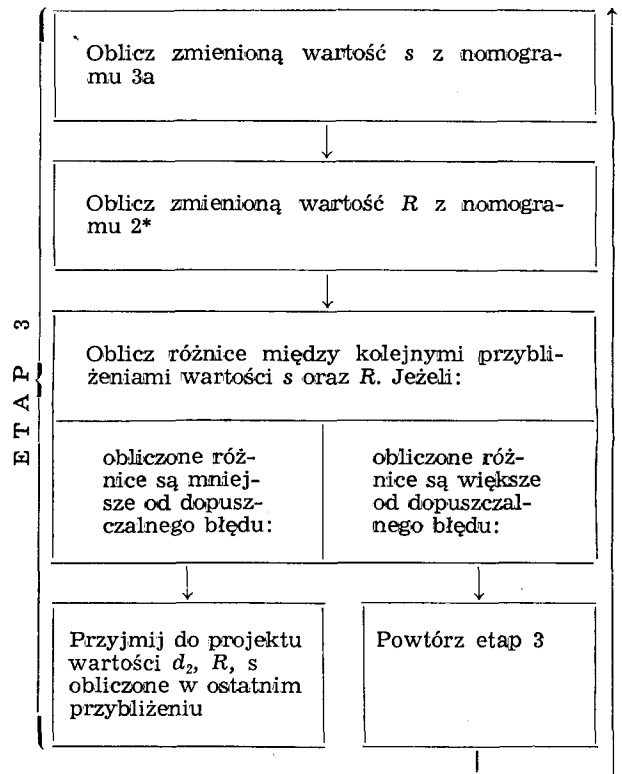
Opublikowane nomogramy pozwalają na szybkie przeprowadzenie niezbędnych obliczeń. Zastosowanie metody kolejnych przybliżeń do obliczenia wartości współczynnika filtracji  $k$  i zasięgu leja depresyjnego  $R$  podano w przykładzie 2, natomiast dla wartości depresji  $s$  oraz  $R$  — w przykładzie 3.

Ponadto przedstawiono poniżej schemat toku obliczeń prowadzący do uzyskania optymalnego wariantu projektu studni pełnej o zwierciadle napiętym. Według niniejszego schematu przeprowadzono obliczenia projektu w przykładach 1 i 3.

SCHEMAT OBLICZEŃ DO PROJEKTU STUDNI PEŁNEJ  
O ZWIERCIADLE NAPIĘTYM



\* Patrz Prz. geol. 1966, nr 1, s. 18,



Nomogram 3 opracowano w oparciu o podstawo-  
wy wzór

$$Q = 2,73 \frac{k \cdot m (H - h)}{\lg R - \lg r} \dots \dots \dots [1]$$

gdzie:

- Q — wydajność studni w m<sup>3</sup>/sek. lub m<sup>3</sup>/dobę
- k — współczynnik filtracji w m/sek. lub w m/dobę (jednostki Q i k należy przyjmować jednakowo)
- m — miąższość warstwy wodonośnej w m,
- H — wysokość swobodnego zwierciadła wody w m,
- h — wysokość obniżonego zwierciadła wody w otworze studziennym w m,
- R — promień leja depresyjnego w m,
- r — promień studni w m.

Ponieważ depresja w otworze  $s = H - h$   
a więc

$$Q = 2,73 \frac{k \cdot m \cdot s}{\lg R - \lg r} \dots \dots \dots [2]$$

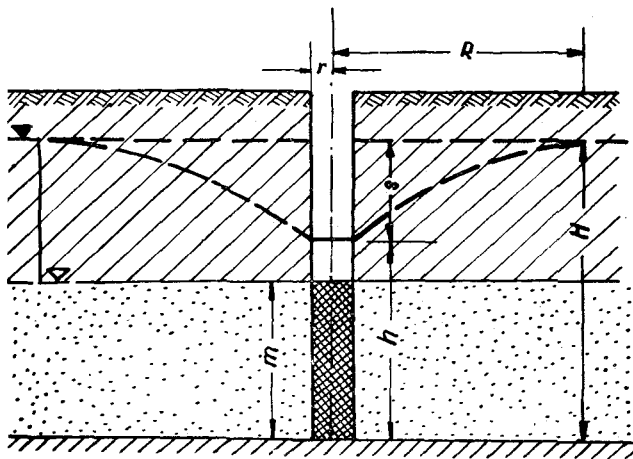
gdzie: s w m, pozostałe jednostki jak we wzorze [1].  
Wzór ten w przypadku, gdy:

- Q — m<sup>3</sup>/godz.
- k — m/sek

a pozostałe jednostki jak we wzorze [1] i [2].  
przyjmuje postać:

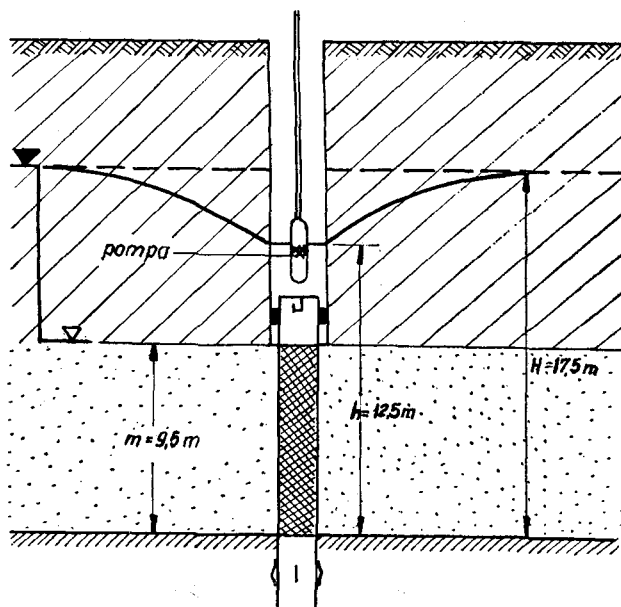
$$Q = \frac{9828 \cdot k \cdot m \cdot s}{\lg R - \lg r} \text{ m}^3/\text{godz.} \dots \dots [3]$$

Graficznym obrazem tej zależności jest nomo-  
gram 3, który składa się z dwu części: 3a i 3b.



Ryc. 1.

Fig. 1.



Ryc. 2.

Fig. 2.

Część 3a nomogramu składa się z 5 osi liczbowych „s”, „lgR—lgr”, „m”, „k”, „Q” i dwu osi pomocniczych „ $\frac{s}{lgR-lgr}$ ”, „m·k”. Na osi „s” odłożono wartości de-

presji w m, na osi „lgR—lgr” odłożono różnice logarytmów promieni lejki depresyjnego istudni — osi tej odpowiada oś „lgR—lgr” w części 3b nomogramu. Oś

„ $\frac{s}{lgR-lgr}$ ” służy do oznaczania punktu odpowiadają-

cego ilorazowi  $\frac{s}{lgR-lgr}$  który jest wartością pośred-

nią. Na osi „m” odłożono wartości miąższości warstwy wodonośnej w m, na osi „k” — wartości współczynnika filtracji w m/sek, w zakresie od  $1 \cdot 10^{-6}$  do  $1 \cdot 10^{-4}$  po prawej stronie osi i od  $1 \cdot 10^{-4}$  do  $1 \cdot 10^{-2}$  po lewej stronie osi. Oś pomocnicza „m·k” służy do oznaczania punktów odpowiadających iloczynowi m·k, który jest znów wartością pośrednią. Na osi „Q” odłożono wartości wydajności studni w m<sup>3</sup>/godz., obliczone według podanego wzoru [3]. Oś ta posiada dwie podziałki: lewą i prawą. Powinno się pamiętać, że przy posługiwaniu się lewą podziałką na osi „k” należy korzystać również z lewej podziałki na osi „Q”. To samo dotyczy podziałek prawych obu osi.

Część 3b nomogramu składa się z trzech osi liczbowych: „R”, „r,d” oraz „lgR—lgr”. Na osi „R” odłożono wartości zasięgu lejki depresyjnego w m, na osi „r, d” po lewej stronie wartości promienia studni w metrach i po prawej stronie, odpowiadające danemu promieniowi wartości średnicy studni w calach. Na osi „lgR—lgr” odłożono wartości różnic logarytmów, niezbędne do przeniesienia na część 3a nomogramu na oś „lgR—lgr”.

Sposób posługiwania się nomogramami zilustrowano trzema przykładami, które dobrano w taki sposób, aby przedstawić podaną powyżej metodykę sprawnego obliczania studni.

**Przykład 1 (dla projektu studni).** W założeniach do budowy studni określono żadaną wydajność  $Q_{zał} = 15,5$  m<sup>3</sup>/godz. Na podstawie materiałów archiwalnych dla danego terenu ustalono przewidywane wartości  $k = 1 \cdot 10^{-4}$  m/sek.,  $m = 9,5$  m,  $H = 17,5$  m.

W celu określenia wartości największej możliwej depresji w danych warunkach przeprowadzono następujące rozumowanie: ustalono przewidywany najniższy poziom otworów wlotowych pompy przy założeniu, że pompa zostanie umieszczona ponad rurą nadfiltrową (ryc. 2). Różnica poziomów otworów wlotowych pompy i spągu warstwy wodonośnej odpowiada wartości wysokości obniżonego zwierciadła wody w otworze  $h_{min} = 12,5$  m we wzorze [1]. Podsta-

wiając wartość wysokości swobodnego zwierciadła wody  $H$  z materiałów archiwalnych oraz  $h_{min}$  obliczono największą możliwą do uzyskania w danych warunkach depresję  $s_{max} = 5$  m.

Zasięg lejki depresyjnego  $R \approx 150$  m ustalono za pomocą nomogramu 2\* według podanego niżej schematu (ryc. 3). Brakującą do projektu studni wartość  $r$  ustalono za pomocą nomogramu 3 w następujący sposób (patrz nomogram 3). Na osiach podanych w części 3a prowadząc prostą przez punkty: na osi „k”  $1 \cdot 10^{-4}$  m/sek, na prawej podziałce oraz na osi „m” 9,5 m otrzymano na osi „m·k” punkt pomocniczy A'. Prowadząc prostą przez otrzymany punkt A' i punkt na osi „Q”, odpowiadający wartości  $Q = 15,5$  m<sup>3</sup>/godz. na prawej podziałce, otrzymano na osi pomocniczej

„ $\frac{s}{lgR-lgr}$ ” punkt A". Prowadząc prostą przez punkty

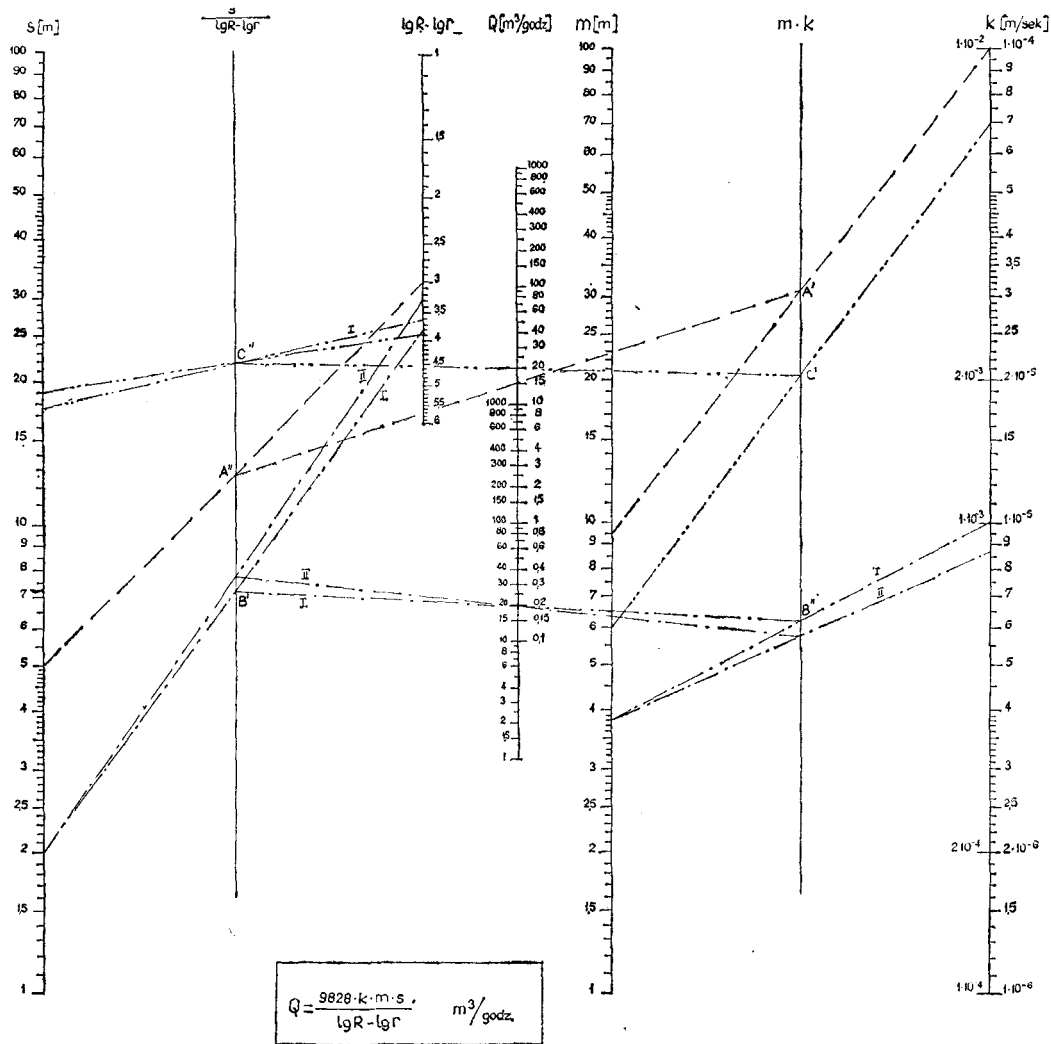
$s = 5$  m oraz A" otrzymano wartość  $lgR-lgr \approx 3$ .

Wartość tę przeniesiono na oś „lgR—lgr” w części 3b nomogramu. Prowadząc prostą przez punkty  $lgR-lgr = 3$  i  $R = 150$  m otrzymano na osi „r, d” punkt odpowiadający wartości promienia filtra  $r \approx 0,15$  m. Do projektu przyjęto wartość zaokrągloną z nadmiarem  $d = 12$ ". Następnie za pomocą nomogramu 1\* sprawdzono, czy nie zostanie przekroczona dopuszczalna prędkość wlotowa wody na filtrze  $V_{kr}$ . Ustalono, że maksymalna dopuszczalna wydajność dla projektowanego filtra  $Q_{max} \approx 50$  m<sup>3</sup>/godz. Ponieważ  $Q_{max} > Q_{zał}$  stąd wniosek, że dopuszczalna prędkość wlotowa wody na filtrze nie zostanie przekroczona, a zatem ustalone wymiary filtra mogą zostać przyjęte do projektu.

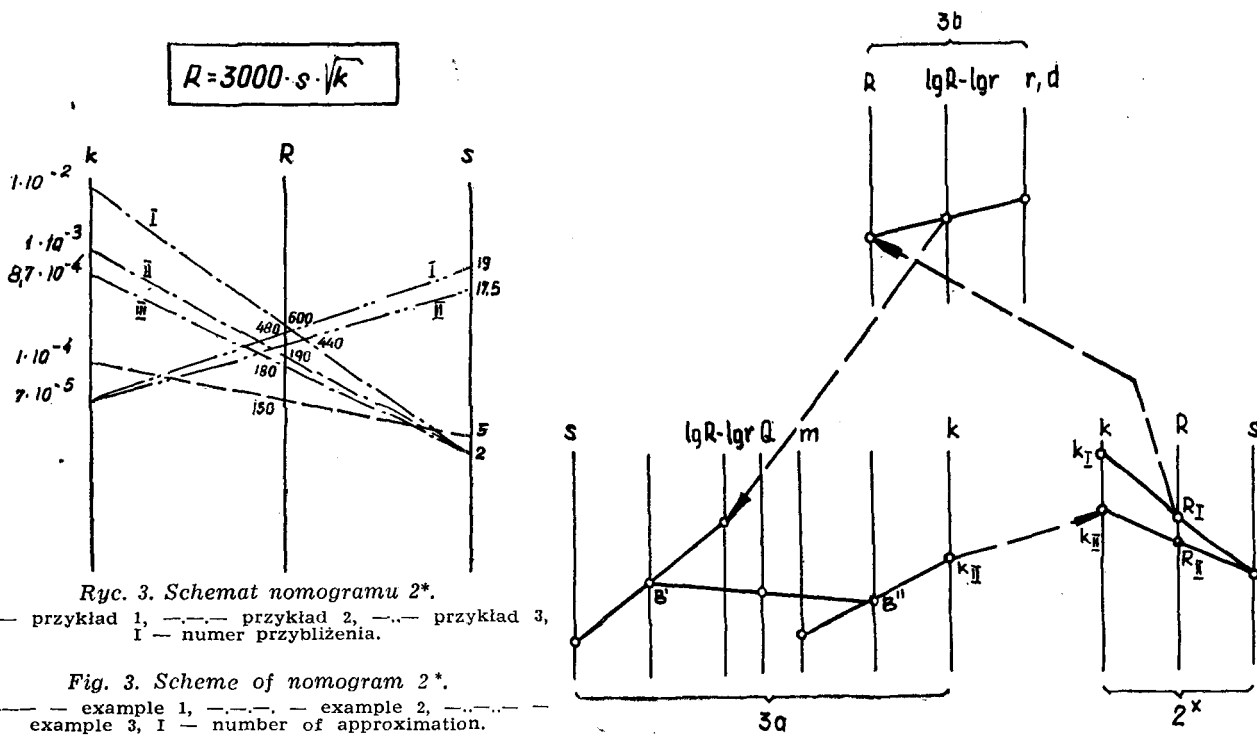
**Przykład 2 (dla dokumentacji powykonawczej).**

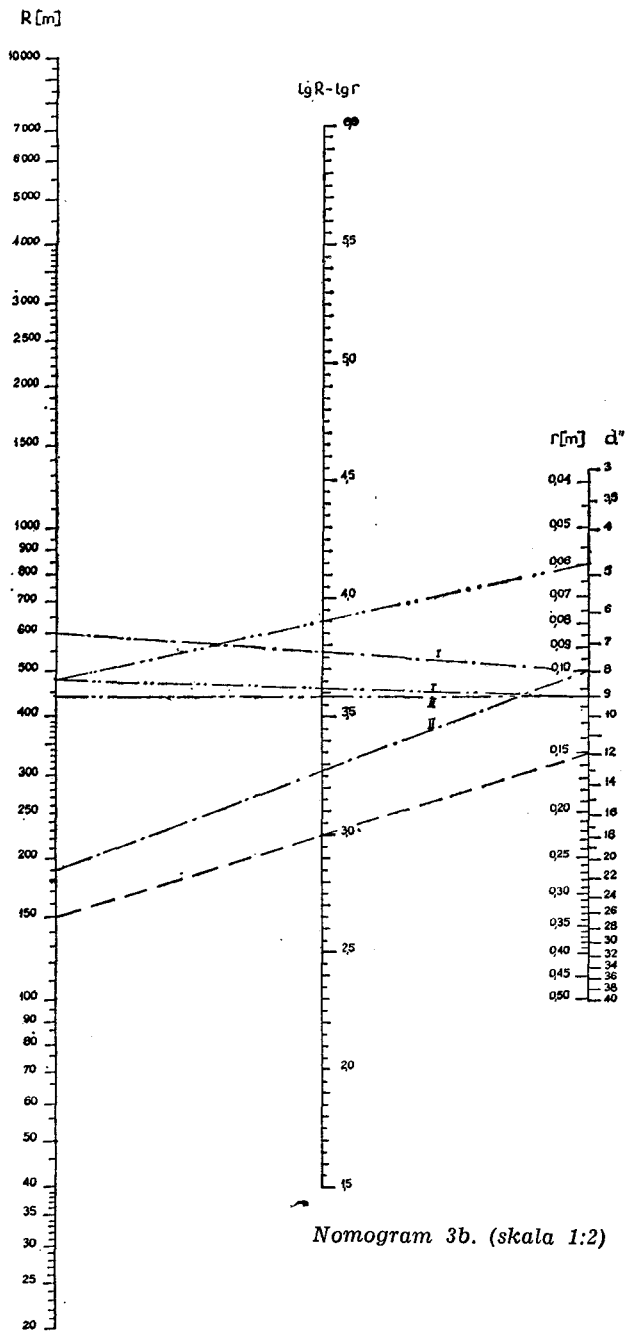
Uzyskana w trakcie próbnego pompowania wydajność wynosi  $Q = 20$  m<sup>3</sup>/godz. przy depresji  $s = 2$  m; miąższość warstwy wodonośnej  $m = 3,8$  m; średnica zainstalowanego filtra  $d = 8$ ". Brakujące dane do pełnego udokumentowania studni — wartość  $k$  oraz  $R$  ustalono według nomogramów 2\* i 3 drogą kolejnych przybliżeń, według podanego niżej schematu operacyjnego przedstawionego graficznie na ryc. 4. I-sze przybliżenie  $k = 1 \cdot 10^{-2}$  m/sek. przyjęto z badań laboratoryjnych bądź z projektu studni. Prowadząc na nomogramie 2\* prostą przez punkty  $k = 1 \cdot 10^{-2}$  m/sek. i  $s = 2$  m, otrzymano I-sze przybliżenie promienia lejki depresyjnego  $R \approx 600$  m. Następnie posłużono się nomogramem 3b łącząc punkty odpowiadające  $R = 600$  m oraz  $d = 8$ ", otrzymano wartość  $lgR-lgr \approx 3,8$ .

Za pomocą nomogramu 3a przez połączenie punktów odpowiadających wartości 3,8 na osi „lgR—lgr” oraz 2 m na osi „s” otrzymano punkt po-



Nomogram 3a. (skala 1:2)  
Objaśnienia jak na ryc. 3.



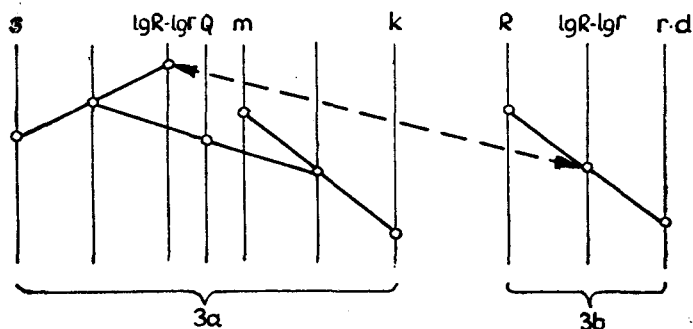


Ryc. 4. Schemat metody kolejnych przybliżeń wg przykładu 2 przy użyciu nomogramów 2\*, 3a, 3b.

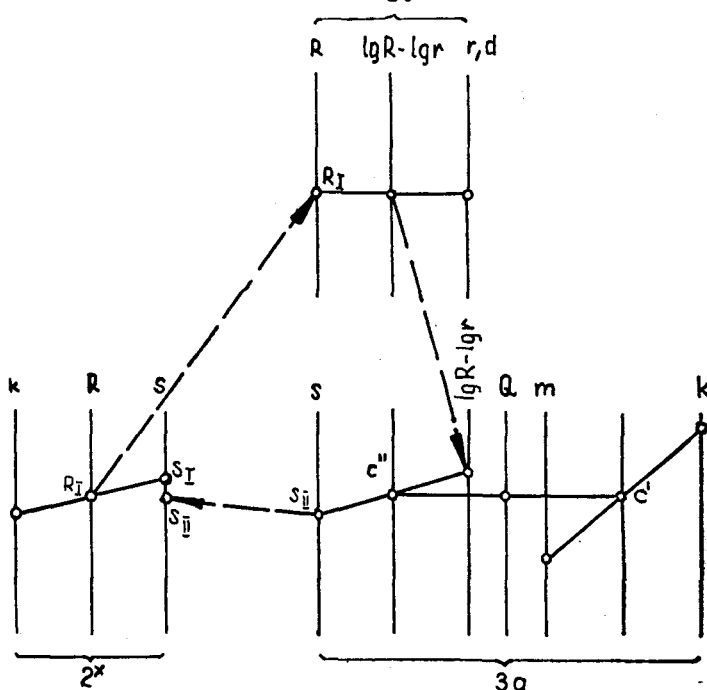
Fig. 4. Scheme of the method of successive approximations according to the example 2, using nomograms 2\*, 3a and 3b.

Tabela I

Nr przybliżeń	Nomogram 2		Nomogram 3	
	k	R	lg R - lg r	k
I	$1 \cdot 10^{-2}$	600	3,8	$1 \cdot 10^{-3}$
II	$1 \cdot 10^{-3}$	190	3,27	$8,7 \cdot 10^{-4}$
III	$8,7 \cdot 10^{-4}$	180	—	—



Schemat postępowania się nomogramem 3a i 3b



Ryc. 5. Schemat metody kolejnych przybliżeń wg przykładu 3, przy użyciu nomogramów 2\*, 3a, 3b.

Fig. 5. Scheme of the method of successive approximations according to the example 3, using nomograms 2\*, 3a, and 3b.

Tabela II

Nr przybliżeń	Nomogram 2		Nomogram 3	
	s	R	lg R - lg r	s
I	19	480	3,62	17,5
II	17,5	440	3,58	—

Tabela III

Etap	$Q_{proj}$ w m <sup>3</sup> /godz.	$d''_{proj}$	$Q_{max}$ w m <sup>3</sup> /godz	s w m
1	20	5	11,5	19
2	22	9	20	19
3	20	9	20	17,5

mocniejszy B' na osi „lgR — lgr”. Prowadząc prostą przez otrzymany punkt B' i punkt na osi „Q” (lewa podziałka) odpowiadający wydajności  $Q = 20 \text{ m}^3/\text{godz}$ , otrzymano na osi „m · k” pomocniczy punkt B". Prowadząc prostą przez punkt na osi „m” odpowiadający  $m = 3,8 \text{ m}$  oraz punkt pomocniczy B" — otrzymano na osi „k” (lewa podziałka) punkt, odpowiadający wartości  $k \approx 1 \cdot 10^{-3} \text{ m/sek}$ . Wartość ta stanowi II-gie przybliżenie wartości  $k$ . Posługując się otrzymaną wartością  $k = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m/sek}$ , w sposób analogiczny otrzymano za pomocą nomogramu 2\* II-gie przybliżenie wartości  $R \approx 190 \text{ m}$ . Podobnie za pomocą nomogramu 3a i 3b uzyskano III-cie przybliżenie wartości  $k \approx 8,7 \cdot 10^{-4} \text{ m/sek}$ , a następnie ponownie za pomocą nomogramu 2\* III-cie przybliżenie wartości  $R \approx 180 \text{ m}$ . Dalszy tok obliczeń uznano za niecelowy ze względu na wielkość przyjętych podziałek nomogramów. Uzyskane wyniki ilustruje zamieszczona tab. I.

Ostatecznie przyjęto wartości  $k = 8,7 \cdot 10^{-4} \text{ m/sek}$ ,  $R = 180 \text{ m}$ .

**Przykład 3 (dla projektu studni).** W założeniach do budowy studni otrzymano żadaną wydajność  $Q_{z\dot{a}l} = 20 \text{ m}^3/\text{godz}$ . Na podstawie materiałów archiwalnych dla danego terenu ustalono przewidywaną wartość  $k = 7 \cdot 10^{-5} \text{ m/sek}$ .  $m = 6 \text{ m}$ ,  $H = 28 \text{ m}$ .

**Etap 1.** Początkowy tok postępowania jak w przykładzie 1. Na podstawie założonych warunków geologicznych ustalono, że maksymalna depresja  $s \approx 19 \text{ m}$ , przy  $h_{\min} = 9 \text{ m}$ . Z nomogramu 2\* przyjęto zasięg leja depresyjnego  $R \approx 480 \text{ m}$ . Brakującą do projektu studni wartość  $r$  ustalono według nomogramu 3. Łącząc punkt na osi „m”, odpowiadający wartości  $m = 6$  z punktem na osi „k”, odpowiadającym wartości  $k = 7 \cdot 10^{-5}$ , otrzymano na osi „m · k”, punkt pomocniczy C'. Następnie przez połączenie punktu  $Q = 20 \text{ m}^3/\text{godz}$  na osi „Q” z punktem C' otrzymano na osi „lgR — lgr” punkt C". Prowadząc prostą przez punkt C" na osi „lgR — lgr” oraz punkt odpowiadający wartości  $19 \text{ m}$  na osi „s” otrzymano na przecięciu prostej z osią „lgR — lgr” punkt odpowiadający wartości  $\approx 3,9$ . Wartość  $3,9$  przeniesiono na nomogram 3b, na którym ustalono wartość  $r \approx 0,06 \text{ m}$ , przyjęto z nadmiarem  $d_1 = 5''$ , przy  $R = 480 \text{ m}$ . Następnie za pomocą nomogramu 1\* sprawdzono, czy nie została przekroczona dopuszczalna prędkość wlotowa wody na filtrze  $V_{kr}$ . Ustalono, że maksymalna dopuszczalna wydajność studni o wyżej ustalonych wymiarach filtra  $Q_{\max} \approx 11,5 \text{ m}^3/\text{godz}$ .

**Etap 2.** Z obliczeń przeprowadzonych w etapie 1 wynika, że  $Q_{\max} < Q_{z\dot{a}l}$ , stąd wniosek, że dopuszczalna prędkość wlotowa wody na filtrze została przekroczona, a więc ustalona powierzchnia filtra nie może być przyjęta do projektu. W danym przypadku, przy studni pełnej, jedyną drogą do zmniejszenia prędkości wlotowej wody na filtrze jest powiększenie powierzchni filtra, przez zwiększenie jego średnicy. Mając dane  $k$ ,  $Q$  oraz  $l = m$  ustalono za pomocą nomogramu 1\* minimalną dopuszczalną średnicę filtra z nadmiarem  $d_2 = 9''$ . Powiększenie powierzchni filtra spowodowało zwiększenie wydajności projektowanej studni, która osiągnęła — jak wyznaczono według nomogramu 3a i 3b — wartość  $Q_{proj} \approx 22 \text{ m}^3/\text{godz}$ , przy  $k = 7 \cdot 10^{-5} \text{ m/sek}$ ,  $m = 6 \text{ m}$ ,  $s = 19 \text{ m}$ ,  $R = 480 \text{ m}$  oraz zmienionej średnicy filtra  $d = 9''$  (obliczenie wydajności nie zostało przedstawione graficznie na nomogramie).

**Etap 3.** Wielkości ustalone w etapie 2 nie mogły być przyjęte do projektu, ponieważ nie spełniają warunków:  $Q_{proj} = Q_{z\dot{a}l}$  oraz  $Q_{proj} \leq Q_{\max}$ . Jedynym swobodnym parametrem, który może spowodować zmniejszenie wydajności projektowanej studni dla spełnienia powyższych warunków jest depresja  $s$ . Dalsze obliczenia przeprowadzono dla przypadku gra-

nicznego  $Q_{proj} = Q_{z\dot{a}l} = Q_{\max}$ . Biorąc pod uwagę, że przyjęte nowe wymiary filtra ustalono dla  $Q_{\max} = Q_{z\dot{a}l} = 20 \text{ m}^3/\text{godz}$ , należy doprowadzić do spełnienia warunku  $Q_{proj} = Q_{z\dot{a}l}$ . Ustalono więc największą dopuszczalną depresję dla projektowanej studni przy założeniu, że będzie to depresja odpowiadająca założonej wydajności, tj.  $Q_{z\dot{a}l} = 20 \text{ m}^3/\text{godz}$ . Ustalenie odpowiednich wartości depresji  $s$ , osiągnięto drogą kolejnych przybliżeń według schematu operacyjnego przedstawionego na ryc. 5 przy odpowiednich zmianach wartości  $R$ .

Jako I-sze przybliżenie przyjęto maksymalną możliwą do uzyskania depresję  $s = 19 \text{ m}$ . Łącząc punkty na nomogramie 2\*, odpowiadające wartości  $s = 19 \text{ m}$  na osi „s” oraz  $k = 7 \cdot 10^{-5}$  na osi „k” uzyskano I-sze przybliżenie wartości  $R \approx 480 \text{ m}$ . Następnie łącząc punkty na osiach nomogramu 3b, odpowiadające wartości  $R = 480 \text{ m}$  oraz  $d = 9''$  uzyskano wartość  $\lg R - \lg r \approx 3,62$ . Prowadząc prostą na nomogramie 3a przez punkty  $3,62$  na osi „lgR — lgr” oraz C' na osi „lgR — lgr” wyznaczony w etapie 1, otrzymano II-gie przybliżenie wartości  $s \approx 17,5 \text{ m}$ . Podstawiając ponownie wartość  $s = 17,5 \text{ m}$  do nomogramu 2\* uzyskano II-gie przybliżenie wartości  $R \approx 440 \text{ m}$ . Stwierdzono, że dalszy tok obliczeń jest niecelowy ze względu na nieuchwytną na nomogramie 3a różnicę między II i III przybliżeniem. Uzyskane wyniki ilustruje tab. II.

Jako ostateczne wyniki przyjęto  $d = 9''$ ,  $R = 440 \text{ m}$ ,  $s_{\max} = 17,5 \text{ m}$ . Zmniejszona o  $1,5 \text{ m}$  wartość depresji w stosunku do początkowo ustalonej wartości  $s = 19 \text{ m}$ , powoduje zwiększenie początkowej wartości  $h$  o  $1,5 \text{ m}$ , tj. do  $h = 10,5 \text{ m}$ .

Wyniki obliczeń w kolejnych etapach przykładu 3 zamieszczono w tab. III.

## WNIOSKI

1. Opracowane nomogramy pozwalają stosować na szeroką skalę proponowaną metodę kolejnych przybliżeń w praktyce projektowania i dokumentowania studni.
2. Metoda kolejnych przybliżeń oraz przedstawiony schemat obliczeń pozwalają przy zastosowaniu nomogramów na skrócenie czasu dokumentowania, bardziej racjonalne wykorzystanie warunków hydrogeologicznych i konstrukcyjnych oraz na ustalenie optymalnego wariantu studni.
3. Wykorzystanie niniejszego opracowania w praktyce przedsiębiorstw geologicznych umożliwi obniżenie kosztu projektowania i budowy studzien.

## SUMMARY

The nomogram presented in this article has been elaborated for frequently used Dupuit's formula, applied in computing a single full well characterized by piezometric water level.

In addition, a technique is given of computing certain parameters of well by means of the method of successive approximations using published nomograms. This method has been used to solve the problems that can be presented in the form of two equations with two unknowns. Moreover, a scheme of computation technique is presented in order to obtain an optimal variant of the projected full well with piezometric water level.

Besides a detailed description of a nomogram there are also given three examples of computations of wells. They illustrate the technique of applying nomograms, and present the method here considered, and the way of computations.

The method of successive approximations and the scheme of computations presented in this paper allow, using nomograms, to reduce time of documentation, and to use more reasonably the hydrogeological and constructional conditions, as well as to determine the most optimal variant of a well.

## РЕЗЮМЕ

Помещенная в статье номограмма составлена для часто применяемой формулы Дюпуи для расчета отдельного полного колодца с напорным горизонтом.

Кроме того приведен способ определения некоторых параметров колодца методом последовательных приближений с использованием опубликованных номограмм. Этот метод был применен для решения таких проблем, которые можно выразить двумя уравнениями с двумя неизвестными. Дается схема процесса расчетов, которые дают оптималь-

ный вариант проекта колодца с напорным горизонтом.

Кроме детального описания номограммы приведены три примера расчета колодцев, иллюстрирующие способ пользования номограммой и процесс расчетов по предложенному методу.

Метод последовательных приближений с использованием представленной схемы расчетов и применением номограмм не только ускоряет работы, но также предоставляет возможность наиболее рационального использования гидрогеологических и конструктивных условий и определения самого оптимального варианта колодца.