

Modelowanie przepływu cieczy przez ośrodki porowate

Wykład VII

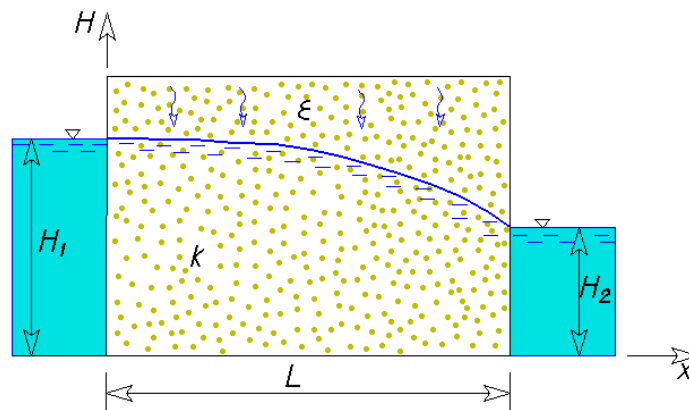
ROZWIĄZANIA ZAGADNIEŃ PRZEPŁYWU FILTRACYJNEGO METODAMI ANALITYCZNYMI.

7.1 Przepływ przez groblę z uwzględnieniem zasilania wodami infiltracyjnymi.

Do rozwiązania problemu przyjmijmy aproksymację procesu filtracyjnego Boussinesq'a [patrz rozdział IV monografii] przy założeniu, że upłynął odpowiednio długi czas i możemy proces filtracji rozpatrywać jako ustalony, więc w równaniu Boussinesq'a nie występuje pochodna cząstkowa wysokości hydraulicznej H po czasie. Rozpatrzmy trzy przypadki:

- równania nieliniowego Boussinesq'a,
- równania zlinearyzowanego Boussinesq'a przez Boussinesq'a,
- równania zlinearyzowanego Boussinesq'a przez Bagrowa i Wierygina.

Przyjmijmy do rozważań groblę (rys. 22) zasilaną wodami infiltracyjnymi pochodzącymi z opadów. Jeśli więc grobla będzie zbudowana z ośrodka gruntowego o współczynniku filtracji $k = const$ i pokryta jednorodną roślinnością, to intensywność infiltracji ε będzie miała również wartość stałą. Zagadnienie traktujemy jako płaskie, więc zgodnie z założeniami teorii Boussinesq'a sprowadza się ono do zagadnienia jednowymiarowego. Równanie Boussinesq'a dla rozważanego przypadku ma postać:



Rys. 22 Schemat przepływu przez groblę z infiltracją.

$$k \frac{d}{dx} \left(H \frac{dH}{dx} \right) + \varepsilon = 0. \quad (7.1)$$

Zlinearyzowane równanie Boussinesq'a przez Boussinesq'a ma postać:

$$kH_{sr} \frac{d^2 H}{dx^2} + \varepsilon = 0, \quad (7.2)$$

natomiast zlinearyzowane równanie Boussinesq'a przez Bagrowa – Wierygina można zapisać w postaci:

$$k \frac{d^2 \tau}{dx^2} + \varepsilon = 0, \quad (7.3)$$

przy czym $\tau = H^2/2$ oraz H_{sr} określa średnią miąższość strumienia filtrującej wody. Rozważmy na początku nieliniowe równanie i wprowadźmy nową zmienną u :

$$u = H \frac{dH}{dx}. \quad (7.4)$$

Wówczas po podstawieniu (7.4) do równania dostajemy:

$$k \frac{du}{dx} + \varepsilon = 0. \quad (7.5)$$

Rozwiązaniem powyższego równanie jest funkcja:

$$u = -\frac{\varepsilon}{k} x + C. \quad (7.6)$$

Wstawiając do (7.6) podstawienie (7.4) mamy:

$$(7.7) \quad H \frac{dH}{dx} = -\frac{\varepsilon}{k} x + C.$$

Rozwiązując powyższe równanie różniczkowe metodą rozdzielania zmiennych dostajemy funkcję wysokości hydraulicznej w postaci:

$$H = \sqrt{-\frac{\varepsilon}{k} x^2 + Cx + C_1}. \quad (7.8)$$

Rozważmy obecnie przypadek zlinearyzowanego równania Boussinesq'a w postaci (7.2). Całkując dwukrotnie po dx równanie (7.2), dostajemy rozwiązanie w postaci:

$$H = -\frac{\varepsilon x^2}{2kH_{sr}} + Cx + C_1, \quad (7.9)$$

Które, jak widać, różni się od rozwiązania (7.8).

Weźmy obecnie pod uwagę zlinearyzowane równanie Boussinesq'a przez Bagrowa – Wierygina w postaci (7.3):

$$\frac{d^2 \tau}{dx^2} = -\frac{\varepsilon}{k}. \quad (7.10)$$

Całkując dwukrotnie powyższe równanie (7.10) po dx dostajemy:

$$\tau = -\frac{\varepsilon x^2}{2k} + Cx + C_1. \quad (7.11)$$

Wiemy jednak, że $\tau = H^2/2$, więc uzyskujemy rozwiązanie w postaci:

$$H = \sqrt{-\frac{\varepsilon}{k}x^2 + Cx + C_1}, \quad (7.12)$$

które jest tożsame z rozwiązaniem nieliniowego równania Boussinesqa (7.8).

Rozważając charakter krzywych uzyskanych w rozwiązaniach widać, że w przypadku nieliniowego równania Boussinesqa i zlinearyzowanego równania Boussinesqa metodą Bagrowa - Wierygina otrzymana krzywa jest wycinkiem elipsy, natomiast w przypadku rozwiązania zlinearyzowanego równania Boussinesqa przez Boussinesqa krzywa reprezentująca zwierciadło swobodne jest parabolą. W dalszych rozważaniach ograniczymy się tylko do rozwiązań nieliniowego równania Boussinesqa (7.8), nie wnikając w problem, które z uzyskanych rozwiązań jest bliższe doświadczeniom.

Stałe C i C_1 wyznaczmy dla rozważanego zadania z warunków brzegowych:

dla $x = 0 \rightarrow H = H_1$, oraz dla $x = L \rightarrow H = H_2$. Po podstawieniu tych wartości do rozwiązania (7.12) dostaniemy ostateczną postać funkcji wysokości hydraulicznej w postaci:

$$H = \sqrt{-\frac{\varepsilon}{k}x^2 + \left(\frac{\varepsilon L}{k} - \frac{H_1^2 - H_2^2}{L}\right)x + H_1^2}. \quad (7.13)$$

Znając funkcję wysokości hydraulicznej możemy wyznaczyć przebieg funkcji prędkości filtracji oraz wydatek q przypadający na 1mb grobli przepływający przez dowolny przekrój prostopadły do kierunku filtracji:

$$v = -k \frac{dH}{dx} = -\frac{k \left(-\frac{2\varepsilon}{k}x + \frac{\varepsilon}{k}L - \frac{H_1^2 - H_2^2}{L} \right)}{2 \sqrt{-\frac{\varepsilon}{k}x^2 + \left(\frac{\varepsilon L}{k} - \frac{H_1^2 - H_2^2}{L}\right)x + H_1^2}}, \quad (7.14)$$

$$q = Hv = \varepsilon x - \frac{\varepsilon L}{2} + k \frac{H_1^2 - H_2^2}{2L}.$$

Z praktycznego punktu widzenia najbardziej interesuje nas wydatek po obu stronach grobli czyli dla $x = 0$ i dla $x = L$:

$$q|_{x=0} = \frac{k(H_1^2 - H_2^2)}{2L} - \frac{\varepsilon L}{2}, \quad (7.15)$$

$$q|_{x=L} = \frac{k(H_1^2 - H_2^2)}{2L} + \frac{\varepsilon L}{2}.$$

Stąd różnica:

$$q|_{x=L} - q|_{x=0} = \varepsilon L, \quad (7.16)$$

co było do przewidzenia, a wynik jest zgodny z przyjętymi warunkami brzegowymi zadania.

Przykład liczbowy.

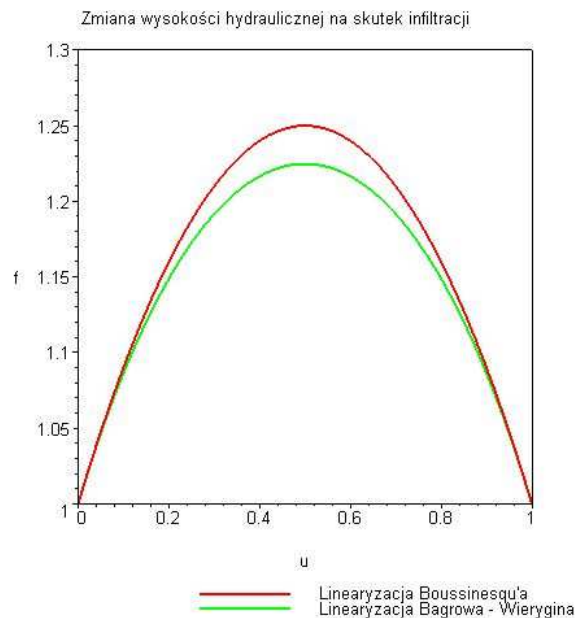
Rozważmy przepływ przez groblę wywołany działaniem infiltracji o intensywności $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$, gdy współczynnik filtracji $k = 10^{-5} \text{ m/s}$. Początkowy poziom wody wynosi 10m. Odległość L wynosi 100m. Porównamy rozwiązania uzyskane przy linearyzacji Boussinesq'a i Bagrowa Wierygina. Zakładając dla obydwu przypadków, że $H_1 = H_2 = H_0 = 10\text{m}$ rozwiązanie w pierwszym przypadku ma postać:

$$\frac{H}{H_0} = 100 * \left[-10^{-2} u^2 + 10^{-2} u + 0,01 \right],$$

a w drugim przypadku:

$$\frac{H}{H_0} = 10 \sqrt{-2 * 10^{-2} u^2 + 2 * 10^{-2} u + 0,01}.$$

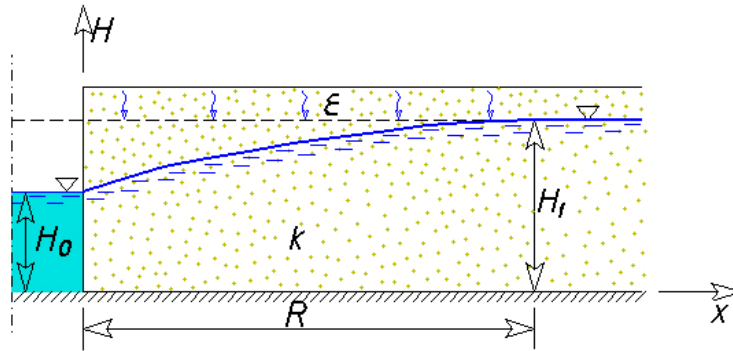
Wyniki względnej zmiany wysokości hydraulicznej pod wpływem infiltracji przedstawiono na rys. 23



Rys. 23 Wyniki obliczeń zmiany wysokości hydraulicznej ($f = \frac{H}{H_0}$ i $u = \frac{x}{L}$) (z wykorzystaniem oprogramowania Mapple 8).

7.2 Dopływ do rowu przy zasilaniu wodami infiltracyjnymi.

W warstwie wodonośnej zbudowanej z gruntu jednorodnego i izotropowego o współczynniku filtracji k wykonano rów sięgający jej spągu. Jej przekrój prostopadły do osi rowu przedstawiono na rys. 24.



Rys. 24. Schemat zadania dopływu wody do rowu przy zasilaniu wodami infiltracyjnymi.

Przed wykonaniem rowu zwierciadło wody było poziome i znajdowało się na wysokości H_1 w przyjętym układzie odniesienia. Natomiast po wykonaniu rowu poziom wody ustalił się na wysokości H_0 . Warstwa wodonośna zasilana jest w sposób ciągły w czasie wodami opadowymi z intensywnością infiltracji $\varepsilon = \text{const}$. Równanie Boussinesqa ma postać **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.** Rozwiązaniem tego równania, jak pokazano w poprzednim podrozdziale, jest funkcja wysokości hydraulicznej wyrażona wzorem (7.8). Stałe C i C_1 wyznaczymy z następujących warunków brzegowych:

Dla $x = 0 \rightarrow H = H_0$ oraz dla $x = R \rightarrow \frac{dH}{dx} = 0$ gdzie R oznacza zasięg obszaru infiltracji.

Podstawiając powyższe warunki brzegowe do wzoru (7.8), dostaniemy funkcję wysokości hydraulicznej wyrażoną wzorem:

$$H = \sqrt{-\frac{\varepsilon}{k} x^2 + 2\frac{\varepsilon}{k} Rx + H_0^2}. \quad (7.17)$$

Możemy zadać pytanie; w jakiej odległości R od początku układu współrzędnych wysokość hydrauliczna osiągnie wartość H_1 ? Podstawiając odpowiednie wartości do równania (7.17) dostaniemy:

$$R = \sqrt{\frac{k(H_1^2 - H_0^2)}{\varepsilon}}. \quad (7.18)$$

Przyjmując układ współrzędnych (jak na rys. 7.13) obliczymy funkcję prędkości filtrującej wody oraz wydatek na jednostkę długości rowu w postaci:

$$v = -k \frac{dH}{dx} = -\frac{-\varepsilon x + k \sqrt{\frac{\varepsilon}{k}(H_1^2 - H_0^2)}}{\sqrt{-\frac{\varepsilon}{k} x^2 + 4\frac{\varepsilon}{k}(H_1^2 - H_0^2)x + H_0^2}}, \quad (7.19)$$

$$q = Hv = -\varepsilon x + k \sqrt{\frac{\varepsilon}{k}(H_1^2 - H_0^2)}.$$

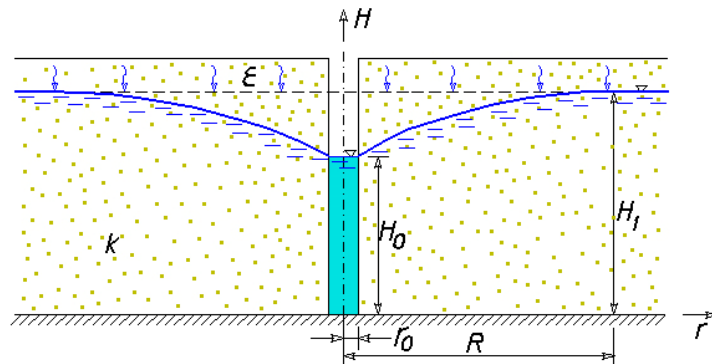
Dopływ do rowu na jednostkę jego długości wynosi:

$$q|_{x=0} = \sqrt{\varepsilon k (H_1^2 - H_0^2)} = \varepsilon R, \quad (7.20)$$

co zgodne jest z przyjętymi założeniami zadania.

7.3. Studnia zasilana wodami infiltracyjnymi.

W jednorodnej i izotropowej warstwie wodonośnej o współczynniku filtracji k wykonano pionową studnię o promieniu r_0 sięgająca jej spągu (studnia zupełna). Przekrój warstwy wodonośnej przechodzący przez os studni przedstawiono na rys. 7.15.



Rys. 25. Schemat zadania dopływu wód do studni zasilanej wodami infiltracyjnymi.

Założymy, że są spełnione następujące założenia wstępne:

- spąg warstwy wodonośnej ułożony jest poziomo,
- przed pompowaniem zwierciadło wody jest poziome i znajduje się na wysokości H_1 ponad warstwą nieprzepuszczalną,
- warstwa wodonośna zasilana jest wodami opadowymi z intensywnością infiltracji $\varepsilon = \text{const}$,
- przepływ jest ustalony, a poziom w studni znajduje się na wysokości H_0 ponad warstwą nieprzepuszczalną.

Dla powyższego przypadku nieliniowe równanie Boussinesqa ma postać:

$$k \frac{d}{dr} \left(H \frac{dH}{dr} \right) + \frac{k}{r} H \frac{dH}{dr} + \varepsilon = 0. \quad (7.21)$$

Wprowadźmy nową zmienną u :

$$u = H \frac{dH}{dr}. \quad (7.22)$$

Podstawiając (7.22) do równania (7.21) dostajemy:

$$\frac{du}{dr} + \frac{u}{r} + \frac{\varepsilon}{k} = 0. \quad (7.23)$$

Rozwiązaniem powyższego równania (7.23) jest funkcja:

$$u = -\frac{\varepsilon}{2k}r + \frac{C}{r}. \quad (7.24)$$

Uwzględniając (7.22) w (7.24), otrzymujemy równanie różniczkowe:

$$H \frac{dH}{dr} = -\frac{\varepsilon}{2k}r + \frac{C}{r}. \quad (7.25)$$

Stąd po rozwiązaniu metodą rozdzielania zmiennych dostajemy funkcje wysokości hydraulicznej w postaci:

$$H = \sqrt{-\frac{\varepsilon}{2k}r^2 + C \ln r + C_1}. \quad (7.26)$$

Uzyskane rozwiązanie jest ogólnym rozwiązaniem równania (7.21).

Dla rozpatrywanego przez nas zagadnienia brzegowego obliczymy stałe C i C_1 , korzystając z warunków brzegowych:

dla $r = r_0 \rightarrow H = H_0$ oraz dla $r = R \rightarrow \frac{dH}{dr} = 0$.

Z układu równań otrzymuje wartości stałych:

$$C = \frac{\varepsilon}{k}R^2 \quad (7.27)$$

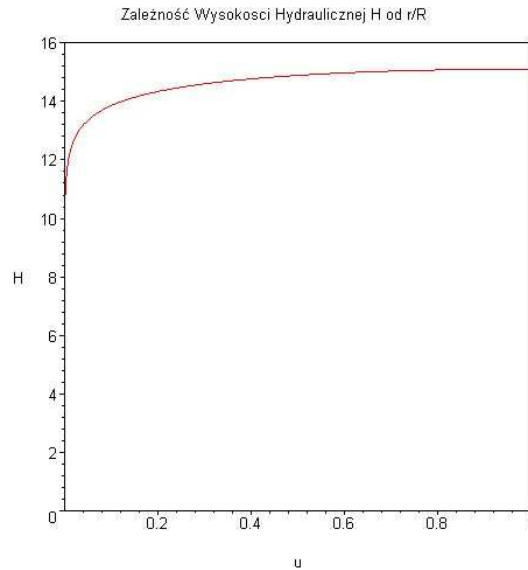
$$C_1 = H_0^2 + \frac{\varepsilon}{2k}r_0^2 - \frac{\varepsilon}{k}R^2 \ln r_0$$

Można więc określić funkcję wysokości hydraulicznej wzorem:

$$H = \sqrt{-\frac{\varepsilon}{2k}(r^2 - r_0^2) + \frac{\varepsilon}{k}R^2 \ln \frac{r}{r_0} + H_0^2}. \quad (7.28)$$

Przykład liczbowy.

Obliczmy przebieg funkcji wysokości hydraulicznej w warstwie gruntu o współczynniku filtracji $k = 10^{-5} \text{ m/s}$, zasilanego wodami infiltracyjnymi o intensywności $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$. Przyjmuje się zasięg obszaru $R=1000\text{m}$, a poziom wody w studni na wysokości $H_0 = 10\text{m}$.



Rys. 26. Przebieg funkcji wysokości hydraulicznej H w zależności od $u=r/R$.

Znając funkcję wysokości hydraulicznej możemy obliczyć funkcję prędkości filtracji i wydatek przepływający przez pobocznice walca o promieniu r i wysokości hydraulicznej H:

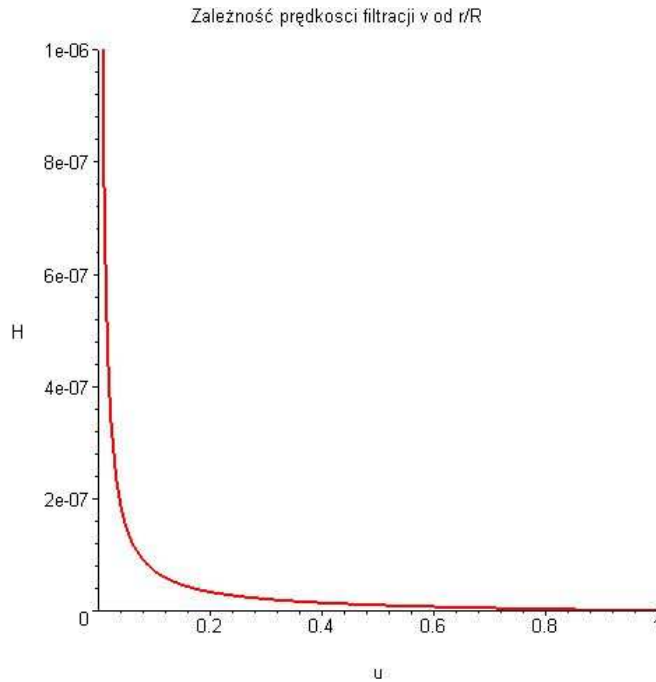
$$v = -k \frac{dH}{dr} = \frac{-\varepsilon r + \varepsilon \frac{R^2}{r}}{2 \sqrt{-\frac{\varepsilon}{2k}(r^2 - r_0^2) + \frac{\varepsilon}{k} R^2 \ln \frac{r}{r_0} + H_0^2}},$$

(7.29)

$$Q = 2\pi r H v = \pi \varepsilon (R^2 - r^2).$$

Przyjmując te same dane jak w poprzednich obliczeniach wysokości hydraulicznej H otrzymamy zmienność funkcji prędkości filtracji v w zależności od bezwymiarowej zmiennej

$u = \frac{r}{R}$. Poniżej przedstawiono wykres zmiany prędkości z odległości od studni.



Rys. 27. Funkcja prędkości filtracji przy zasilaniu wodami infiltracyjnymi $u = r/R$.

Dla $r = r_0$ wydatek studni wynosi:

$$Q|_{r=r_0} = \pi \varepsilon (R^2 - r_0^2). \quad (7.30)$$

Najczęściej przyjmuje się, że

$$Q|_{r=r_0} = \pi \varepsilon R^2, \quad (7.31)$$

gdyż studnia zasilana jest również wodami opadowymi z powierzchni πr_0^2 .

W równaniach od (7.27) do (7.31) występuje nieznaną wielkość promienia zasięgu leja depresji R . Wyznaczyć ją można, kładąc dodatkowy warunek brzegowy: dla $r = R \rightarrow H = H_1$. Stąd mamy:

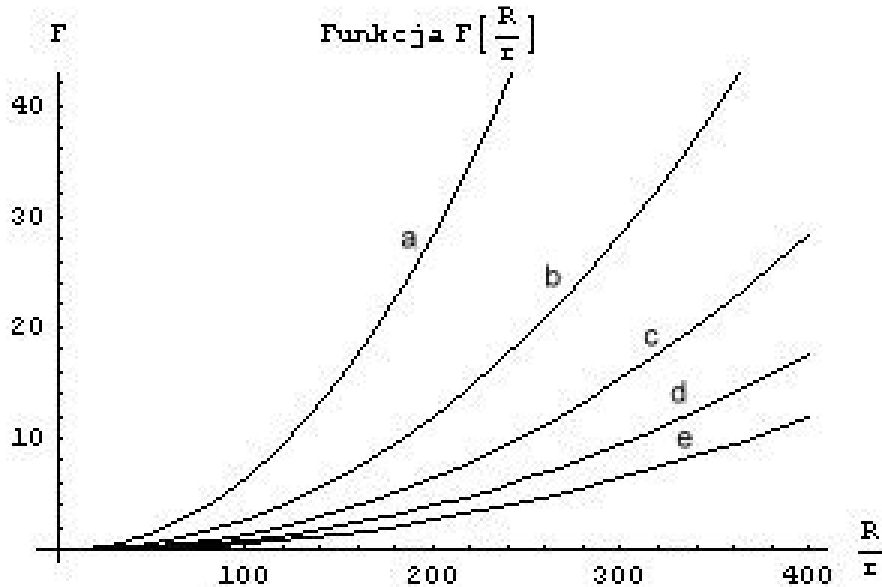
$$H_1 = \sqrt{-\frac{\varepsilon}{2k}(R^2 - r_0^2) + \frac{\varepsilon}{k} R^2 \ln \frac{R}{r_0} + H_0^2}. \quad (7.32)$$

Powyższe równanie jest równaniem uwikłanym. Najłatwiej znaleźć wartość R przekształcając równanie (7.32) do postaci:

$$\frac{k(H_1^2 - H_0^2)}{\varepsilon r_0^2} - \frac{1}{2} = \frac{R^2}{r_0^2} \left(\ln \left(\frac{R}{r_0} \right) - \frac{1}{2} \right). \quad (7.33)$$

Obliczając lewą stronę równania z wykresu 26 otrzymamy bezpośrednio wartość R . Należy wziąć pod uwagę, że wielkości rzędnej F na wykresach wykonanych dla różnych wartości r_0 wynoszą:

$$F = 10^{-6} \left[\frac{k(H_1^2 - H_0^2)}{\varepsilon r_0^2} - \frac{1}{2} \right]. \quad (7.34)$$



Rys. 28. Zależność funkcji F od $\frac{R}{r_0}$ dla wartości

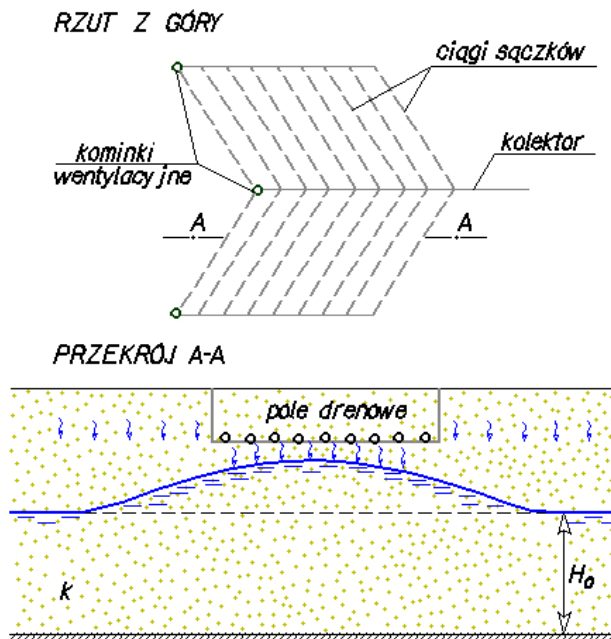
a) $r_0 = 0,1m$, b) $r_0 = 0,15m$, c) $r_0 = 0,2m$, d) $r_0 = 0,25m$, e) $r_0 = 0,3m$;

(obliczenia i wykres Mathematica 5).

Jeżeli znamy dopływ wody do studni i intensywność infiltracji ε obliczenia promienia zasięgu zasilania obliczamy bezpośrednio ze wzoru (7.31).

7.4. Obliczanie pól drenowych.

W typowej kanalizacji polegającej na odprowadzaniu wód ściekowych do gruntu wody ściekowe przechodzą najpierw przez komory wstępnego oczyszczania, w których oddzielone zostają tłuszcze, grubsze zawiesiny, a ścieki ulegają fermentacji i później przepływają na pola drenowe, gdzie następuje ich infiltracja w grunt. Infiltracja w grunt następuje poprzez instalację, która jest identyczna jak typowa instalacja drenażu poziomego. Przykładowe pole drenowe przedstawiono na rys. 29

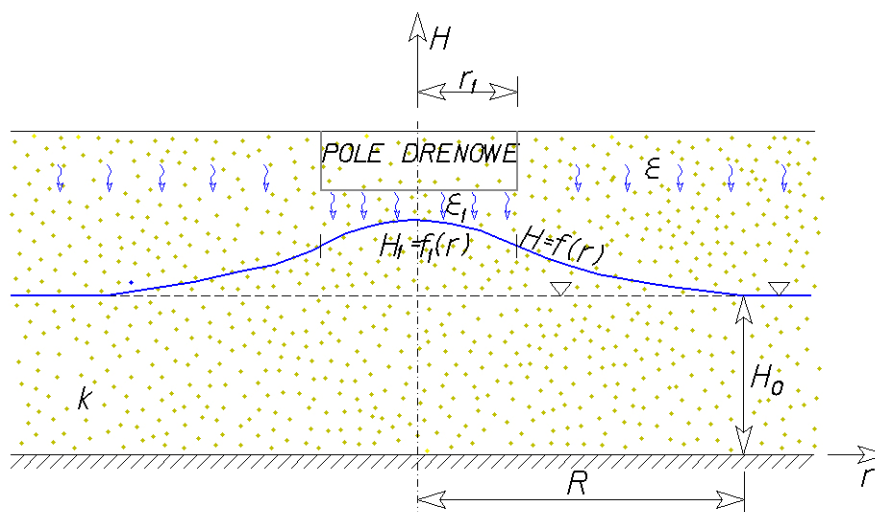


Rys. 29. Przykładowe pole drenowe.

W niniejszym podrozdziale zajmiemy się wyznaczeniem maksymalnego zwierciadła wody w obszarze wpływu pola drenowego, znając wydatek tego pola Q [zakładana objętość wód ściekowych odprowadzana do gruntu w czasie] i jego powierzchnię F . Maksymalny poziom zwierciadła wody wyznaczmy przy następujących założeniach wstępnych:

- pole drenowe jest założone w jednorodnej i izotropowej warstwie wodonośnej o współczynniku filtracji k ,
- spąg warstwy wodonośnej położony jest poziomo,
- przed założeniem pola drenowego, zwierciadło wody było poziome znajdowało się na wysokości H_0 ponad warstwą nieprzepuszczalną,
- warstwa wodonośna zasilana jest wodami opadowymi, przy czym średnia wartość infiltracji przy maksymalnych opadach rocznych wynosi ε ,
- wody ściekowe są równomiernie rozprowadzane na całej powierzchni F .

Aby przy takich warunkach obliczyć pole drenowe, skonstruujemy schemat obliczeniowy - rys. 30.



Rys. 30. Schemat obliczeniowy pola drenowego.

Wprowadźmy zastępczy promień pola drenowego $r_1 = \sqrt{F/\pi}$ i założmy radialny rozptyw wody. Wartość infiltracji pod polem drenowym ε_1 wyznaczmy ze wzoru:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon + \varepsilon_d, \quad (7.35)$$

gdzie ε oznacza średnią wartość infiltracji przy maksymalnych opadach rocznych, a ε_d określa infiltrację wywołaną odprowadzeniem wód ściekowych. Promień oddziaływania pola drenowego R wyznaczamy ze wzoru:

$$R = \sqrt{\frac{Q}{\pi \Delta \varepsilon}}, \quad (7.36)$$

przy czym Q oznacza wydatek pola drenowego, a $\Delta \varepsilon$ określa zmianę intensywności infiltracji wywołaną odprowadzeniem wód ściekowych do gruntu [na skutek odprowadzania wód ściekowych do gruntu zmieni się transpiracja, parowanie z gleby, odpływ podziemny, a tym samym zmieni się również intensywność infiltracji ε].

Dla przyjętego schematu obliczeniowego stosujemy równanie Boussinesqa dla przypadku zagadnienia osiowo – symetrycznego, równanie (7.21), którego rozwiązaniem jest uzyskana w poprzednim podrozdziale funkcja:

$$H = \sqrt{-\frac{\varepsilon}{2k} r^2 + C \ln r + C_1}.$$

Dla $0 \leq r \leq r_1$ zwierciadło wody opisuje zatem funkcja:

$$H_1 = \sqrt{-\frac{\varepsilon_1}{2k} r^2 + C_1 \ln r + C_1'}, \quad (7.37)$$

a dla $r_1 \leq r \leq R$ funkcja:

$$H = \sqrt{-\frac{\varepsilon}{2k} r^2 + C \ln r + C}. \quad (7.38)$$

Stałe C, C', C_1, C_1' wyznaczmy z warunków brzegowych:

$$\left. \frac{dH_1}{dr} \right|_{r=0} = 0 \quad H \Big|_{r=R} = H_0, \quad (7.39)$$

$$H_1 \Big|_{r=r_1} = H \Big|_{r=r_1} \quad \left. \frac{dH_1}{dr} \right|_{r=r_1} = \left. \frac{dH}{dr} \right|_{r=r_1}.$$

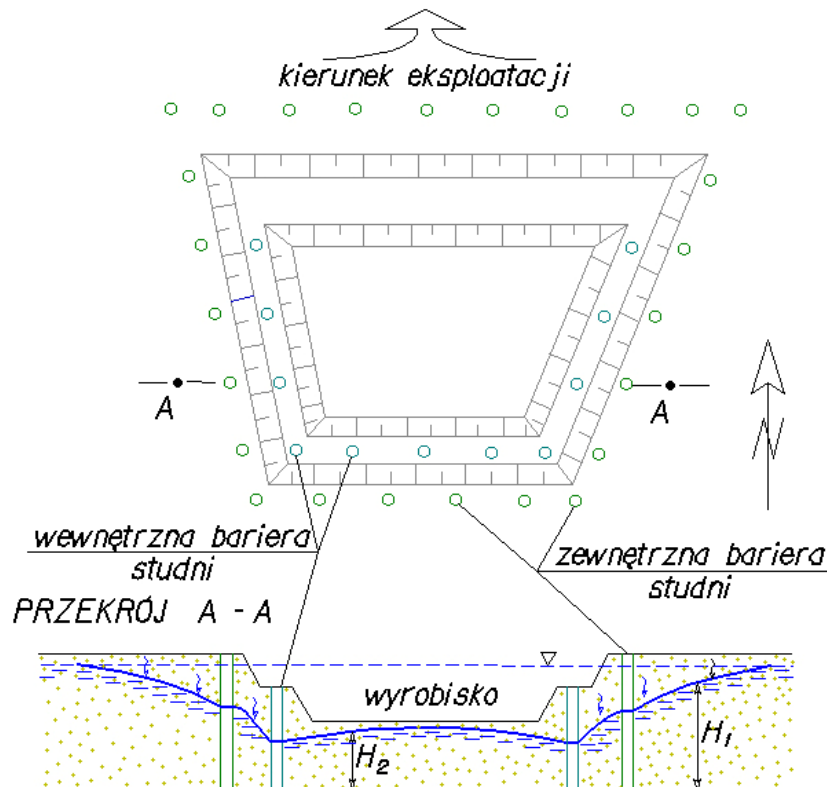
Wstawiając powyższe warunki brzegowe (7.39) do rozwiązań (7.37) i (7.38), otrzymujemy układ 4 równań algebraicznych, z których wyliczamy stałe C, C', C_1, C_1' :

$$\begin{aligned}
C_1 &= 0, \\
C &= \frac{\varepsilon}{k} r_1^2 - \frac{\varepsilon_1}{k} r_1^2, \\
C_1' &= \frac{\varepsilon_1}{2k} r_1^2 - \frac{\varepsilon}{2k} r_1^2 + C \ln r_1 + H_0 + \frac{\varepsilon}{2k} R^2 - C \ln R, \\
C' &= H_0 + \frac{\varepsilon}{2k} R^2 - C \ln R.
\end{aligned}
\tag{7.40}$$

Wstawiając powyższe stałe do (7.37) i (7.38), uzyskamy maksymalny poziom zwierciadła wody przy czynnym polu drenowym. Pole drenowe musi być oczywiście założone powyżej uzyskanego zwierciadła wody i odbierać założony wydatek wód ściekowych.

7.5 Szacowanie dopływu wody do odkrywek górniczych metodą wielkiej studni.

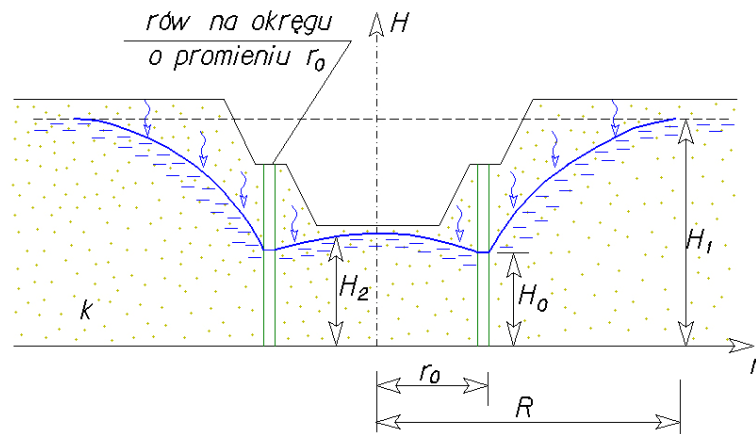
W górnictwie odkrywkowym do obniżenia zwierciadła wody zapewniającego ciągłość eksploatacji, stosuje się bariery studni. Rozważmy dla przykładu odkrywkę z dwoma barierami studni: zewnętrzną i wewnętrzną – rys. 31



Rys. 31. Schemat do obliczeń odkrywki z barierami studni (zewnętrzna i wewnętrzna).

Uzyskanie ścisłego rozwiązania w postaci zamkniętej jest dla barier studni nawet w stosunkowo prostych warunkach hydrogeologicznych trudne, jeżeli nawet niemożliwe. Zadanie takie rozwiązuje się metodami numerycznymi w oparciu o ogólne równanie Boussinesqa. Jedną ze stosowanych metod obliczeń jest metoda wielkiej studni. Polega ona na tym, że odwadniany obszar obejmowany barierą wewnętrzną sprowadza się do powierzchni kołowej o promieniu r_0 . Zakłada się ponadto, że dopływ odbywa się poboczną walca o promieniu r_0 i że jest to dopływ radialny. Przy tak poczynionych

założeniach, schemat obliczeniowy dopływu do wyrobiska, odpowiada schematowi dopływu do studni – rys. 32



Rys. 32 Schemat obliczeniowy dopływu do wyrobiska

Korzystając z założeń poczynionych dla rozwiązania zagadnienia „wielkiej studni” należy określić:

- ❑ promień depresji R na podstawie wykresu 7.15,
- ❑ dopływ do wyrobiska:

$$Q = \pi \varepsilon R^2; \quad (7.41)$$

- ❑ położenie zwierciadła wody w obrębie lejka depresji:

$$H = \sqrt{-\frac{\varepsilon}{2k}(r^2 - r_0^2) + \frac{\varepsilon}{k}R^2 \ln \frac{r}{r_0} + H_0^2}, \quad (7.42)$$

przy czym $r_0 = \sqrt{\frac{F}{\pi}}$.

Jeśli powierzchnia obejmowana barierą wewnętrzną jest zbliżona do kwadratu lub prostokąta:

$$r_0 = \eta \frac{a+b}{4}, \quad (7.43)$$

gdzie:

a – długość wyrobiska,

b – szerokość wyrobiska,

η - współczynnik zależny od stosunku b/a zgodnie z tabelą 7.2.

Tabela 7.2

$\frac{b}{a}$	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
η	1,0	1,12	1,16	1,18	1,18	1,18