ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2004
Seria: GÓRNICTWO z. 260 Nr kol. 1649

Edward CEMPIEL
Politechnika Śląska, Gliwice

WYZNACZANIE NATĘŻENIA PRZEPŁYWU WODY I PRZEPUSZCZALNOŚCI MATERIAŁU ZASYPOWEGO W LIKWIDOWANYCH SZYBACH

Streszczenie. Przedstawiono podstawy teoretyczne wyznaczania przepływu wody przez materiał zasypowy w likwidowanych szybach. Opracowano wzory obliczeniowe pozwalające na określenie współczynnika filtracji materiału zasypowego w podsadzanym szybie.

METHOD OF MARKING THE PENETRABILITY OF MINERAL MATERIAL AND INTENSITY OF WATER FLOW IN LIQUIDATED SHAFTS

Summary. The theoretical bases of marking the water flow through mineral material in liquidated shafts. The equations which allow to determine the coefficient of permeability of mineral material in shaft have been elaborated.

1. Wprowadzenie

Sposób likwidacji i materiały użyte do likwidacji szybu powinny być dostosowane do stanu technicznego szybu, jego wyposażenia, stanu wyrobisk przyszybowych oraz warunków hydrogeologicznych i geologiczno-inżynierskich górotworu [7]. Do podsadzania likwidowanych szybów są wykorzystywane różne materiały skalne, których przepuszczalność może wahać się w szerokich granicach. Materiał skalny stosowany do wykonywania zasypu w szybach zawodnionych powinien mieć dokładną ocenę własności filtracyjnych.

Przepływ wody przez materiał zasypowy można rozpatrywać jako przepływ ustalony lub nieustalony. W opisie matematycznym przepływu wody mogą być wykorzystane modele uproszczone lub modele bardziej szczegółowe.

W jednym z likwidowanych szybów o dużym zawodnieniu zaistniała potrzeba oceny warunków przepływu wody przez przepuszczalny materiał zasypowy, a szczególnie zmian przepuszczalności tego materiału w tworzonym korku zasypowym. Istniejące uproszczone metody obliczeniowe bazujące na rozwiązaniach dla ruchu ustalonego nie pozwalały na pełniejszą analizę przepływu wody przez materiał zasypowy w warunkach ruchu nieustalonego. Fakt ten był przesłanką do ściślejszego teoretycznego ujęcia problemu i przyjęcia modelu przepływu nieustalonego, dokładniej odzwierciedlającego rzeczywiste warunki. Sformułowany został pełny opis matematyczny tego modelu. Bezpośrednie obserwacje i pomiary piętrzenia wody nad zasypem w likwidowanym szybie pozwoliły na bieżącą ocenę własności filtracyjnych zasypu i ich zmian w czasie oraz ocenę ilości wody filtrującej przez zasyp.

Poniżej przedstawiono metody oceny przepuszczalności materiału zasypowego, natężenia filtracji wody przez ten materiał i przebiegu piętrzenia wody nad zasypem. Wyprowadzone wzory pozwalają na ściślejszą ocenę warunków przepływu wody, a porównanie uzyskanych wyników z modelem uproszczonym również na ocenę dokładności metod uproszczonych.

2. Model fizyczny przepływu wody przez materiał zasypowy w likwidowanym szybie

Dopływ wody do rury szybowej może mieć charakter skoncentrowanego, punktowego wypływu na pewnych poziomach lub też charakter rozproszony w postaci licznych wycieków i wykropleń spoza obmurza obejmujących określony odcinek szybu. W przypadku korka zasypowego usytuowanego poniżej stref wycieków woda dopływająca do szybu stanowi dopływ zewnętrzny, który przypada na górną powierzchnię zasypu.

Model przepływu wody przez zasyp oparto na pewnych uproszczeniach, to znaczy założono stały dopływ wody do szybu (Q = const) oraz stałą wartość wysokości zasypu (l = const) w analizowanym okresie pomiarowym. Jeżeli nad zasypem nie występuje piętrzenie wody lub słup spiętrzonej wody ma w przybliżeniu wartość stałą, to woda dopływająca do szybu w całości przepływa przez korek zasypowy. W takim przypadku wielkość przepływu przez korek zasypowy Q_f jest równa wielkości dopływu wody do szybu Q, a tym samym mamy do czynienia z ruchem ustalonym ($Q_f = Q$). W przypadku postępującego piętrzenia wody nad zasypem tylko część wody z ogólnego dopływu do szybu przepływa przez zasyp, a

pozostała część wody gromadzi się nad zasypem ($Q_f < Q$). Wielkość przepływu wody przez zasyp Q_f zmienia się stopniowo, rosnąc wraz ze wzrostem wysokości słupa wody gromadzącej się nad zasypem, z uwagi na wzrost naporu hydrostatycznego i rosnący tym samym spadek hydrauliczny. Mamy do czynienia z nieustalonym przepływem wody przez zasyp. Równanie bilansu poszczególnych składników można sformułować następująco:

$$V_z = V - V_f \tag{1}$$

gdzie: V – objętość wody dopływającej do szybu w czasie t,

V_f – objętość wody, która przepłynęła przez zasyp w czasie t,

V_z – objętość wody zgromadzonej nad zasypem po czasie t.

W przypadku braku piętrzenia wody nad zasypem składowa $V_z = 0$ i powyższe równanie upraszcza się do postaci opisującej ustalony ruch wody (całość wody dopływającej do szybu przepływa przez zasyp $Q = Q_f$):

$$V = V_f \tag{1a}$$

3. Uproszczone metody obliczeniowe

W obliczeniach przepływu wody przez materiał zasypowy w likwidowanych szybach wykorzystywane są rozwiązania z zakresu dynamiki wód podziemnych dla filtracji liniowej podporządkowanej prawu Darcy'ego oraz filtracji turbulentnej (fluacji), którą opisuje prawo Krasnopolskiego [2, 3, 4, 5, 6]. Stosowane są metody obliczeniowe oparte na prostym modelu przepływu ustalonego przez korek filtracyjny, wyrażone równaniami:

- dla filtracji liniowej: $$Q = F * k * i \tag{2}$$

- dla filtracji turbulentnej: $$Q = F * K * \sqrt{i} \tag{3}$$

W przypadku oceny współczynnika filtracji materiału zasypowego równania te przyjmują następującą postać:

- dla filtracji liniowej: $$k = \frac{Q}{F * i} \tag{2a}$$

- dla filtracji turbulentnej: $$K = \frac{Q}{F * \sqrt{i}} \tag{3a}$$

gdzie: Q – dopływ wody do szybu, m^3/s,

F – powierzchnia przekroju poprzecznego szybu, m^2,

$$F = \frac{\pi * d^2}{4}$$

d – średnica szybu w świetle obudowy, m,

i – spadek hydrauliczny

$$i = \frac{h}{l}$$

l – wysokość słupa zasypu w szybie na odcinku strefy przepływu wody, m,

h – wysokość słupa wody liczona od spągu strefy przepływu w zasypie, m,

k – współczynnik filtracji materiału zasypowego, m/s,

K – współczynnik fluacji materiału zasypowego, m/s,

pozostałe oznaczenia jak wyżej.

Jako kryterium stosowalności prawa Darcy'ego dla materiału grubookruchowego można dokonać oceny prędkości krytycznej v_{kr}, np. według Macioszczyka [3, 4, 5], prędkość krytyczną określa się na podstawie wartości współczynnika filtracji k według wzoru:

$$v_{ke} = 0{,}02 * k^{0{,}37} \tag{4}$$

Równania powyższe można stosować, gdy zwierciadło wody w szybie występuje poniżej górnej powierzchni korka zasypowego (spadek hydrauliczny i = 1) lub gdy poziom wody utrzymuje się na stałej wysokości nad korkiem zasypowym (i = const > 1).

W przypadku wystąpienia piętrzenia wody nad zasypem mamy do czynienia z nieustalonym ruchem wody, który można opisać w sposób uproszczony z wykorzystaniem powyżej przedstawionych równań, wydzielając przedziały, dla których zakładamy przepływ ustalony. W danym przedziale określa się średni spadek hydrauliczny jako średnią arytmetyczną z wartości początkowej i końcowej ($i_{śr} = (i_1+i_2)/2$). W obliczeniach należy uwzględnić natężenie filtracji wody przez zasyp Q_f, które jest mniejsze od całkowitego dopływu do szybu Q (o czym świadczy piętrzenie wody nad zasypem). W równaniach powyższych w miejsce dopływu wody do szybu Q należy wstawić natężenie filtracji wody przez zasyp Q_f, które obliczane jest w sposób przybliżony według następującego wzoru:

$$Q_f = Q - F*\Delta h/t \tag{5}$$

gdzie: $\Delta h = h_2 - h_1$ – przyrost słupa wody w szybie w czasie t.

4. Uściślony opis matematyczny przepływu wody w materiale zasypowym w likwidowanym szybie

Rozpatrując równanie (1) w odniesieniu do małego przyrostu czasu dt, możemy poszczególne składniki bilansu rozpisać następująco (rys. 1):

$$dV_z = dV - dV_f \tag{6}$$

gdzie: $dV_z = f\,dh$ – przyrost objętości wody gromadzącej się nad zasypem po czasie dt,

$dV = Q\,dt$ – przyrost objętości wody dopływającej do szybu w czasie dt,

$dV_f = Q_f\,dt$ – przyrost objętości wody filtrującej przez zasyp w czasie dt, gdzie Q_f określa się na podstawie prawa Darcy'ego,

$$Q_f = F * k * h/l$$

Q – dopływ wody do szybu,

Q_f – natężenie przepływu wody przez zasyp,

f – powierzchnia przekroju poprzecznego szybu na wysokości lustra wody,

F – powierzchnia przekroju poprzecznego szybu na odcinku zasypu,

l – wysokość słupa zasypu w szybie na odcinku strefy przepływu wody,

h – wysokość słupa wody liczona od spągu strefy przepływu w zasypie,

k – współczynnik filtracji materiału zasypowego.

Po wprowadzeniu poszczególnych składowych do równania (6) otrzymamy równanie różniczkowe o następującej postaci:

$$f\,dh = Q\,dt - (F*k*h/l)\,dt \tag{6a}$$

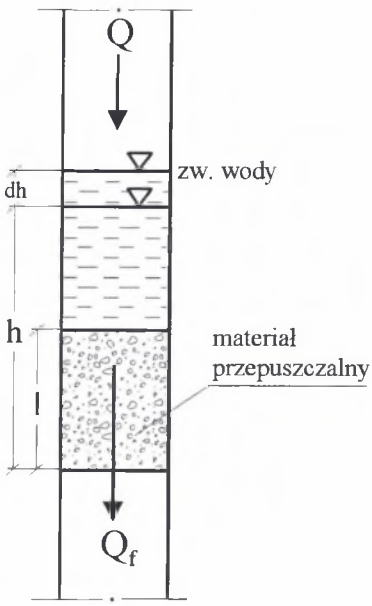
Równanie to po przekształceniu możemy zapisać następująco:

$$-\frac{f*l}{F*k} * \frac{dh}{h - \frac{Q*l}{F*k}} = dt \tag{6b}$$

Zapiszemy jeszcze : $h_{\max} = \frac{Q*l}{F*k}$

Występujący po lewej stronie równania parametr $Q*l/(F*k)$ jest stałą, która wyraża pewien maksymalny słup wody h_{max}, (wartości h_{max} jednak nie znamy, jeżeli nie znamy wartości współczynnika filtracji k). Po wprowadzeniu tego zapisu równanie powyższe przyjmuje następującą postać:

$$-\frac{f*l}{F*k} * \frac{dh}{h - h_{\max}} = dt \tag{6c}$$



Rys. 1. Schemat przepływu wody przez korek filtracyjny w szybie
Fig. 1. Scheme of water flow through filters cork in shaft

Rozwiązanie równania (6c) uzyskamy po scałkowaniu lewej strony w granicach od h_0 do h, a prawej strony w granicach od t_0 do t (przedział zmian naporu w odniesieniu do danego przedziału czasu) :

$$-\frac{f*l}{F*k}\int_{h_0}^{h}\frac{dh}{h-h_{\max}}=\int_{t_0}^{t}dt \tag{6d}$$

Po scałkowaniu obu stron równania w podanych granicach otrzymamy:

$$\frac{F*k}{f*l}(t-t_0)=\ln\left(\frac{h_0-h_{\max}}{h-h_{\max}}\right) \tag{7}$$

Równanie to jest równaniem uwikłanym ze względu na k (współczynnik filtracji), gdyż parametr k występuje także w wyrażeniu h_{max}, którego wartości również nie znamy. Równanie to można rozwiązać jedną z metod rozwiązywania równań uwikłanych [1] i wyznaczyć w ten sposób wartość współczynnika filtracji k. Równanie (7) można przedstawić w następującej postaci:

$$k=\frac{f*l}{F*(t-t_0)}\ln\left(\frac{h_0-h_{\max}}{h-h_{\max}}\right) \tag{7a}$$

W przypadku gdy $h_{max} = 0$ (dla $Q = 0$), powyższe równanie przyjmuje postać formuły wykorzystywanej do obliczeń współczynnika filtracji na podstawie badań metodą rurki Kamieńskiego [4, 5, 6].

Gdy znamy wartość współczynnika filtracji k, możemy określić przebieg piętrzenia wody nad zasypem w funkcji czasu po przekształceniu równania (7) do postaci:

$$h = h_{\max} - (h_{\max} - h_0) \cdot \exp\left(-\frac{F \cdot k}{f \cdot l}(t - t_0) \right) \tag{8}$$

Kształtowanie się natężenia filtracji wody przez zasyp Q_f w funkcji czasu można określić na podstawie wzoru (2), wprowadzając wartość parametru h według wzoru (8).

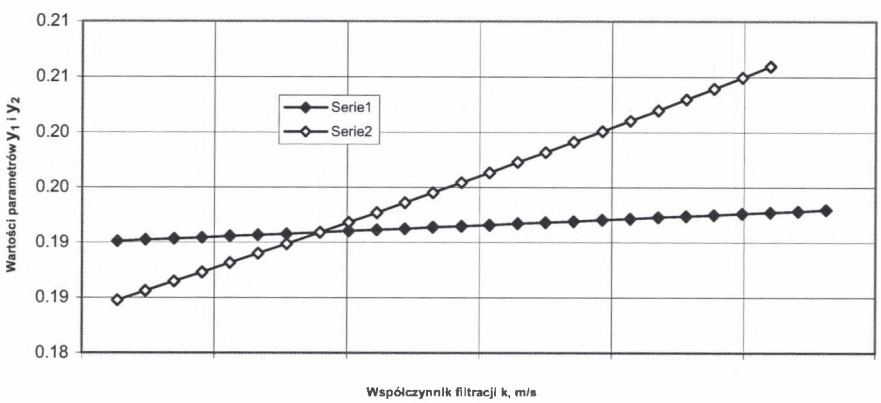
5. Ocena przepuszczalności materiału zasypowego w likwidowanym szybie

Likwidowany szyb o głębokości 255 m i średnicy w świetle obudowy d = 4,7 m należał do szybów o dużym zawodnieniu. Na odcinku od zrębu do poz. 96 m wycieki spoza obmurza wynosiły około 1,80 m^3/min. Szyb wykonano w latach 1954-62 w obudowie murowej z cegły i betonitów. Podszybia występowały na trzech poziomach: 96 m, 200 m i 245 m. Technologia zasypywania szybu zakładała sprowadzenie wody bezpośrednio poprzez materiał zasypowy na poz. 245 m. Z uwagi na duże zawodnienie szybu i wynikającą konieczność zapewnienia przepływu wody przez zasyp do podsadzania szybu przewidziano kruszywo mineralne o dużej wytrzymałości, odporne na kruszenie i nierozmakalne, charakteryzujące się odpowiednio wysoką przepuszczalnością. Woda wyciekająca na górnym odcinku szybu miała filtrować przez zasyp i wypływać na poziomie 245 m, i dalej spływać do systemu głównego odwadniania kopalni.

Do wypełniania szybu zastosowano kruszywo porfirowe o granulacji 31-65 mm. Po wypełnieniu rząpia szybu na odcinku około 7,5 m i usytuowaniu poziomu zasypu na głębokości około 247,5 m od powierzchni terenu (poziom zasypu około 2,5 m poniżej spągu wyrobisk podszybia poz. 245 m), zwierciadło wody w szybie ustaliło się na głębokości około 244 m, czyli na poziomie wyznaczonym przelewem do wyrobisk podszybia na poz. 245 m. Przez następnych kilka dni podsadzania szybu wytworzono słup zasypu o wysokości około 26 m, a poziom zasypu ustalił się na głębokości 229 m (około 16 m nad spągiem wlotu podszybia poz. 245 m). Wykonane następnie pomiary wykazały, że lustro wody występuje na głębokości 217 m od powierzchni terenu (około 12 m nad zasypem) i podnosi się z

prędkością około 1,33 cm/min. Podczas pomiaru lustro wody podniosło się o 80 cm w czasie 60 minut. Stwierdzone pomiarami piętrzenie wody nad zasypem wskazywało na utrudniony przepływ wody przez zasyp, a tym samym brak możliwości przepuszczenia przez zasyp całości wody dopływającej do szybu. Z prędkości podnoszenia się lustra wody wynikało, że z sumarycznego dopływu do szybu około 1,80 m^3/min przez zasyp filtruje około 1,57 m^3/min, a ponad zasypem pozostaje około 0,23 m^3/min. Wstrzymano zatem dalsze zasypywanie szybu, kontynuując pomiary położenia lustra wody. Pomiary wykonane w dniu następnym wykazały jednak, że lustro wody w szybie nie podnosi się i przez cały czas utrzymuje się na głębokości około 213,5 m. Ponad zasypem woda spiętrzyła się maksymalnie na wysokość 15,5 m. Dalsze pomiary potwierdziły, że proces piętrzenia wody został zahamowany i całość wody dopływającej do rury szybowej przepływa przez zasyp. Postanowiono dalej kontynuować zasypywanie szybu przy równoczesnej obserwacji poziomu lustra wody [8]. Podczas dalszych prac podsadzania szybu nie zaobserwowano już żadnych oznak piętrzenia wody na materiale zasypowym.

W obliczeniach przepływu wody przez materiał zasypowy przyjęto model przepływu laminarnego (obliczenia prędkości filtracji wykazały jednak, że jest ona nieco wyższa od prędkości krytycznej). Do obliczeń wykorzystano modele przepływu ustalonego – wzór (2a) i nieustalonego – wzór (7a). Obliczenia według wzoru (7a) przeprowadzono sposobem graficznym, rys. 2. Wyniki obliczeń zestawiono w tablicy 1.



Rys. 2. Wyniki obliczeń współczynnika filtracji sposobem graficznym
Fig. 2. Results of calculated coefficient of permeability

Tablica 1

Wyniki obliczeń współczynnika filtracji materiału zasypowego

Lp.	Parametr	Ozna-czenie	Jedno-stka	Wartość
Obliczenia dla ruchu nieustalonego na podstawie wzoru (7a)				
1	Wielkość dopływu wody do szybu	Q	m^3/min	1,80
2	Srednica szybu w świetle obudowy	d	m	4,7
3	Powierzchnia przekroju poprzecznego	F	m^2	17,35
4	Wysokość zasypu w szybie (od spągu poz. 245)	l	m	16,0
5	Wysokość słupa wody (od spągu poz. 245 m)	h_0	m	28,0
6	Wysokość słupa wody (od spągu poz. 245 m)	h	m	28,8
7	Czas rozpoczęcia pomiarów piętrzenia wody	t_0	godz	0
8	Czas zakończenia pomiarów piętrzenia wody	t	godz	1
9	**Współczynnik filtracji**	**k**	**m/s**	**$8,486*10^{-4}$**
10	Średni spadek hydrauliczny	$i_{śr}$		1,775
11	Srednia prędkość filtracji	$v_{śr}$	m/s	$1,485*10^{-3}$
12	Prędkość krytyczna	v_{kr}	m/s	$1,460*10^{-3}$
Obliczenia dla ruchu ustalonego na podstawie wzoru (2a)				
13	Natężenie filtracji wody przez zasyp	Q_f	m^3/min	1,569
14	Wysokość zasypu w szybie (od spągu poz. 245)	l	m	16,0
15	Wysokość słupa wody (od spągu poz. 245 m)	h_1	m	28,0
16	Wysokość słupa wody (od spągu poz. 245 m)	h_2	m	28,8
17	Sredni spadek hydrauliczny	$i_{śr}$		1,775
18	**Współczynnik filtracji**	**k**	**m/s**	**$8,490*10^{-4}$**
19	Natężenie filtracji wody przez zasyp	Q_f	m^3/min	1,569
20	Wysokość zasypu w szybie (od spągu poz. 245)	l	m	16,0
21	Wysokość słupa wody (od spągu poz. 245 m)	h_2	m	31,5
22	Sredni spadek hydrauliczny	$i_{śr}$		1,969
23	**Współczynnik filtracji**	**k**	**m/s**	**$8,783*10^{-4}$**

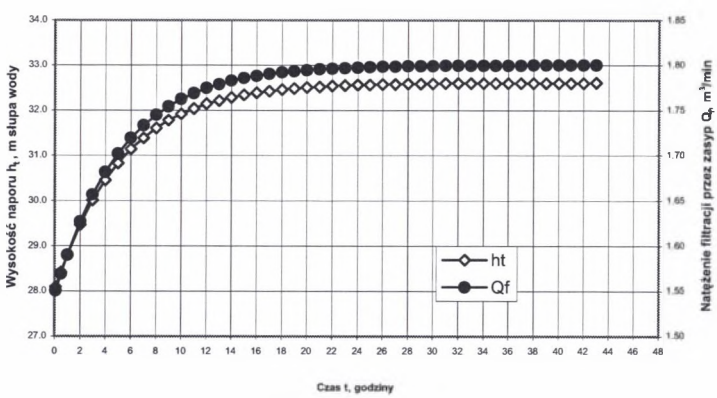
Współczynnik filtracji materiału zasypowego wyznaczony na podstawie wyników pomiarów wykonanych w chwili zaobserwowania piętrzenia wody wynosi $8,49*10^{-4}$ m/s, natomiast obliczony na podstawie wyników pomiarów wykonanych w dniu następnym, po stabilizacji zwierciadła wody, wynosi $8,78*10^{-4}$ m/s. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że wartości współczynnika filtracji materiału zasypowego określone dla tych dwóch stanów różnią się między sobą tylko nieznacznie. Piętrzenie wody nad zasypem wystąpiło przy wartości współczynnika filtracji $8,49*10^{-4}$ m/s, jednak przy stosunkowo niewielkim wzroście tego parametru do wartości $8,78*10^{-4}$ m/s ustalił się stan równowagi i cała ilość wody

przepływała przez zasyp. Przyczyny zmian współczynnika filtracji i warunków przepływu wody przez zasyp należy wiązać z zagęszczaniem materiału w kolumnie zasypowej oraz rozdrabnianiem kruszywa w procesie zasypu do rury szybowej. Dzięki wysokim parametrom wytrzymałościowym kruszywa intensywność procesu rozdrabniania była jednak ograniczona.

Obliczenia współczynnika filtracji wykonane na podstawie wyników pomiarów kształtowania się stanu wody w szybie wykazały, że wartość współczynnika filtracji zdeponowanego materiału zasypowego jest około 2,4 razy niższa od wartości określonej w założeniach projektowych dla takiego materiału (wartość zakładana w projekcie: $k > 2{,}1*10^{-3}$ m/s). W projekcie dokonano przybliżonej oceny przepuszczalności na podstawie składu granulometrycznego materiału, co okazało się nieścisłe.

6. Piętrzenie wody i przepływ przez materiał zasypowy

W celu oceny przebiegu piętrzenia wody nad korkiem zasypowym w likwidowanym szybie przeprowadzono obliczenia według wzoru (8). Wyniki tych obliczeń przedstawiono na wykresie, rys. 3. W obliczeniach uwzględniono stan początkowy zwierciadła na wysokości 28 m nad poz. 245 m (głębokość 217 m). Przebieg krzywej wskazuje na ustalenie się zwierciadła wody na wysokości około 32,6 m (nad poz. 245 m) po około 24 godzinach. W rzeczywistości zwierciadło wody ustaliło się nieco niżej, na wysokości 31,5 m nad poz. 245 m (głębokość 213,5 m od powierzchni terenu), co świadczy o wzroście w tym czasie przepuszczalności zasypu.



Rys. 3. Wykres przebiegu piętrzenia wody w szybie i zmian natężenia filtracji w czasie
Fig. 3. Diagram showing progress of shaft flooding and water inflow intensity with time

Przebieg zmian natężenia filtracji przez materiał zasypowy na podstawie wykonanych obliczeń z uwzględnieniem zmiennego spadku hydraulicznego przedstawiono na wykresie, rys. 3. Natężenie przepływu wody przez materiał zasypowy wzrasta stopniowo wraz ze wzrostem naporu i spadku hydraulicznego, dochodząc po około 24 godzinach do wartości 1,80 m^3/min, co odpowiada całkowitej wielkości dopływu do szybu.

7. Podsumowanie

Na podstawie wzorów opracowanych dla nieustalonych warunków przepływu wody można prowadzić bieżącą ocenę zmian własności filtracyjnych materiału zasypowego w trakcie podsadzania szybu, oraz prognozować przebieg procesu piętrzenia wody, korzystając z pomiarów i obserwacji prowadzonych w szybie. Przedstawione rozwiązania dotyczące przepływu wody przez zasyp materiału przepuszczalnego mogą być zastosowane również do materiałów słaboprzepuszczalnych i półprzepuszczalnych, z jakich budowane są korki izolacyjne.

Dla materiałów skalnych stosowanych jako materiał zasypowy w likwidowanych szybach o znacznym zawodnieniu konieczna jest dokładna ocena ich parametrów filtracyjnych. Uproszczone metody obliczeniowe oparte na ustalonym ruchu wody mogą być stosowane w praktyce, gdyż nie wprowadzają zbyt dużych błędów w ocenie współczynnika filtracji materiału zasypowego.

LITERATURA

1. Fortuna Z., Macukow B., Wąsowski J.: Metody numeryczne. Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001.
2. Kleczkowski A., Różkowski A. (red.): Słownik hydrogeologiczny. Wyd. TRIO, Warszawa 1997.
3. Macioszczyk T., Szestakow W.M.: Dynamika wód podziemnych – metody obliczeń. Wyd. Geologiczne, Warszawa 1983.
4. Pazdro Z., Kozerski B.: Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geologiczne, Warszawa 1990.
5. Rogoż M.: Hydrogeologia kopalniana z podstawami hydrogeologii ogólnej. Wyd. GIG, Katowice 2004.
6. Wieczysty A.: Hydrogeologia inżynierska. PWN, Warszawa 1982.
7. Zasady likwidacji szybów i wyrobisk przyszybowych w kopalniach węgla kamiennego. Wyd. GIG, Katowice 1998.

8. Notatka służbowa w sprawie prac związanych z likwidacją szybu Stanisław KWK Murcki, spisana w dniu 27.05.2004 r. w KWK Murcki.

Recenzent: Prof. zw. dr hab. inż. Andrzej Różkowski

Abstract

In the case of liquidation of high water inflow shafts the opinion of intensity of water flow through mineral material is required. The model of laminar flow (Darcy's law) has been used to mathematical description of water flow through crumb material. The theoretical bases of marking the water flow through mineral material in liquidated shafts. The equations which allow to determine the coefficient of permeability of mineral material in shaft have been elaborated. Elaborated equations may be used to opinion the intensity of water flow through crumb material in liquidated shaft.