

Wojciech BABCZYŃSKI
Politechnika Śląska, Gliwice

MODELOWANIE WARSTWY IZOLACYJNEJ WYKONANEJ Z POPIOŁÓW LOTNYCH WOKÓŁ PODZIEMNEGO SKŁADOWISKA ODPADÓW

Streszczenie. W artykule przeanalizowano skuteczność warstwy izolacyjnej z popiołów lotnych wokół podziemnego składowiska odpadów, charakteryzującej się różną grubością i różnym współczynnikiem filtracji.

MODELLING OF INSULATING LAYER MADE OF FLY ASH AROUND AN UNDERGROUND WASTE DISPOSAL

Summary. In the article the effectiveness of insulating layer made of fly ash, around an underground waste disposal, was analysed. The layer was characterised by various thicknesses and various filtration coefficients.

1. Wstęp

Podziemne składowanie odpadów ma wiele zalet w porównaniu ze składowaniem na powierzchni ziemi. Do słabości jednak tego sposobu zagospodarowania odpadów należy ograniczona możliwość kontroli procesów zachodzących zarówno w samym składowisku, jak i w jego pobliżu. Konieczna jest zatem dokładna analiza zjawisk, jakie mogą zajść w składowisku. Nie tylko w momencie składowania, ale również wiele lat później, nawet po zamknięciu kopalni. W szczególności dotyczy to prognozy migracji zanieczyszczeń ze składowiska. Mogą być one wynoszone z bryły składowiska głównie za pośrednictwem wody.

Prognozując migrację zanieczyszczeń wynoszonych przez wodę należy w pierwszej kolejności opisać zjawisko przepływu wody a następnie można opisywać przemieszczanie się zanieczyszczeń. Ilość wymywanych zanieczyszczeń może być minimalizowana np. przez zastosowanie warstwy izolacyjnej wokół składowiska. Warstwa ta może być wykonana z materiałów mineralnych nieprzepuszczalnych, np. bentonit, lub z materiałów słabo przepuszczalnych. W artykule podjęto się oceny możliwości wykorzystania popiołów lotnych do wykonania warstwy izolacyjnej.

2. Przepływ wody i zanieczyszczeń w górotworze

Woda w górotworze może przepływać przez pory skalne i szczeliny. W niniejszym artykule górotwór został potraktowany jako ośrodek porowaty. Założenie to jest prawdziwe również wówczas, gdy występujące szczeliny są ze sobą połączone i tworzą gęstą sieć spękań [2, 3]. Równanie opisujące ruch wody w ośrodkach porowatych ma postać [1, 2, 3, 9]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{ij} \left(\frac{\partial h}{\partial x_j} \right) \right] + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

gdzie: t - czas [s],

x_i - zmienna przestrzenna [m], $i, j = 1, 2$,

k_{ij} - tensor współczynnika filtracji [m/s],

W - objętościowy wydatek źródła lub upustu [s^{-1}],

S_s - pojemność właściwa (retencyjna ośrodka) zależna od ściśliwości ośrodka skalnego i ściśliwości wody [1/m].

Równanie transportu zanieczyszczeń w górotworze uwzględniające przepływ zanieczyszczeń w wyniku adwekcji, dyfuzji i dyspersji, nie uwzględniające zjawiska sorpcji i rozpadu substancji i występowania źródeł zanieczyszczenia, ma następującą postać [1, 2, 4]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{i,j} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial (v_i C)}{\partial x_i}$$

gdzie: C - stężenie substancji w wodzie [g/m^3],

x_i, x_j - zmienna przestrzenna [m], $i, j = 1, 2$,

t - czas [s],

D_{ij} - tensor współczynnika dyspersji hydrodynamicznej [m^2/s],

$$D_{i,j} = \alpha_T v \delta_{i,j} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_i v_j}{v} + (1 - \delta_{i,j}) D^d$$

gdzie: α_L , α_T - dyspersyjność podłużna i poprzeczna [m],

v_i - rzeczywista prędkość wody w kierunku i [m/s],

D^d - współczynnik dyfuzji molekularnej w górotworze, [m^2/s], $D^d = \frac{D^w}{\tau}$,

D^w - współczynnik dyfuzji molekularnej w wodzie, τ - krętość porów ośrodka porowego ($\tau = \sqrt{2} + 3$).

3. Modelowanie skuteczności warstwy izolacyjnej wokół podziemnego składowiska odpadów

Za pomocą programów komputerowych SEEP/W i CTRAN/W, wykorzystujących metodę elementów skończonych, przeanalizowano celowość stosowania warstwy izolacyjnej wokół podziemnego składowiska odpadów, charakteryzującej się różną grubością i różnym współczynnikiem filtracji. W analizie przyjęto następujące założenia i uproszczenia:

- skały otaczające podziemne składowisko odpadów oraz bryła składowiska charakteryzują się jednolitym współczynnikiem filtracji ($k=10^{-5}$ m/s), jednolitą porowatością efektywną ($n=0,2$) i dyspersyjnością ($\alpha_L=2,0$, $\alpha_T=0,5$),
- warstwa izolacyjna charakteryzuje się jednakową porowatością $n=0,5$ i dyspersyjnością $\alpha_L=1$, $\alpha_T=0,1$,
- zanieczyszczenia wynoszone ze składowiska mają charakter konserwatywny, tzn. nie podlegają procesom sorpcji i rozkładu,
- stężenie zanieczyszczenia w bryle składowiska jest stałe i wynosi 100% maksymalnego stężenia danej substancji,
- przepływ wody wokół składowiska jest ustalony.

Dla powyższych założeń przyjęto płaski model (przekrój pionowy) warstwy wodonośnej z umieszczonym w niej składowiskiem odpadów (rys. 1).

Dla przepływu wody (zagadnienie stacjonarne) przyjęto następujące warunki brzegowe:

$$- t \geq 0 \quad x = 0 \quad h = 102,3 \text{ m,}$$

$$-t \geq 0 \quad x = 23 \quad h = 100,0 \text{ m,}$$

$$-t \geq 0 \quad z = 0 \quad \frac{\partial h}{\partial z} = 0$$

$$-t \geq 0 \quad z = 12,5 \quad \frac{\partial h}{\partial z} = 0$$

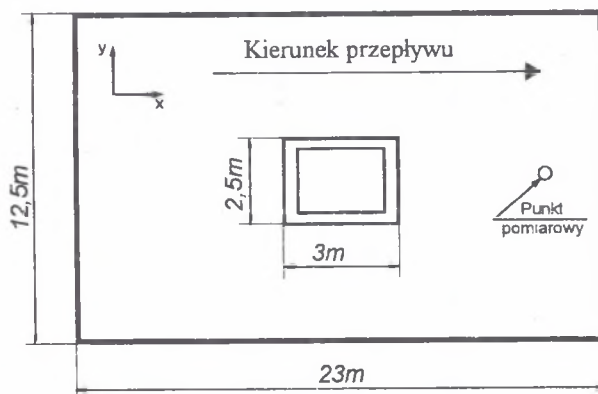
Dla przepływu zanieczyszczeń (zagadnienie nie ustalone) przyjęto następujący warunek początkowy:

$$t = 0 \quad P(x,y) \notin SC = 0 \quad S - \text{składowisko}$$

/woda poza składowiskiem w chwili $t = 0$ posiada stężenie $C=0$ /

oraz warunek brzegowy

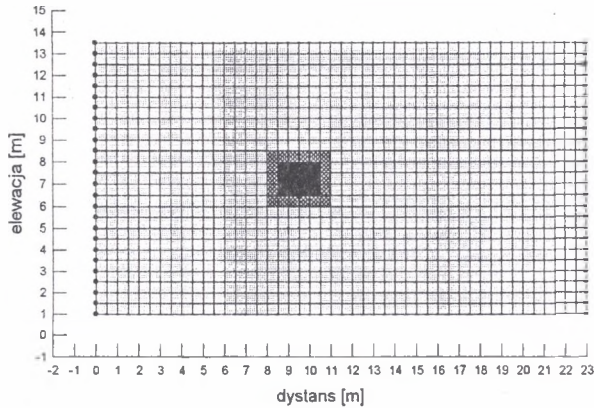
$$t \geq 0 \quad P(x,y) \in SC = 100 \quad \text{/woda w składowisku posiada stężenie } C=100/$$



Rys.1. Model składowiska odpadów i warunki graniczne

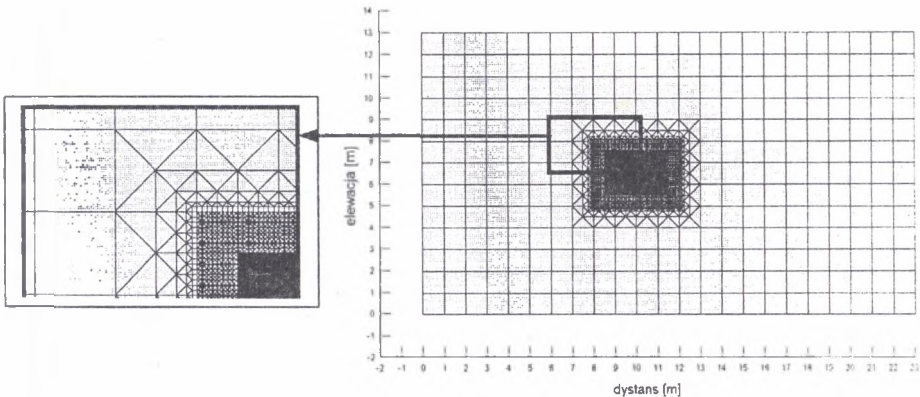
Fig. 1. The model of waste disposal and boundary conditions

Dla tak przyjętego modelu skonstruowano cztery siatki obliczeniowe. Pierwsza siatka, S1, składa się z elementów kwadratowych i charakteryzuje się stałą odległością między węzłami, wynoszącą w pionie i poziomie 0,5 m. Siatki kolejne, S2 i S3 były analogiczne do siatki S1 z tym, że posiadały większą ilość węzłów. Odległości między węzłami w siatce S2 wynosiły 0,25, a w siatce S3 – 0,10 m. Zagęszczanie siatki obliczeniowej pozwalało modelować wpływ grubości warstwy izolacyjnej wykonanej z materiału o określonym współczynniku filtracji, z drugiej strony pociągało za sobą wzrost ilości węzłów, a tym samym wydłużało czas przeprowadzanych symulacji numerycznych. Ostatnia siatka obliczeniowa, S4, charakteryzowała się zmienną odległością między węzłami, wynoszącą od 1 m na obrzeżach siatki do 6,25 cm w miejscu lokalizacji składowiska i warstwy izolacyjnej (rys. 3).



Rys. 2. Siatka obliczeniowa S1

Fig. 2. Mesh S1



Rys.3. Siatka obliczeniowa S4

Fig. 3. Mesh S4

Dla wszystkich siatek (S1÷S4) przeprowadzono symulację wymywania zanieczyszczeń z podziemnego składowiska odpadów otoczonego warstwą izolacyjną 0,5 m o współczynniku filtracji wynoszącym od $1 \cdot 10^{-10}$ do $1 \cdot 10^{-5}$ m/s, określając stężenie zanieczyszczenia w przyjętym wcześniej punkcie pomiarowym (rys.1) po czasie 365 dni. W trakcie prowadzenia symulacji okazało się, że dla wszystkich analizowanych przypadków maksymalne stężenie zanieczyszczenia w punkcie pomiarowym pojawiało i stabilizowało się wcześniej niż w 365 dobie symulacji. Wyniki symulacji przedstawia tabela 1.

Wyniki otrzymane dla pierwszych trzech siatek obliczeniowych S1, S2 i S3 są zbliżone, przy czym najniższe stężenie w punkcie pomiarowym wykazała najbardziej zagęszczona siatka S3. Siatka S4 generowała wyniki odbiegające od trzech poprzednich i były one zawsze wyższe w stosunku do trzech poprzednich siatek.

W celu zidentyfikowania źródła błędu wyników symulacji posłużono się kryterium liczby Pecleta i kryterium liczby Couranta określających wpływ błędów obliczeń powstałych na skutek zjawiska dyspersji numerycznej i oscylacji numerycznej (rys. 4).

Tabela 1

Wyniki obliczeń dla warstwy izolacyjnej o grubości 0,5 m

Wsp. filtracji warstwy izolującej [m/s]	Stężenie [%]			
	siatka 1 – S1 <i>bok siatki 0,50 m</i>	siatka 2 – S2 <i>bok siatki 0,25 m</i>	siatka 3 – S3 <i>bok siatki 0,10 m</i>	siatka 4 – S4 <i>bok siatki 0,0625÷1,0 m</i>
$1 \cdot 10^{-5}$	39,90	39,64	39,32	48,30
$5 \cdot 10^{-6}$	34,48	34,41	34,38	42,20
$1 \cdot 10^{-6}$	22,90	22,76	22,50	28,50
$5 \cdot 10^{-7}$	16,92	16,85	16,67	22,10
$1 \cdot 10^{-7}$	5,61	5,54	5,52	8,98
$5 \cdot 10^{-8}$	3,08	3,02	2,99	5,80
$1 \cdot 10^{-8}$	0,67	0,66	0,65	1,17
$5 \cdot 10^{-9}$	0,34	0,33	0,20	0,34
$1 \cdot 10^{-9}$	0,07	0,05	0,04	0,15
$5 \cdot 10^{-10}$	0,04	0,04	0,03	0,10
$1 \cdot 10^{-10}$	0,01	0,01	0,01	0,08

Kryteria te mają następującą postać:

Kryterium liczby Pecleta

$$P_x = \frac{|v|\Delta x}{D_{11}} \leq 2$$

$$P_y = \frac{|v|\Delta y}{D_{22}} \leq 2$$

Kryterium liczby Couranta

$$C_x = \frac{v_x \Delta t}{\Delta x} \leq 1$$

$$C_Y = \frac{v_y \Delta t}{\Delta y} \leq 1$$

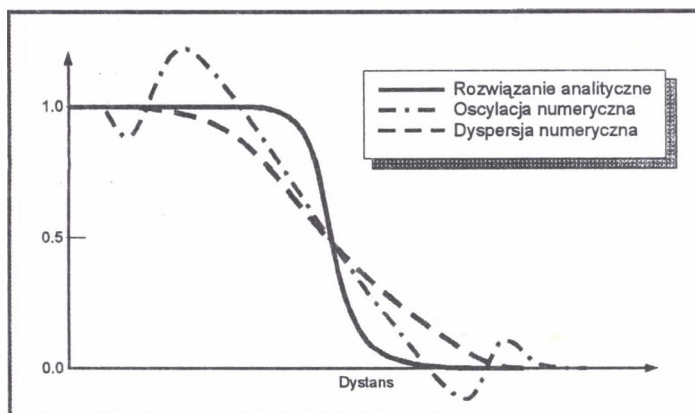
v_x, v_y - prędkość rzeczywista wody w porach w kierunku x i y ,

$$v = \sqrt{(v_x)^2 + (v_y)^2}$$

Δt - krok czasowy,

D_{11}, D_{22} - współczynniki dyspersji hydrodynamicznej w kierunkach x i y ,

$\Delta x, \Delta y$ - odległość między węzłami siatki,



Rys. 4. Wpływ zjawiska dyspersji i oscylacji numerycznej na dokładność rozwiązania równania transportu
Fig. 4. The influence of numerical dispersion and oscillation on the precision of transport equation solution

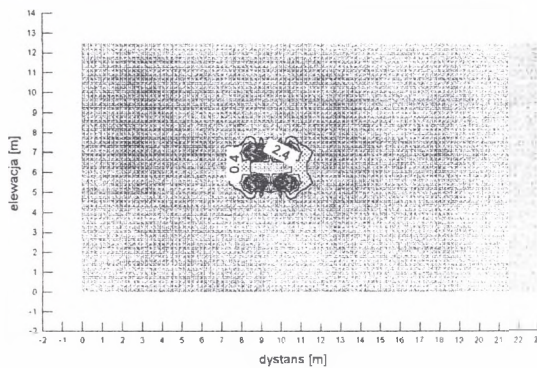
Na rys. 5 do 8 przedstawiono rozkład liczby Pecleta w kierunku x i y , w przypadku zastosowania warstwy izolacyjnej 0,5 m wykonanej z popiołu lotnego o współczynniku filtracji 10^{-8} m/s dla siatek obliczeniowych S1 i S4. W tabeli 2 przedstawiono maksymalne wartości liczby Pecleta dla wszystkich siatek.

Tabela 2

Maksymalne wartości liczby Pecleta dla warstwy izolacyjnej 0,5 m
o współczynniku filtracji $1 \cdot 10^{-8}$ [m/s]

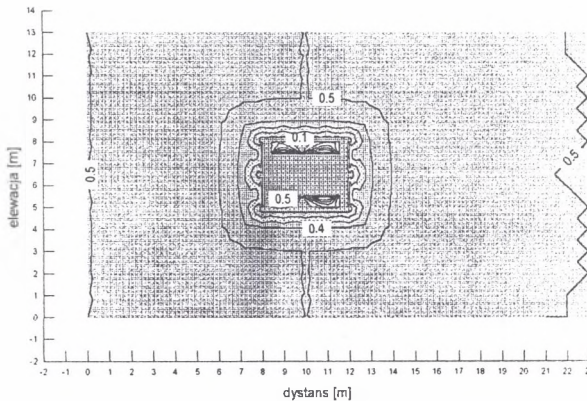
Rodzaj siatki	P_x	P_y
S1	2,5	3,0
S2	1,4	2,4
S3	0,7	1,0
S4	0,5	5

Jedynie siatka obliczeniowa S3 nie jest narażona na występowanie błędów spowodowanych zjawiskiem dyspersji numerycznej. Z rys. 6 ÷9 wynika, że kryterium liczby Pecleta nie jest spełnione dla siatki S1 zarówno w kierunku x, jak i y, natomiast dla siatki S4 nie jest spełnione w kierunku y. Maksymalna wartość liczby Pecleta wynosi tutaj aż $P_y=5$. Zauważa się także, że w przypadku siatki S1 kryterium liczby Pecleta jest przekroczone jedynie na małym obszarze modelu, tj. w samej warstwie izolacyjnej, natomiast to samo kryterium w kierunku y dla siatki S4 jest przekroczone na przeważającym obszarze modelu. Na tej podstawie stwierdzono, że siatka S4 generuje błędy obliczeń.



Rys. 5. Rozkład liczby Pecleta w kierunku x dla symulacji przeprowadzonej za pomocą siatki S1 dla warstwy izolacyjnej o grubości 0,5 m i współczynnika filtracji $k=1 \cdot 10^{-8}$ m/s

Fig. 5. Peclet criterion distribution in x direction for the simulation done using the mesh S1 for the insulating layer 0,5 m thick and of filtration coefficient $k=1 \cdot 10^{-8}$ m/s

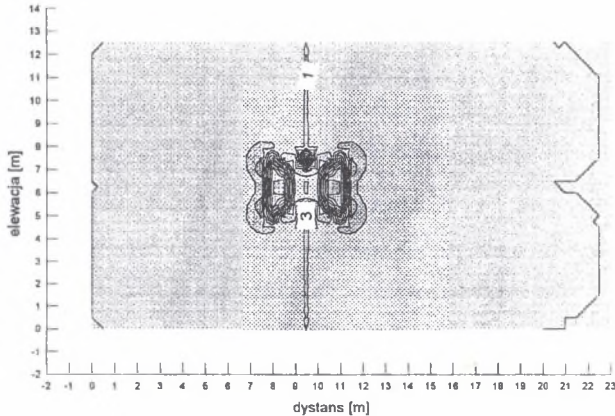


Rys. 6. Rozkład liczby Pecleta w kierunku x dla symulacji przeprowadzonej za pomocą siatki S4 (zagęszczonej) dla warstwy izolacyjnej o grubości 0,5 m i współczynnika filtracji $k=1 \cdot 10^{-8}$ m/s

Fig. 6. Peclet criterion distribution in x direction for the simulation done using the mesh S4 (thickened) for the insulating layer 0,5 m thick and of filtration coefficient $k=1 \cdot 10^{-8}$ m/s

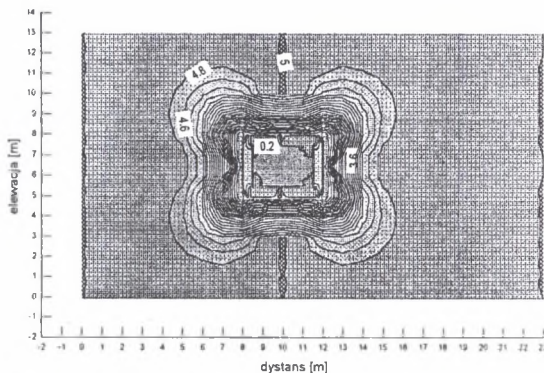
Podczas przeprowadzania symulacji stosowano odpowiednio mały krok czasowy, zapewniając spełnienie kryterium liczby Couranta.

Do określenia wpływu grubości warstwy izolacyjnej na skuteczność zatrzymywania zanieczyszczeń w bryle składowiska wybrana została siatka S2. Pozwala ona zamodelować trzy możliwe do zastosowania grubości warstwy izolacyjnej, tj. 0.25, 0.5 i 0.75 m oraz gwarantuje stosunkowo krótki czas przeprowadzania symulacji.



Rys. 7. Rozkład liczby Pecleta w kierunku y dla symulacji przeprowadzonej za pomocą siatki S1 dla warstwy izolacyjnej o grubości 0,5 m i współczynnika filtracji $k=1 \cdot 10^{-8}$ m/s

Fig. 7. Peclet criterion distribution in y direction for the simulation done using the mesh S1 for the insulating layer 0,5 m thick and of filtration coefficient $k=1 \cdot 10^{-8}$ m/s



Rys. 8. Rozkład liczby Pecleta w kierunku y dla symulacji przeprowadzonej za pomocą siatki S4 (zagęszczonej) dla warstwy izolacyjnej o grubości 0,5 m i współczynnika filtracji $k=1 \cdot 10^{-8}$ m/s

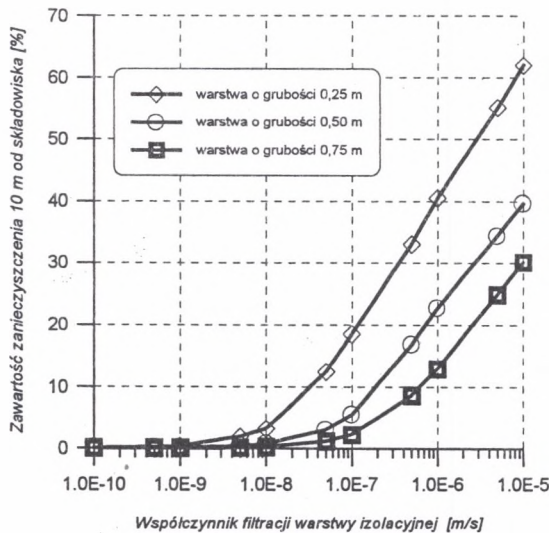
Fig. 8. Peclet criterion distribution in y direction for the simulation done using the mesh S4 for the insulating layer 0,5 m thick and of filtration coefficient $k=1 \cdot 10^{-8}$ m/s

W tab. 3 i na rys. 10 przedstawiono wyniki symulacji wymywania zanieczyszczeń z podziemnego składowiska odpadów. Jak można było oczekiwać, najskuteczniejszą okazała się warstwa izolacyjna o grubości 0,75 m.

Tabela 3

Wyniki obliczeń dla różnej grubości warstwy izolacyjnej

Współczynnik filtracji warstwy izolującej [m/s]	Stężenie [%]		
	warstwa izolacyjna 0,25 m	warstwa izolacyjna 0,50 m	warstwa izolacyjna 0,75 m
$1 \cdot 10^{-5}$	62,00	39,64	30,11
$5 \cdot 10^{-6}$	55,20	34,42	24,92
$1 \cdot 10^{-6}$	40,50	22,76	12,95
$5 \cdot 10^{-7}$	33,03	16,85	8,68
$1 \cdot 10^{-7}$	18,50	5,54	2,18
$5 \cdot 10^{-8}$	12,42	3,02	1,12
$1 \cdot 10^{-8}$	3,12	0,66	0,21
$5 \cdot 10^{-9}$	1,85	0,33	0,09
$1 \cdot 10^{-9}$	0,34	0,05	0,01
$5 \cdot 10^{-10}$	0,16	0,04	0,00
$1 \cdot 10^{-10}$	0,04	0,01	0,00



Rys. 9 Procentowe stężenie zanieczyszczenia w punkcie oddalonym 10 m od podziemnego składowiska w zależności od grubości i jakości warstwy izolacyjnej

Fig. 9. Contaminant concentration [%] at the point 10 m distant from the underground waste disposal in relation to the thickness and quality of the insulating layer

Analizując wyniki symulacji zamieszczone w tab. 3 można stwierdzić, że skuteczną warstwą izolacyjną, zapewniającą zatrzymywanie zanieczyszczeń w bryle składowiska, można wykonać stosując popioły lotne charakteryzujące się współczynnikiem filtracji nie większym niż 10^{-9} m/s.

4. Wyniki badań laboratoryjnych współczynnika filtracji popiołów lotnych

Według danych literaturowych [5, 6, 7, 8], współczynnik filtracji popiołów lotnych wynosi $10^{-10} \div 10^{-4}$ m/s. Badania autora wykazały, że współczynnik filtracji popiołów lotnych wynosi od 10^{-9} do 10^{-6} , a w przypadku popiołu po pól suchym odsiarczaniu spalin z Elektrowni Rybnik przepływ wody po 6 miesiącach ustał, a więc popiół stał się nieprzepuszczalny. Badania laboratoryjne wykazały ponadto, że istnieje możliwość zmniejszania współczynnika filtracji mieszanin popiołowo-wodnych przez dodawanie cementu (tab. 5, 6 i 7).

Tabela 5

Zmiany współczynnika filtracji w próbkach popiołu lotnego bez odsiarczania spalin (El. Rybnik) z dodatkiem cementu

Lp.	Dodatek cementu [%]	Współczynnik filtracji [m/s] po dobach				
		0	5	10	60	180
1	0	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$5,1 \cdot 10^{-7}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$
2	2	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$9,3 \cdot 10^{-7}$	$7,2 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	$1,8 \cdot 10^{-8}$
3	5	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$5,1 \cdot 10^{-7}$	$3,1 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$8,7 \cdot 10^{-8}$
4	10	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$6,3 \cdot 10^{-8}$	$5,7 \cdot 10^{-8}$

Tabela 6

Zmiany współczynnika filtracji w próbkach popiołu lotnego po pól suchym odsiarczaniu spalin (El. Rybnik) z dodatkiem cementu

Lp.	Dodatek cementu [%]	Współczynnik filtracji [m/s] po dobach				
		0	5	10	60	180
1	0	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$8,4 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$	0
2	2	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$8,1 \cdot 10^{-7}$	$5,5 \cdot 10^{-7}$	$9,5 \cdot 10^{-8}$	0
3	5	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-7}$	$3,6 \cdot 10^{-8}$	0
4	10	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-9}$	0

Tabela 7

Zmiany współczynnika filtracji w próbkach popiołu lotnego z kotła fluidalnego (Elektrociepłownia Czechowice) z dodatkiem cementu

Lp.	Dodatek cementu [%]	Współczynnik filtracji [m/s] po dobach				
		0	5	10	60	180
1	0	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$6,4 \cdot 10^{-7}$	$5,5 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$
2	10	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-7}$	$5,4 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{-8}$	$2,6 \cdot 10^{-8}$

5. Podsumowanie

Przedstawione w niniejszym artykule próby numerycznego modelowania wynoszenia zanieczyszczeń z podziemnego składowiska odpadów wskazują na możliwość wykorzystania metod numerycznych do rozwiązywania problemów przepływu wody i zanieczyszczeń w górotworze. Pamiętać jednak należy, że poprawność otrzymanych wyników gwarantują nie tylko prawidłowo określone parametry i warunki brzegowe równań przepływu i transportu, ale także właściwie skonstruowana, dla danego zagadnienia, siatka obliczeniowa.

Na podstawie przeprowadzonych symulacji można wnioskować o celowości zastosowania warstwy izolacyjnej wokół podziemnego składowiska odpadów, zlokalizowanego w wyrobisku korytarzowym. Odpowiednio dobrana warstwa izolacyjna może skutecznie zahamować przedostawanie się zanieczyszczeń poza bryłę składowiska. Istnieje możliwość stosowania do tego popiołów lotnych charakteryzujących się niskim współczynnikiem filtracji oraz popiołów, których współczynnik filtracji może być obniżony poprzez zastosowanie dodatku środka wiążącego, np. cementu.

LITERATURA

1. Bear J., 1972, Dynamic of fluids in porous media. American Elsevier Publishing Company, INC New York, London, Amsterdam.
2. Spitz K., Moreno J., 1996, A practical guide to groundwater and solute transport

- modeling" John Wiley & Sons, Inc.
3. Freeze R A., Cherry J. A., 1979, *Groundwater* Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
 4. Kleczkowski A. i in., 1984, *Ochrona wód podziemnych*, Wydawnictwa Geologiczne.
 5. Żmij M., Bromek T., Adamska-Kawalec E., Mastalerz J., 1994, *Hydrogeologiczne i hydrochemiczne aspekty podziemnego lokowania odpadów przemysłowych*.
V Konferencja „Problemy geologii i ekologii w górotworze podziemnym” GIG.
 6. Mazurkiewicz M., Piotrowski Z., Tajduś A., 1997, *Lokowanie odpadów w kopalniach podziemnych*, Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Kraków.
 7. Łączny J., Dąbrowska L., Kubicki P., 1995, *Składowanie gęstych zawiesin popiołów lotnych (emulgatu)*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej.
 8. Szczepańska J., Zdechlik R., Malczyk A., Lenduszek P., 1996, *Własności filtracyjne popiołów elektrownianych w aspekcie prognozowania ich wpływu na środowisko wodne*.
Gospodarka Surowcami Mineralnymi, tom 12, z. 2.
 9. Zaradny H., 1990, *Matematyczne metody opisu i rozwiązań zagadnień przepływu wody w nienasyconych i nasyconych gruntach i glebach*, Prace IBW PAN, nr 23.

Recenzent: Dr inż. Leon Łukwiński

Abstract

The effectiveness of insulating layer around an underground waste disposal, disposal characterised by various thicknesses and filtration coefficient was analysed by means of SEEP/W and CTRAN/W software. The programmes use the finite elements method. The effect of simulations were compared with values of filtration coefficient obtained in laboratory conditions for fly ash.

According to the analyses, some fly ash may be used for producing the insulating layers.