ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1999
Seria: GÓRNICTWO z. 244 Nr kol. 1441

Jan PALARSKI, Franciszek PLEWA, Wojciech BABCZYŃSKI

MODELOWANIE MIGRACJI ZANIECZYSZCZEŃ WYMYWANYCH Z PODZIEMNYCH SKŁADOWISK ODPADÓW. CZĘŚĆ I

Streszczenie. W artykule przedstawiono możliwości modelowania przepływu wód w górotworze oraz migracji zanieczyszczeń wynoszonych z podziemnych składowisk odpadów. Przepływ wody i transport zanieczyszczeń można opisać za pomocą równań różniczkowych. Określając parametry górotworu oraz warunki brzegowe i warunek początkowy, można otrzymać model przepływu wód i zanieczyszczeń w górotworze. Pokazano przykłady przeprowadzonych symulacji komputerowych.

THE MODELING OF THE MIGRATION OF CONTAMINANTS WASHED OUT FROM UNDERGROUND WASTE DISPOSALS

Summary. In the article the possibilities of modelling of groundwater flow in rock mass and migration of contaminants washed out from underground waste disposals were presented. The water flow and contaminants transport may be described by differential equations. Assigning the rock mass parameters as well as boundary and initial conditions it is possible to obtain the model of ground water and contaminants flow in the rock mass. The examples of numerical simulations have been shown.

1. Wstęp

Chcąc składować odpady w podziemiach kopalń w sposób racjonalny, należy dokonać oceny wpływu składowanych odpadów na środowisko. Zanieczyszczenia mogą być wynoszone ze składowiska poprzez wodę dopływającą do wyrobiska, w którym ulokowano odpad. Woda niosąca ze sobą zanieczyszczenia trafić może do głównego systemu odwadniania i dalej do wód powierzchniowych lub może zanieczyścić podziemne ujścia i zbiorniki wodne.

Polskie górnictwo głębinowe posiada duże doświadczenie w składowaniu neutralnych i słabo toksycznych odpadów pochodzenia mineralnego, takich jak odpady powęglowe, hutnicze i energetyczne. Istnieje jednak możliwość lokowania znacznych ilości odpadów bardziej uciążliwych dla środowiska w podziemnych wyrobiskach górniczych, które składowane były dotychczas na powierzchni. Utylizacja takich odpadów wymaga koncesji. Starając się o koncesję na podziemne składowanie odpadów, należy dokonać oceny wpływu składowiska na środowisko naturalne. Dlatego istnieje potrzeba opracowania modelu matematycznego pozwalającego symulować między innymi przepływ zanieczyszczeń w górotworze.

Przepływ wody i transport zanieczyszczeń w górotworze można opisać za pomocą równań różniczkowych. Określając w badaniach in situ lub laboratoryjnych parametry górotworu oraz formułując warunki brzegowe i warunek początkowy można otrzymać model przepływu wód i zanieczyszczeń w górotworze.

W dalszej części artykułu przedstawione zostaną możliwości modelowania przepływu wody w górotworze i transportu zanieczyszczeń wynoszonych z podziemnego składowiska odpadów. Przykłady modelowania zostały wykonane za pomocą programu FEMWATER zawartego w pakiecie Groundwater Modeling System, służącego do trójwymiarowego modelowania przepływu wody i zanieczyszczeń w warunkach stacjonarnych i procesów nieustalonych. W artykule zajęto się zagadnieniami płaskimi, do których skonstruowano odpowiednie siatki obliczeniowe.

2. Opis przepływu wody w otoczeniu podziemnego składowiska odpadów i transport zanieczyszczeń w górotworze

Ruch wody w górotworze opisany jest równaniem przepływu [1, 3, 6, 7]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left[k(\mathrm{h})_{ij}\cdot\frac{\partial h}{\partial x_j}\right]=\mathrm{S_S}\frac{\partial h}{\partial t}+\mathrm{Q} \tag{1}$$

gdzie:

x_i, x_j - zmienne przestrzenne, m,

$k(h)_{ij}$ - tensor współczynnika filtracji zależny od wilgotności ośrodka skalnego, m/s,

h - wysokość hydrauliczna, m, $h = \frac{p}{\gamma} + z$,

p - ciśnienie wody, Pa,

γ - ciężar właściwy wody, N/m^3,

z - wysokość nad poziomem odniesienia, m,

S_S - współczynnik pojemności hydraulicznej, w przypadku warstwy wodonośnej z napiętym zwierciadłem - współczynnik pojemności sprężystej, w przypadku warstwy wodonośnej ze swobodnym zwierciadłem - współczynnik odsączalności, m^{-1},

Q - źródło lub upust, 1/s.

W przypadku przepływu w strefie nasyconej, co jest najbardziej niekorzystne z punktu widzenia szybkości migracji zanieczyszczeń, równanie transportu ma postać [5]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{x_i}\left(D_{i,j}\frac{\partial C}{\partial x_j}\right) - \frac{\partial (Cv_i)}{\partial x_i} + \frac{q_S C_S}{\theta_{sat}} + \frac{s}{\theta_{sat}} \tag{2}$$

gdzie:

C - stężenie substancji w wodzie $[g/dm^3]$,

x_i, x_j - zmienne przestrzenne [m],

$D_{i,j}$ - składowa tensora współczynnika dyspersji hydrodynamicznej $[m^2/s]$, $D = \alpha v + D^d$

α - dyspersyjność [m],

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 ($\tau = \sqrt{2} \div 3$),

v_i - średnia prędkość porowa wody [m/s],

q_S - wydatek źródła (upustu) zanieczyszczenia $[s^{-1}]$,

C_S - stężenie substancji w źródle (upuście) $[g/m^3]$,

θ_{sat} - objętościowa wilgotność w stanie nasycenia, θ_{sat} równa się porowatości efektywnej,

t - czas [s],

s - człon sorpcyjny $[g/m^3/s]$.

Chcąc otrzymać rozwiązanie równań (1) i (2), należy ustalić warunki brzegowe, a dla zagadnień w czasie nieustalonym również warunek początkowy [1, 3, 5, 6].

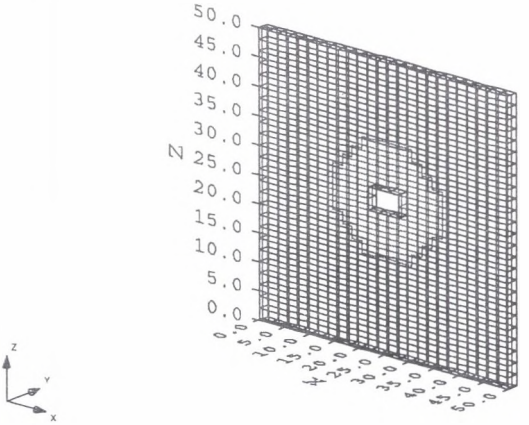
3. Specyfika przepływu wody i zanieczyszczeń wynoszonych ze składowisk podziemnych

Transport zanieczyszczeń wprowadzanych do wód gruntowych doczekał się bogatego opisu w literaturze fachowej. Składowanie odpadów w istniejących wyrobiskach górniczych, na głębokości kilkuset metrów powoduje komplikację procesu wynoszenia i transportu zanieczyszczeń. Trudności te wynikają z :

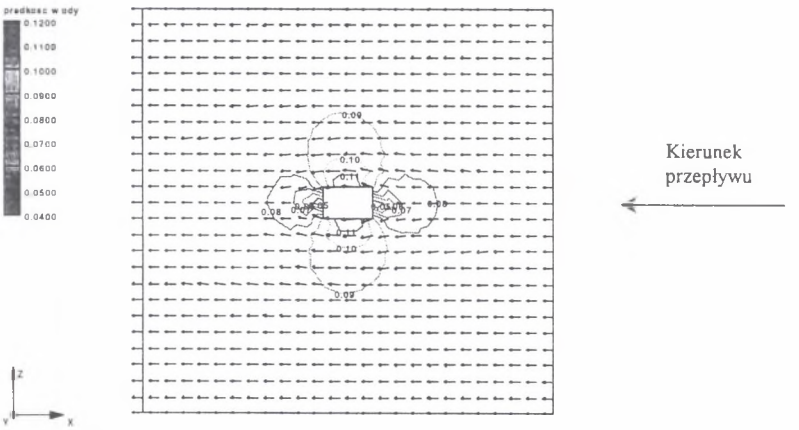
- braku możliwości dokładnego opisu budowy górotworu (strefy spękań, nieciągłości) i deformacji skał dokonujących się w trakcie eksploatacji oraz po jej zakończeniu (osiadania, zmiany rozkładu naprężeń, pękanie, zaciskanie itd.), a także zmiany stosunków wodnych,
- lokalizacji bryły składowiska - deponowany odpad będzie ściskany przez nadległe warstwy górotworu; przepływająca przez składowisko woda charakteryzować się będzie podwyższoną temperaturą oraz innym składem chemicznym w porównaniu do wód gruntowych,
- ograniczonych możliwości prowadzenia kontroli składowiska odpadów.

4. Modelowanie przepływu wody wokół podziemnego składowiska odpadów

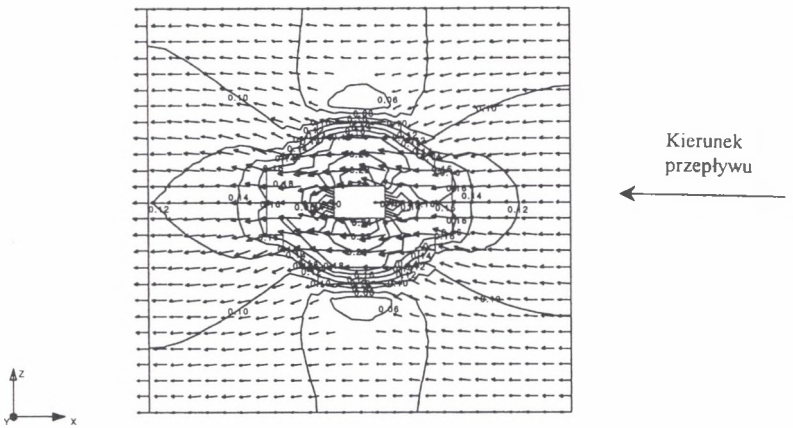
Przyjęto, że odpad składowany jest w wyrobisku podziemnym o przekroju prostokątnym i wymiarach 4 na 3 m oraz że przez składowisko odpadów nie przepływa woda (bryła składowiska jest nieprzepuszczalna). Zamodelowano dwa warianty przepływu wody w obszarze górotworu o wymiarach 50 na 50 m. W wariancie 1. przyjęto, że wokół wyrobiska nie istnieje strefa spękań o zwiększonej wodoprzepuszczalności – górotwór został częściowo uszczelniony. Górotwór charakteryzuje się współczynnikiem filtracji k = 0,864 m/dobę (10^{-5} m/s) i porowatością n = 0,25 (co odpowiada własnościom piaskowców karbońskich). Ustalony przepływ wody został wymuszony przyjętym gradientem hydraulicznym 0.1. W wariancie 2. wokół wyrobiska stworzono strefę spękań o współczynniku filtracji k = 5 m/dobę.



Rys.1. Konstrukcja siatki obliczeniowej do modelowania przepływu wody wokół wyrobiska
Fig.1. Mesh construction for the modelling of ground water flow around the excavation



Rys.2. Kierunki przepływu wody i rozkład prędkości [m/dobę] wokół wyrobiska bez strefy spękań (wariant 1)
Fig.2. The directions of ground water flow and velocity distribution around the excavation without a fractured zone



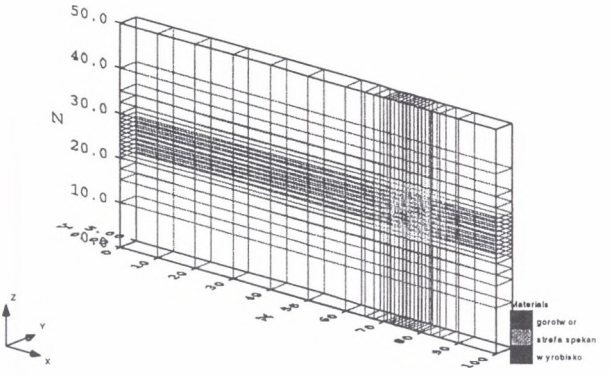
Rys.3. Kierunki przepływu wody i rozkład prędkości [m/dobę] wokół wyrobiska ze strefą spękań (wariant 2)
Fig.3. The directions of ground water flow and velocity distribution around the excavation with a fractured zone

Porównując prędkości wody oraz kierunki jej przepływu wokół uszczelnionego wyrobiska (wariant 1 i 2) można stwierdzić, że istnienie strefy spękań o zwiększonej wodoprzepuszczalności wokół wyrobiska jest przyczyną zwiększonej intensywności przepływu wody omywającej bryłę składowiska. Może być to powodem zwiększonej wymywalności zanieczyszczeń z powierzchni i wnętrza składowiska po uszkodzeniu uszczelnienia na skutek działania ciśnienia górotworu.

5. Wynoszenie zanieczyszczeń z podziemnego składowiska

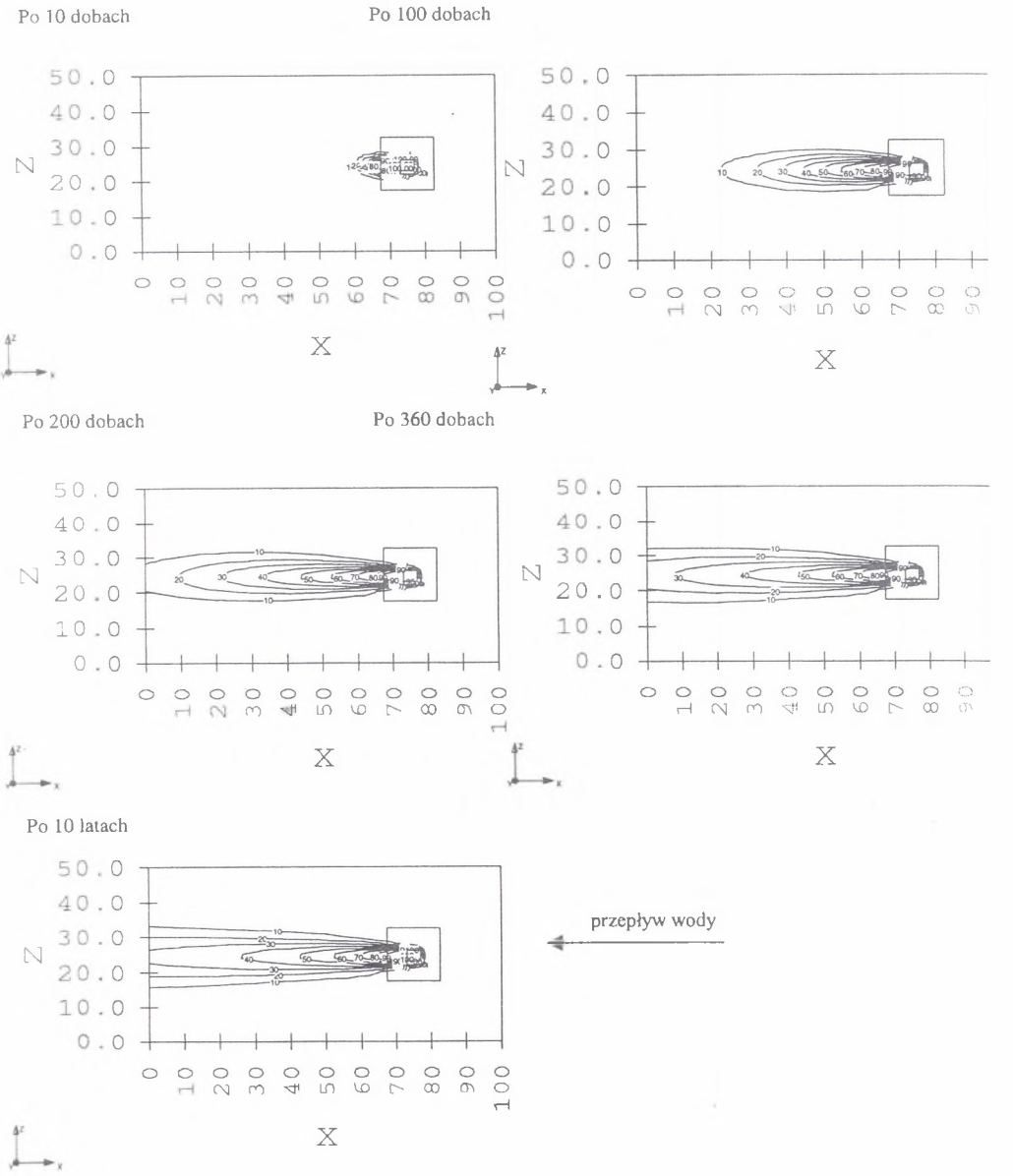
W celu określenia sposobu transportu zanieczyszczeń w górotworze zamodelowano obszar górotworu o wymiarach 50 (w pionie) na 100 m. Górotwór charakteryzował się współczynnikiem filtracji k = 0,864 m/dobę (10^{-5} m/s), porowatością n = 0,25 oraz dyspersyjnością we wszystkich kierunkach 0.25 m (piaskowiec). Wokół wyrobiska istnieje strefa spękań o współczynniku filtracji k = 5 m/dobę. Bryła składowiska posiadała współczynnik filtracji k = 8,64 10^{-4} m/dobę. Przyjęto stałą w czasie koncentrację zanieczyszczeń w bryle składowiska wynoszącą 100 [-]. Założono ustalony przepływ wody wymuszony poziomym gradientem 0.1. Symulacja transportu zanieczyszczeń odbywała się z krokiem czasowym równym 24 go-

dziny. Rysunek 4 przedstawia konstrukcję siatki obliczeniowej. Na rys. 5 przedstawiono wyniki modelowania migracji zaniczyszczeń po 10, 100, 200, 360 dobach i 10 latach.



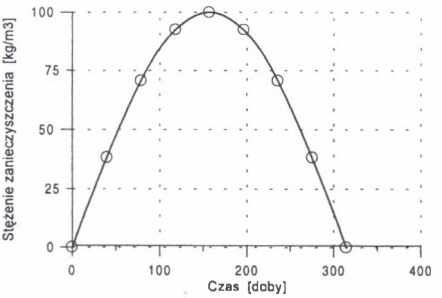
Rys.4. Konstrukcja siatki obliczeniowej do modelowania migracji zanieczyszczeń wynoszonych z podziemnego składowiska podziemnego
Fig.4. Mesh construction for the modelling of the migration of contaminants washed out from undrerground waste disposal

Analizując wyniki symulacji przepływu zanieczyszczeń w górotworze po 10, 100, 200, 360 dniach można stwierdzić, że w miarę oddalania się od źródła zanieczyszczenia następuje rozmywanie się zanieczyszczeń na skutek zjawiska dyspersji hydrodynamicznej. Zmiany stężenia zanieczyszczeń w punkcie o współrzędnej x = 0 po roku i po 10 latach od rozpoczęcia wymywania zanieczyszczeń ze składowiska są tak małe, że można przyjąć, że dalszych 9 lat ciągłego wymywania zanieczyszczeń nie spowodowało wzrostu stężenia zanieczyszczeń w obszarze górotworu oddalonym o 75 m od podziemnego składowiska. Należy sobie zdawać jednak sprawę, że tak długie utrzymywanie się stale wysokiego stężenia zanieczyszczeń składowisku, przy intensywnym przemywaniu go przepływającą wodą, jest praktycznie niemożliwe. Prawidłowe modelowanie procesów transportu wymaga określenia koncentracji w źródle zanieczyszczeń w funkcji czasu. Zastosowanie w tym przypadku uproszczeń, np. co do stałej koncentracji stężenia zanieczyszczeń w źródle powinno uwzględniać czas wymycia się wszystkich możliwych zanieczyszczeń z bryły składowiska [8]. Na podstawie badań prowadzonych przez Sztelaka i Szczepańskiego [9] można stwierdzić, że maksymalna ilość wymywanych zanieczyszczeń z odpadów pogórniczych, hutniczych i elektrownianych waha się od 0,5 do około 1,5% całej masy odpadów.



Rys.5. Przykład rozwoju procesu transportu zanieczyszczeń po czasie 10, 100, 200, 360 dniach i 10 latach
Fig.5. The example of contaminants transport process development after 10, 100, 200, 360 days and 10 years

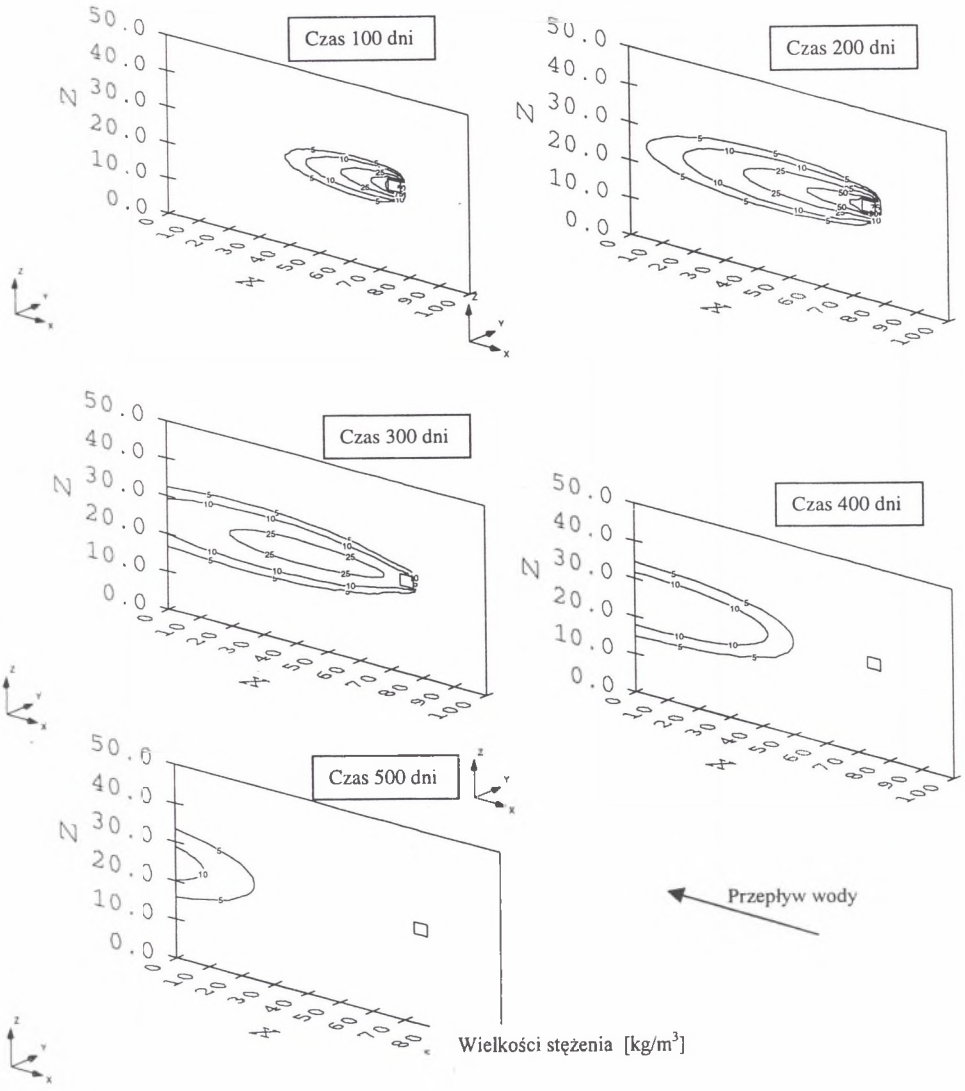
Na rys. 7 pokazano przykład modelowania wymywania się zanieczyszczenia z podziemnego składowiska odpadów, w którym stężenie zanieczyszczeń jest zmienne w czasie (rys. 6).



Rys.6. Stężenie zanieczyszczenia w funkcji czasu
Fig.6. The contaminants concentrations in relation to time

Analizując wyniki symulacji wymywania o zmiennym w czasie wydatku źródła zanieczyszczeń z podziemnego składowiska odpadów po 100, 200, 300, 400 i 500 dniach charakteryzującego się zmiennym w czasie stężeniem zanieczyszczeń, można stwierdzić:

- maksymalne stężenia zanieczyszczenia w górotworze występują po 200 dniach, a więc po około 50 dniach od wystąpienia maksymalnego wydatku zanieczyszczenia w bryle składowiska,
- po okresie symulacji 400 dni, a więc około 100 dni od zakończenia działania źródła zanieczyszczenia (stężenie zanieczyszczenia = 0 [kg/m^3]) wokół składowiska stężenie zanieczyszczeń było mniejsze od 5 [kg/m^3],
- po zaprzestaniu działania źródła zanieczyszczenia woda przepływająca przez górotwór wypiera z upływem czasu obłok zanieczyszczeń wytworzony pierwotnie wokół składowiska.



Rys.7. Symulacja transportu zanieczyszczeń przy zmiennej koncentracji zanieczyszczenia w bryle składowiska
Fig.7. The contaminants transport simulation with variable contaminants concentration in the body of disposal

7. Podsumowanie

Przedstawione przykłady modelowania wpływu przemieszczania się zanieczyszczeń z podziemnego składowiska odpadów na środowisko naturalne pokazały możliwości wykorzystania numerycznych metod do rozwiązywania tego zagadnienia. Należy jednak pamiętać, że modelowanie takie nie oddaje w pełni zjawisk zachodzących w rzeczywistości, a jest tylko próbą teoretycznego ich opisu. Wynika to z trudności dokładnego określenia wszystkich parametrów modelowanego górotworu i składowiska oraz warunków przepływu wody i zanieczyszczeń. Wyniki dalszego modelowania numerycznego należy więc poddać weryfikacji z wynikami pomiarów laboratoryjnych i przeprowadzonych w górotworze wokół podziemnego składowiska odpadów. Wstępne analizy i doświadczenia zagraniczne wskazują na potrzebę zintensyfikowania prac nad podziemnym składowaniem odpadów niebezpiecznych.

Próbom tym towarzyszyć powinien monitoring składowiska oraz przepływu wody i zanieczyszczeń przez górotwór. Doświadczenia te i symulacje komputerowe w dużej mierze pozwoliłyby określić możliwości i warunki składowania odpadów niebezpiecznych w podziemnych pustkach poeksploatacyjnych.

LITERATUARA

1. Bear J., Verruijt A.: Modeling groundwater flow and pollution,. Reidel, Boston 1987.
2. Freeze R A., Cherry J. A.: Grounwater Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1979.
3. Maciejewski S.: Procesy przepływu rozpuszczonych w wodzie substancji w gruncie nienasyconym, Prace IBW PAN Nr 26, 1998.
4. Ochrona wód podziemnych, pod red. A. S. Kleczkowskiego, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1984.
5. Rogoż M.: Modelowanie warstwy wodonośnej metodą różnicową, Prace GIG, seria dodatkowa, 1979.
6. Zaradny H.: Matematyczne metody opisu i rozwiązań zagadnień przepływu wody w nienasyconych i nasyconych gruntach i glebach, Prace IBW PAN Nr 23, 1990.

7. Kajewski I..: Analiza metod oznaczania parametrów dyspersji hydrodynamicznej w ośrodkach porowatych, praca doktorska, Akademia Rolnicza, Wrocław 1992.
8. Dąbrowska L., Płoszaj J.: Przydatność laboratoryjnych metod do oceny szkodliwości składowanych popiołów lotnych na środowisko wodne, Inżynieria i Ochrona Środowiska, 1998, Tom 1, nr 2.
9. Sztelak J., Szczepański W.: Wpływ odpadów na zwałowiskach przemysłowych na zanieczyszczenie wód powierzchniowych, Przegląd Górniczy, 1983, nr 5.
10. Macioszczyk T., Szestakow W. M.: Dynamika wód podziemnych – metody obliczeń.

Recenzent: Prof.dr hab.inż. M.Mazurkiewicz

Abstract

In the article the possibilities of modelling of groundwater flow in rock mass and migration of contaminants washed out from underground waste disposals were presented. The water flow and contaminants transport may be described by differential equations. Assigning the rock mass parameters as well as boundary and initial conditions it is possible to obtain the model of ground water and contaminants flow in the rock mass. The examples of modelling of water flow around the excavation with and without a fractured zone have been shown. The examples of contaminants transport simulation with assigned constant and variable contaminants concentrations in the body of disposal have been presented.