

Poradnik przekazywany w ręce Czytelnika jest podsumowaniem wiedzy i doświadczenia Autorów w zakresie migracji zanieczyszczeń w warstwach wodonośnych. Jest też pierwszym tego typu kompendium wydany w Polsce, adresowanym do środowiska hydrogeologów. Autorzy wybrali podejście kompromisowe – między silnie zmatematyzowaną teorią ośrodków porowatych a praktyką badań polowych skoncentrowaną głównie na metodach i technikach pomiarowych. Pomostem jest deterministyczny model numeryczny transportu masy w strumieniu wód podziemnych, tzw. model adwekcji-dyspersji, umożliwiający jednocześnie interpretowanie wyników pomiarowych oraz respektowanie praw zachowania. Autorzy mają nadzieję, że zapoznanie się z poradnikiem przyniesie Czytelnikowi korzyści w zakresie praktycznych sposobów wyznaczania parametrów procesu migracji oraz rozszerzy wiedzę o hydrodynamice wód podziemnych i transporcie masy w warstwach wodonośnych.

ISBN 83-86564-73-3

Wyznaczanie parametrów migracji zanieczyszczeń w ośrodku porowatym

Wyznaczanie parametrów migracji zanieczyszczeń w ośrodku porowatym dla potrzeb badań hydrogeologicznych i ochrony środowiska

Poradnik metodyczny

**Wyznaczanie
parametrów migracji
zanieczyszczeń
w ośrodku porowatym
dla potrzeb badań
hydrogeologicznych
i ochrony środowiska**



Ministerstwo Środowiska



Wykonano na zamówienie
Ministra Środowiska
za środki finansowe wypłacone
przez Narodowy Fundusz Ochrony
Środowiska i Gospodarki Wodnej

Jerzy J. Małecki
Marek Nawalany
Stanisław Witczak
Tomasz Gruszczyński

**Wyznaczanie
parametrów migracji
zanieczyszczeń
w ośrodku porowatym**
dla potrzeb badań
hydrogeologicznych
i ochrony środowiska

Poradnik metodyczny

Pod redakcją Jerzego J. Małeckiego



Uniwersytet Warszawski Wydział Geologii
Warszawa 2006

Redakcja merytoryczna: Teresa LIPNIACKA

Projekt okładki: Wojciech MARKIEWICZ

A u t o r z y :

Jerzy J. MAŁECKI¹, Marek NAWALANY², Stanisław WITCZAK³,
Tomasz GRUSZCZYŃSKI¹

¹ Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii
Al. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa

² Politechnika Warszawska, Instytut Systemów Inżynierii Środowiska
ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa

³ Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki
i Ochrony Środowiska
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Recenzent: Józef GÓRSKI

© Copyright by Ministerstwo Środowiska, Warszawa, 2006

ISBN 83-86564-73-3

Druk Remigraf Sp. z o.o., Warszawa, ul. Ratuszowa 11

SPIS TREŚCI

Przedmowa	9
Wstęp	11
1. Transport zanieczyszczeń w wodach podziemnych	13
1.1. Adwekcja	14
1.2. Dyfuzja.	18
1.3. Dyspersja	20
1.4. Prawo ciągłości	25
1.5. Równanie transportu.	26
1.6. Opóźnienie przenoszenia substancji.	30
1.6.1. Charakterystyka ogólna.	30
1.6.2. Zjawisko sorpcji i wymiany jonowej.	33
1.6.3. Rola kompleksu sorpcyjnego.	35
1.6.4. Opóźnienie migracji w wyniku sorpcji.	39
1.6.5. Sorpcja hydrofobowa substancji organicznych.	44
1.6.6. Wpływ kinetyki sorpcji na migrację zanieczyszczeń.	47
1.7. Rozpad i biodegradacja zanieczyszczeń.	47
1.7.1. Biodegradacja węglowodorów (ropopochodne)	53
1.7.2. Biodegradacja związków organicznych o złożonej strukturze (pestycydy)	55
1.7.3. Czynniki decydujące o intensywności biodegradacji.	60
1.7.4. Bioremediacja.	64
1.7.5. Wskaźniki procesu biodegradacji zanieczyszczeń organicznych	67
2. Metody wyznaczania wartości parametrów hydrodynamicznych oraz parametrów migracji zanieczyszczeń w wodach podziemnych	73
2.1. Parametry hydrodynamiczne	73
2.2. Parametry migracji zanieczyszczeń	83
2.2.1. Wyznaczanie parametrów dyspersji	84
2.2.1.1. Metoda laboratoryjna wyznaczania stałej dyspersji podłużnej	92
2.2.1.2. Metoda polowa wyznaczania stałej dyspersji podłużnej	96
2.2.1.3. Metoda laboratoryjna wyznaczania współczynnika dyfuzji molekularnej	98

2.2.2. Wyznaczanie parametrów sorpcji	100
2.2.2.1. Określanie składu kompleksu wymiennego	106
2.2.2.2. Wyznaczanie pojemności wymiany kationowej (PWK)	108
2.2.2.3. Identyfikacja parametrów izoterm, stałej podziału i współczynnika opóźnienia	110
2.2.3. Parametry rozpadu i biodegradacji zanieczyszczeń.	127
3. Poligon badawczy	139
3.1. Kryteria wyboru poligonu badawczego	139
3.2. Charakterystyka ogniska zanieczyszczeń – składowisko Otwock	141
3.3. Granice poligonu, organizacja oraz zakres badań terenowych.	143
3.4. Przyrodnicza charakterystyka terenu badań	146
3.4.1. Geologiczne środowisko wód podziemnych	146
3.4.2. Warunki hydrogeologiczne	153
3.4.2.1. Wodoprzepuszczalność ośrodka	153
3.4.2.2. Pojemność wodna warstwy	164
3.4.2.3. Zasilanie i drenaż	166
3.4.3. Skład chemiczny wód	171
3.4.3.1. Metodyka i zakres oznaczeń.	171
3.4.3.2. Wody opadowe (dane archiwalne).	174
3.4.3.3. Wody podziemne	175
3.4.3.4. Formy specjacyjne składników wód podziemnych	184
3.4.4. Gęstość objętościowa skał.	185
3.4.5. Pojemność wymiany kationowej i skład kompleksu wymiennego	186
3.4.5.1. Badania laboratoryjne	186
3.4.5.2. Obliczenia modelowe	188
3.4.6. Parametry sorpcyjne ośrodka względem jonu magnezowego.	191
3.4.6.1. Metoda statyczna	191
3.4.6.2. Metoda dynamiczna	192
3.4.6.3. Porównanie uzyskanych wyników.	193
4. Matematyczny model transportu zanieczyszczeń	196
4.1. Model przepływu.	197
4.1.1. Schemat obliczeniowy programu MODFLOW	197
4.1.2. Schemat dyskretyzacji przestrzeni i czasu	200
4.1.3. Parametry modelu	203
4.1.4. Warunki brzegowe i początkowe	204
4.1.5. Kalibracja modelu.	205
4.1.6. Bilans wodny modelowanego obszaru	208

4.2. Model transportu masy	212
4.2.1. Oprogramowanie i przyjęte założenia.	212
4.2.2. Warunki brzegowe i początkowe	213
4.2.3. Wyznaczenie stałych dyspersji dla przyjętego schematu dyskretyzacji	214
4.2.4. Odwzorowanie adsorpcji jonu magnezowego.	217
5. Przykład zastosowania naturalnych znaczników izotopowych przy wyznaczeniu parametrów migracji.	222
Literatura	229
Normy i rozporządzenia	243
Posłowie	245
Wykaz oznaczeń, wymiarów i jednostek.	246

PRZEDMOWA

Coraz częściej stwierdzane przypadki niekorzystnych przekształceń składu chemicznego wód podziemnych, szczególnie w warstwach wodonośnych narażonych na bezpośredni wpływ zanieczyszczeń z powierzchni terenu, wymagają podejmowania skomplikowanych technicznie i kosztownych działań ochronnych lub remediacyjnych. Oprócz oczywistych czynności związanych z identyfikacją i izolowaniem ognisk zanieczyszczeń działania te wymagają rozpoznania głównych procesów transportu zanieczyszczeń w warstwach wodonośnych oraz oszacowania wartości licznych parametrów. Aktualnie wyznaczanie wartości parametrów migracji polega na równoległym stosowaniu modeli matematycznych opisujących transport masy w wodach podziemnych płynących w ośrodkach skał porowych lub szczelinowych oraz wykonywaniu odpowiednich eksperymentów identyfikacyjnych w laboratoriach lub *in situ*. Interpretacja wyników pomiarowych w hydrogeologii poprzez opis matematyczny procesów przepływu wody oraz transportu masy staje się czynnością coraz bardziej wyspecjalizowaną, wymagającą wiedzy z zakresu wielu dyscyplin – geologii, hydrogeologii, chemii, biologii, matematyki (zwłaszcza metod numerycznych), meteorologii itp.

Tematyka modelowania matematycznego procesów przepływu i transportu masy, nierozdzielnie związana z ochroną wód podziemnych, jest przedmiotem zainteresowania wielu badaczy na całym świecie. W literaturze zagranicznej opisano wiele modeli analitycznych oraz numerycznych opisujących migrację zanieczyszczeń w strumieniu wód podziemnych (R.K. Batta, V.V.N. Murty, 1982; W. Kinzelbach, 1986; O. Güven, F.J. Molz, 1988 i inni). Również w naszym kraju ukazało się szereg publikacji dotyczących modelowania procesów zachodzących w strefach przekształceń antropogenicznych wód podziemnych. Wymienić należy między innymi programy opracowane w ramach biblioteki systemowej Hydrylib oraz systemu modułowego Ampla (J. Szymanko i in., 1980; M. Augustyniak, S. Dąbrowski, 1986; J. Michalak, 1983, 1997). Bardzo znaczące są tu prace M. Nawalanego (1986, 1988, 1991) opisujące numeryczne rozwiązania przestrzennego i niestacjonarnego pola filtracji. Dwa powszechnie wykorzystywane opracowania podręcznikowe, w których jako jeden z wielu poruszany jest problem migracji zanieczyszczeń, to praca zbiorowa pod redakcją A.S. Kleczkowskiego (1984) „Ochrona wód podziemnych” oraz monografia autorstwa S. Witczaka i A. Adamczyka (1994) „Katalog wybranych fizycznych i chemicznych wskaźników zanieczyszczeń wód podziemnych i metod ich oznaczania” tom I i II. W podręcznikach tych bardzo szeroko przedstawiona jest różnorodna tematyka dotycząca zagadnień z zakresu ochrony wód podziemnych. Pomimo wagi zagadnienia zauważalny jest jednak brak polskiego opracowania o charakterze poradnika metodycznego, które w całości byłoby poświęcone problematyce wyznaczania parametrów migracji oraz opisowi migracji zanieczyszczeń w wodach podziemnych.

Łukę tę ma wypełnić przekazywana w ręce Czytelników książka, stanowiąca kompilację najnowszych danych zaczerpniętych z wielu źródeł, popartych doświadczeniami współautorów z Uniwersytetu Warszawskiego, Politechniki Warszawskiej i Akademii Górniczo-Hutniczej

w Krakowie. Poradnik stanowić ma rozszerzenie i uzupełnienie cytowanych wyżej pozycji, szczególnie w zakresie metodyki wyznaczania parametrów oraz odwzorowań matematycznych migracji zanieczyszczeń w warstwie wodonośnej.

Na ile było to możliwe, Autorzy starali się przedstawić prezentowane zagadnienia jak najbardziej przystępnie, zakładając, że poradnik będzie przydatny nie tylko wąskiemu gronu specjalistów, ale również osobom zajmującym się zagadnieniami związanymi z ochroną środowiska przyrodniczego. Książka pośrednio adresowana jest również do studentów studiów politechnicznych oraz uniwersyteckich, między innymi takich kierunków jak: geologia, gospodarka wodna, sozologia, melioracja, inżynieria i ochrona środowiska itp.

Autorzy pragną wyrazić serdeczne podziękowania wszystkim, którzy pomagali im w przeprowadzeniu badań terenowych i laboratoryjnych oraz opracowaniu zebranego materiału. Szczególnie dziękujemy dr Dorocie Porowskiej za gromadzenie i weryfikację materiałów archiwalnych.

WSTĘP

Opis migracji zanieczyszczeń w warstwie wodonośnej wymaga znajomości teoretycznych podstaw transportu zanieczyszczeń, metod wyznaczenia parametrów migracji oraz, finalnie, stworzenia modelu reakcji oddziaływań i transportu masy. Rozwój technik modelowania matematycznego dodatkowo wymusza konieczność uzyskania wielu nowych danych wejściowych do stworzonych modeli. Czynniki te sprawiają, że wykonanie wiarygodnego i rzetelnego modelu odzwierciedlającego aktualny i prognozowany stan środowiska wód podziemnych staje się zadaniem skomplikowanym, wymagającym od wykonawcy wiedzy teoretycznej, znajomości terenowych i laboratoryjnych procedur wyznaczania parametrów migracji, a także umiejętności stosowania modeli matematycznych.

Poradnik składa się z dwóch części:

- części teoretycznej, wyjaśniającej mechanizmy transportu masy w warstwie wodonośnej oraz metody wyznaczania parametrów migracji – wiadomości, które są niezbędne do opisu ruchu substancji rozpuszczonych, w tym zanieczyszczeń w wodach podziemnych;
- części praktycznej, przedstawiającej przykładowe wyniki badań terenowych i laboratoryjnych oraz numeryczne modele reakcji oddziaływań i transportu masy w ośrodku porowatym wykonane dla wytypowanego poligonu badawczego.

Silne zagrożenie dla ekosystemów i zdrowia człowieka stanowią nieizolowane ogniska zanieczyszczeń, z których odcieki docierają do wód podziemnych. Są to przede wszystkim składowiska odpadów komunalnych i przemysłowych, na których deponuje się odpady w sposób daleki od wymogów ochrony środowiska, najczęściej nieefektywnie, bez odzysku surowców wtórnych.

W Polsce rocznie odprowadza się na wysypiska około 43 mln m³ odpadów komunalnych stałych i około 15 mln m³ odpadów płynnych oraz około 65 mln ton odpadów przemysłowych. O tym, że problem utylizacji odpadów jest jeszcze daleki od rozwiązania, świadczy fakt, że w Polsce jest kompostowane zaledwie 1,5% odpadów komunalnych (Cz. Rosik-Dulewska, 2000).

Opady atmosferyczne przenikając przez źle zabezpieczone składowiska oraz wody powierzchniowe i podziemne kontaktujące się z odpadami, rozpuszczając zanieczyszczenia, potencjalnie stają się szczególnie niebezpieczne dla środowiska wód podziemnych. Odcieki z wysypisk odpadów komunalnych, szczególnie w przypadku wysypisk, w których panują warunki beztlenowe, charakteryzują się bardzo wysokimi koncentracjami toksycznych składników zarówno organicznych, jak i nieorganicznych. Jak istotnym problemem dla ochrony wód podziemnych są odcieki składowiskowe, świadczy wiele stwierdzonych przypadków zanieczyszczeń wód podziemnych w rejonach ich funkcjonowania (J.D. Arneth i in., 1989).

W tym kontekście poligon badawczy zlokalizowano w strefie stwierdzonego oddziaływania na wody podziemne składowiska odpadów komunalnych, w pobliżu którego doszło do powstania chmury zanieczyszczeń migrującej w wodzie podziemnej.

Podstawowym celem przeprowadzonych prac badawczych było opracowanie i praktyczne przetestowanie schematu postępowania przy dokumentowaniu migracji substancji rozpuszczonych, w tym zanieczyszczeń w warstwie wodonośnej. Doświadczenia zebrane w trakcie wykonywania prac laboratoryjnych i terenowych oraz testy wykonane na modelach numerycznych posłużyły do przygotowania procedur odwzorowania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w warstwie wodonośnej, pozwalających na przeprowadzenie analiz prognostycznych i symulacyjnych.

W badaniach tych szczególne znaczenie miały prace laboratoryjne. W trakcie ich realizacji wykonano oznaczenia: współczynnika filtracji, porowatości efektywnej, gęstości objętościowej, składu granulometrycznego, pojemności sorpcyjnej, parametrów i składu chemicznego wód,

w tym zawartości węgla organicznego i innych. Szereg oznaczeń wykonano na sorpcjometrze kolumnowym, urządzeniu skonstruowanym w ramach współpracy naukowej pomiędzy Uniwersytetem Warszawskim i Uniwersytetem im. Adama Mickiewicza w Poznaniu.

W poradniku uwzględniono główne procesy warunkujące migrację zanieczyszczeń w warstwie wodonośnej, ze szczególnym uwzględnieniem procesów sorpcyjnych. Dzięki zastosowaniu zmodyfikowanej metodyki badań kolumnowych stworzono procedury postępowania pozwalające na zwiększenie dokładności prognoz i numerycznych symulacji transportu masy. Suma wyników przeprowadzonych obserwacji umożliwiła identyfikację warunków hydrodynamicznych, zmian jakości wody podziemnej w czasie i przestrzeni oraz określenie tempa rozprzestrzeniania się substancji zanieczyszczających w wytypowanym poligonie badawczym.

Współczesne techniki sporządzania prognoz migracji zanieczyszczeń wymagają zastosowania nowych schematów obliczeniowych. Wymóg ten spełniono poprzez połączenie modelowania hydrodynamicznego z modelowaniem geochemicznym. Umożliwiło to uwzględnienie większej liczby czynników opisujących transport masy w ośrodkach porowatych. W konsekwencji do modelowania transportu zanieczyszczeń w strumieniu wód podziemnych zastosowano program MT3D z pakietu Visual Modflow, a odwzorowania reakcji chemicznych wykonano programem PhreeqC. Są to programy najczęściej wykorzystywane przez ośrodki naukowe oraz firmy zajmujące się problematyką ochrony środowiska. Szczególnie program Visual Modflow firmy Waterloo Hydrogeologic Inc. jest najpowszechniej w kraju i na świecie wykorzystywanym pakietem obliczeniowym.

W trosce o jakość i poprawność informacji zawartych w poradniku w opracowaniu uczestniczyli autorzy z trzech uczelni. Poza licznymi konsultacjami całego zespołu, profesor Marek Nawalany najwięcej uwagi poświęcił zagadnieniom adwekcji, dyfuzji i dyspersji oraz metodom wyznaczania parametrów hydrodynamicznych i migracji zanieczyszczeń, profesor Stanisław Witczak – problematyce dotyczącej zagadnień związanych z opóźnieniem przenoszenia substancji oraz wyznaczania parametrów sorpcji, doktor Tomasz Gruszczyński, poza współudziałem w zagadnieniach wyznaczania parametrów sorpcji oraz opisie poligonu badawczego, opracował numeryczny model transportu masy. Redaktor poradnika, profesor UW Jerzy J. Małecki zajął się głównie rozpadem i biodegradacją zanieczyszczeń, łącznie z wyznaczaniem ich parametrów, stworzeniem modelu przepływu oraz przykładem metod izotopowych.

Autorzy żywią nadzieję, że poradnik przekazywany do rąk Czytelnika w znacznym stopniu ułatwi pracownikom nauki oraz inżynierom i technikom zajmującym się problemami ochrony wód podziemnych pokonanie problemów związanych z analizą migracji zanieczyszczeń w warstwach wodonośnych.