

J.J. MAŁECKI (red.), M. NAWALANY, S. WITCZAK & T. GRUSZCZYŃSKI — Wyznaczanie parametrów migracji zanieczyszczeń w ośrodku porowatym dla potrzeb badań hydrogeologicznych i ochrony środowiska. Poradnik metodyczny. Uniwersytet Warszawski, Wydż. Geologii, Warszawa 2006, 249 str.

Ukazał się właśnie poradnik metodyczny pod redakcją Jerzego Małeckiego, poświęcony wyznaczaniu parametrów migracji zanieczyszczeń w hydrogeologicznych ośrodkach porowatych. Zespół autorski stanowią pracownicy naukowcy Uniwersytetu Warszawskiego, Akademii Górniczo-Hutniczej i Politechniki Warszawskiej.

Z radością przyjąłam ukazanie się tej pozycji, mając nadzieję, że wypełni ona olbrzymią lukę w polskiej literaturze poświęconej tym zagadnieniom. Od momentu ukazania się *Ochrony wód podziemnych* pod red. A.S. Kleczkowskiego (1984) w rodzimej literaturze nie było publikacji, która kompleksowo traktowałaby te problemy. Liczyłam na wskazówki praktyczne, a także na uporządkowanie terminologii.

Na poradnik tego typu oczekiwali też praktycy hydrogeolodzy. Jeśli bowiem nie znamy parametrów migracji zanieczyszczeń, trudno mówić o wiarygodnej prognozie zagrożeń ze strony istniejących (realnych) i potencjalnych ognisk zanieczyszczeń, a w konsekwencji — trudno o wskazanie sposobów skutecznej ochrony wód podziemnych.

Aby te ww. cele zrealizować, musimy znać nie tylko prawa rządzące transportem zanieczyszczeń w środowisku wodnym, uwzględniające procesy zachodzące na granicy fazy stałej i roztworu (np. sorpcja-desorpcja, rozpuszczanie-wytrącanie) i przeobrażenia wewnętrzne roztworów wyjściowych (np. rozpad radioaktywny, biodegradacja), ale także metody laboratoryjne i polowe określania parametrów tego transportu.

Poradnik — w zamyśle autorów — jest adresowany do specjalistów hydrogeologów, zajmujących się problematyką ochrony wód podziemnych, oraz do studentów. W odczuciu autorki niniejszej recenzji jest on jednak adresowany bardziej do teoretyków niż do praktyków. Uzasadnienie tej tezy znajdzie się w poniższej recenzji. Będzie to równocześnie krótki komentarz krytyczny, o który autorzy proszą w posłowniu (str. 255), pisząc: *wszelkie komentarze krytyczne (...) są przez autorów w najwyższym stopniu pożądane i oczekiwane.*

Książka liczy 249 stron (w tym jest blisko 100 rycin, około 50 tabel, ponad 300 pozycji bibliograficznych) i składa się z 5 głównych rozdziałów.

Recenzowany poradnik dotyczy praktycznych aspektów wyznaczania parametrów migracji zanieczyszczeń w ośrodkach o strukturze porowej. Autorzy świadomie, choć niezupełnie konsekwentnie, wyłączyli z poradnika zagadnienia migracji w ośrodkach szczelinowych. Na wielu stronach znajdują się bowiem odniesienia również do tych ośrodków, jak np. w tab. 2.1., gdzie podane są stałe dyspersji podłużnej dla spękanych gruntów skalistych, czy też w tab. 2.2., gdzie zestawiono wartości współczynnika podziału K_d dla wybranych metali, czy też w rozdz. 1.6.1. (str. 32 i 33), gdzie analizuje się opóźnienie migracji w ośrodkach szczelinowych wynikające z dyfuzji poprzecznej do powierzchni nieciągłości i definiuje pojęcie porowatości odkrytej, czy też wreszcie na str. 40 i 41, gdzie podaje się wzory na opóźnienie migracji w pojedynczej szczelinie, spowodowane sorpcją.

Rozdział 1 (str. 13–72) zawiera teoretyczne podstawy transportu substancji rozpuszczonych w wodach podziemnych (adwekcja, dyfuzja, dyspersja), z uwzględnieniem procesów modyfikujących ten transport (sorpcja, rozpad i biodegradacja). Rozdział ten jest bardzo obszerny i napisany dość trudnym, hermetycznym językiem, nie zawsze z użyciem terminologii powszechnie stosowanej w hydrogeologii i zalecaną chociażby w *Słowniku hydrogeologicznym* (Dowgiało, Kleczkowski, Macioszczyk & Rózkowski (red.), 2002). Stosowane są tu m.in. takie mało rozpowszechnione terminy, jak:

- średnia prędkość porowa cząsteczek wody (V_p) — termin tożsamy ze średnią rzeczywistą prędkością ruchu wody (U);
- objętościowy strumień wody w ośrodku porowatym (q) — termin uznany przez autorów za tożsamy z prędkością filtracji? (V_f);
- trajektoria cząsteczek wody — termin w ruchu ustalonym tożsamy z linią prądu.

Czasami czuję się też terminologicznie zdezorientowana, a co najmniej — niepewna, np:

1) Przy omawianiu parametrów sorpcji wprowadza się termin **stała podziału** (np. dla liniowej izotermy sorpcji Henry'ego — K_d ; dla izotermy Freundlicha — K_F). Jednak w następnych rozdziałach wymiennie używa się dla opisanego tego parametru terminu **współczynnik podziału** (np. tab. 2.2. — str. 101, tekst — str. 126). Domyślać się mogę, że są to synonimy. *Słownik hydrogeologiczny* (op. cit., 2002) nie utwierdza mnie w tym przekonaniu, bowiem w ogóle nie definiuje bezpośrednio ani stałej ani współczynnika podziału. W słowniku, pośrednio, termin stała podziału (równowagowego) występuje w definicjach współczynnika opóźnienia (R) i izotermy sorpcji. Nie miałabym tych wątpliwości, gdyby w starszej literaturze pod tymi samymi terminami nie występowała inaczej definiowana **bezwymiarowa stała** (= współczynnik) równowagi sorpcji β (np. Macioszczyk, 1987; Kleczkowski (red.), 1984 — str. 152 i 229). Tymczasem między tymi parametrami jest istotna różnica, choć mając porowatość efektywną (n_e) oraz gęstość objętościową szkieletu gruntowego (ρ_d), można przejść z jednego parametru na drugi. W poradniku występuje też wielkość K , zdefiniowana jako bezwymiarowa stała podziału, jednak nie jest to pojęcie tożsame ze stałą bezwymiarową w rozumieniu wcześniej cytowanych autorów. Przy tych terminologicznych niejasnościach oczekiwałabym więc komentarza porządkującego, nawiązującego do wcześniejszej literatury.

2) Błędem w zapisie wzoru 1.27 (str. 31) w postaci $R=U^*/U$ (winno być $R=U/U^*$) nie obarczam autorów poradnika.

3) Efektywny współczynnik dyfuzji (D_M^*) przyjęto (wzór 1.5, str. 20, rozdz. 1.2.) jako:

$$D_M^* = l/\tau D_M$$

gdzie: D_M — współczynnik dyfuzji molekularnej [m^2/s]; τ — współczynnik krętości porów [-], przedstawiając szczegółowe uzasadnienie tej definicji w rozdz. 1.3. Oznacza to, że w definicji D_M^* nie występuje porowatość efektywna (n_e), a jedynie krętość porów. Przyjęcie takiej definicji jest dyskusyjne. Autorka recenzji uważa, że dla ośrodków nasyconych bardziej merytorycznie uzasadniony jest wzór:

$$D_M^* = n_e/\tau D_M$$

a więc powszechnie znany wzór Frank-Kamienieckiego (fide: Zwieriew, 1974), gdzie porowatość efektywna występuje w sposób jawny.

4) Dezoriantę wprowadzają wzory 1.14 (str. 22) oraz 1.20 (str. 24), określające — w rozumieniu autorów — współczynnik dyspersji hydrodynamicznej $D_h^* = D_M^* + D_{dysp}^*$. W dotychczasowej polskiej literaturze przedmiotu wzory te określają współczynnik dyspersji całkowitej (por. np. Macioszczyk & Szestakow, 1983; Macioszczyk, 1987; Macioszczyk & Dobrzyński, 2002), zwany też sumarycznym współczynnikiem dyspersji (Kleczkowski (red.), 1984).

Istotą dyspersji hydrodynamicznej jest zróżnicowanie prędkości adwekcyjnego transportu masy w kanałkach porowych o różnej wielkości i różnej krętości (por. Dowgiało, Kleczkowski, Macioszczyk & Rózkowski (red.), 2002). Natomiast w cytowanym wzorze występują 2 mechanizmy rozproszenia masy: dyfuzja i dyspersja mechaniczna (= hydrodynamiczna = kinematyczna), składające się na dyspersję całkowitą. I tylko wtedy, gdy dyspersję spowodowaną dyfuzją można pominąć ($D_M^* \rightarrow 0$), współczynnik dyspersji całkowitej będzie co do wartości równy (ale nie tożsamy w sensie fizycznym) współczynniki dyspersji hydrodynamicznej.

Dlaczego autorzy poradnika odchodzą od dotychczasowej terminologii? A skoro już, to przynajmniej powinni to skomentować i uzasadnić. Nie można jednak zarzucić autorom braku konsekwencji w stosowaniu tej terminologii. We wzorach 2.27, 2.28a i objaśnieniach do tych wzorów jednoznacznie napisano, że D_L^* rozumiany jest jako współczynnik dyspersji podłużnej, powiększony o zmodyfikowany współczynnik dyfuzji molekularnej.

Rozdział 2 (str. 73–138) zawiera opis metod wyznaczania parametrów hydrodynamicznych (2.1.) oraz parametrów migracji zanieczyszczeń w wodach podziemnych (2.2.). Podrozdział 2.1. jest krótki, treściwy i słusznie odsyła czytelników do licznej w tym względzie literatury. Poradnik straciłby niewiele, gdyby tego rozdziału w ogóle nie było. Podrozdział 2.2., dotyczący wyznaczania parametrów migracji, składa się z części dotyczącej parametrów dyspersji i parametrów sorpcji. Już same proporcje między tymi częściami są słabo wyważone, gdyż laboratoryjnym i polowym metodom określania parametrów dyspersji poświęcono tylko 15 stron!!! (str. 84–99). I właśnie szczególnie w odniesieniu do tego rozdziału autorka recenzji odczuwa ogromny niedosyt. Wątpliwości, uwagi dyskusyjne oraz oczekiwania zostaną omówione w szczegółach na przykładzie podrozdz. 2.2.1.3. — *Metody laboratoryjne wyznaczania współczynnika dyfuzji molekularnej*. Uwagi sformułowane do tego podrozdziału mają często charakter ogólny i w większości dotyczą również innych podrozdziałów.

Już sam tytuł podrozdziału 2.2.1.3. jest mylący, bo w istocie chodzi o wyznaczenie efektywnego współczynnika dyfuzji (= współczynnika dyfuzji molekularnej w ośrodku porowym). Na wstępie autorzy piszą, że: *średnia prędkość porowa jest niewielka i w procesie transportu substancji rozpuszczonej dominujący jest strumień dyfuzyjny* (str. 98). Modelując proces czystej dyfuzji nie wolno dopuścić nawet do „niewielkiego” ruchu wody w porach. W przeciwnym wypadku modeluje się proces dyspersji, a nie dyfuzji. Ponieważ parametrem ten w migracji zanieczyszczeń istotny jest tylko dla gruntów spoistych (o słabej przepuszczalności), modelując ww. proces należy wyeliminować gradient hydrauliczny po to, by transport analizowanego składnika był wywołany wyłącznie przez gradient koncentracji!

W poradniku metodycznym oczekiwałabym też np. takich informacji:

□ schematu badań (na rysunku), pozwalającego określić warunki brzegowe i początkowe oraz zapisać równanie transportu mas, a następnie dla tych warunków — zapisu analitycznego rozwiązania równania;

□ opisu przygotowania próbek i sposobu opróbowania wód porowych. Jak opróbować wody porowe w *cienkich plasterkach o grubości kilku milimetrów* (str. 99); czy wody porowe do analizy

lepiej wycisnąć (co zmusza do stosowania dużych próbek), czy też dopuszcza się (a może zaleca?) stosowanie ekstraktów wodnych;

□ przykładowych wyników pomiarów stężeń w funkcji drogi transportu i czasu [$C_i=f(x,t)$] i na ich bazie — obliczeniowego przykładu interpretacji wyników, a więc opisu postępowania prowadzącego do obliczenia współczynnika dyfuzji efektywnej (D_M^*). Takiego kompleksowego, praktycznego schematu postępowania, od momentu przygotowania próbki do badań laboratoryjnych po interpretację wyników włącznie, oczekiwałabym także przy opisie laboratoryjnych metod wyznaczania stałej dyspersji podłużnej.

Istnieje wiele rozwiązań analitycznych równania transportu mas, wystarczających dla oceny stopnia zagrożenia (por. np. Kleczkowski (red.), 1984; Lunn & in., 1996) dla prostych systemów przepływu. Poradnik takich prostych rozwiązań nie prezentuje. Przedstawia natomiast, bardzo szeroko, badania polowe na wybranym poligonie badawczym (rejon składowiska odpadów komunalnych w Otwocku — w dolinie Wisły), gdzie parametry migracji interpretowane są w oparciu o numeryczny model migracji. Prezentowane badania są jednak kosztowne. Najprawdopodobniej w tych dosyć złożonych warunkach hydrodynamicznych poligonu badawczego uzasadnione było stworzenie numerycznego modelu migracyjnego. Jednak w wielu przypadkach, lokalnych ognisk zanieczyszczeń w mało złożonym polu filtracji, parametry migracji mogłyby być interpretowane przy użyciu prostych rozwiązań analitycznych, a nie rozwiązań numerycznych. Przykładowo, oczekiwałabym prostych rozwiązań dla sytuacji, gdy w tym samym kierunku (liniowo) występuje gradient koncentracji (wywołujący proces dyfuzji) i gradient hydrauliczny (wywołujący adwekcję z towarzyszącą jej dyspersją hydrodynamiczną), lub też w układzie płaskim — gdy dyfuzja przebiega w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu wód podziemnych. Chciałabym też znać proste ilościowe metody pozwalające na ocenę, kiedy proces dyfuzji można w obliczeniach pominąć. A ponieważ w analitycznych rozwiązaniach równania transportu mas występuje funkcja $erf(a)$ i $erfc(a)$, oczekiwałabym też dołączenia (np. w postaci aneksu) tabeli z wartościami tych funkcji błędu o rozkładzie normalnym, opisanych w poradniku równaniem różniczkowym.

W podrozdz. 2.2.1.1. brakuje bardziej szczegółowego komentarza do rozwiązania równania 2.28a (str. 93), kiedy drugi człon tego równania można pominąć i przyjąć rozwiązanie wg równania 2.28b. Co to znaczy (dla praktyków) *dostatecznie duża wartość czasu t* lub, *równoważnie, dostatecznie duża wartość odległości x*, jaka jest *więcej pożądana wartość względnego błędu stężenia C* (str. 94), by można było stosować rozwiązanie uproszczone według równania 2.28b. W tym samym rozdziale (str. 95) w komentarzu do wzoru 2.33b używa się terminu **stała dyfuzji** molekularnej D_M^* . To nie jest stała, lecz — współczynnik — a jeśli autorzy sądzą, że to są synonimy, to w rozdziale teoretycznym i w wykazie oznaczeń powinien znaleźć się taki komentarz (zapis).

Ponieważ interpretacja wyników badań kolumnowych eksperymentów laboratoryjnych i badań polowych zależy od kształtu „krzywej przejścia” znacznika, liczyłam też na pokazanie różnych „krzywych”, o odmiennym przebiegu i charakterze, i pokazanie możliwości interpretacyjnych. Młodzi, mało doświadczeni adepci hydrogeologii zapewne oczekiwaliby też informacji, jak w badaniach polowych ocenić (oszacować) konieczną masę (i/lub koncentrację) znacznika na „wejściu”, czyli w otwartej iniekcyjnym i jak dobrać wydatek. W poradniku teoretycznie przeanalizowano przykład studni w nieograniczonej warstwie wodonośnej z iniekcją ciągłą. A co w przypadku iniekcji krótkotrwałej? Właśnie w terenie realizujemy w większości ten drugi typ badań!

W sumie 1,5 stronicowy opis polowej metody wyznaczania stałej dyspersji podłużnej nie tylko w praktyce nie wnosi wiele do poradnika metodycznego, ale także i dla teoretyków jest absolutnie niewystarczający.

Podrozdz. 2.2.2. — *Wyznaczanie parametrów sorpcji* — jest bardzo rozbudowany. Przedstawia się tu m.in. w szczegółach, jak określić skład kompleksu sorpcyjnego, pojemność wymiany kationowej, pokazuje aparaturę i przykłady doświadczeń statycznych i dynamicznych dla wyznaczania izoterm sorpcji wraz z

opisem przygotowania roztworów. Gdyby zasadę tę przyjęto także dla pozostałych rozdziałów, poradnik spełniłby swoje zadanie.

Podrozdział 2.2.3., dotyczący parametrów rozpadu i biodegradacji, także ma wiele zalet, jak chociażby zestawienie (tab. 2.10) norm dotyczących biodegradacji związków organicznych w środowisku wodnym, zestawienia czasów połowicznego rozpadu substancji organicznych w różnych środowiskach (powietrze, woda, gleba i grunt) itd.

W tych ostatnich dwóch podrozdziałach (a także w dalszej części poradnika, dotyczącej parametrów sorpcji) podane są przykłady badań laboratoryjnych i ich interpretacji. A co z badaniami terenowymi? Dla istniejących ognisk zanieczyszczeń, długo monitorowanych, np. w piezometrach, mając „krzywe przejścia” można pokusić się o interpretację parametrów sorpcji. Na ryc. 2.6 (str. 100) autorzy wspominają o metodach interpretacji tych parametrów w oparciu o nomogramy, wzory analityczne i obliczenia numeryczne. Ale na tym koniec. W dalszych rozdziałach podaje się tylko interpretację z modelu numerycznego.

Ostatnio, wobec realizacji programu likwidacji mogilników, w Polsce pojawiło się szereg wyników badań monitoringowych dotyczących pestycydów. Przykład interpretacji wyników takich badań, gdzie oprócz dyspersji występuje zarówno zjawisko sorpcji, jak i biodegradacji, byłby przykładem wymienionym i kompleksowym.

Rozdział 3 (str. 139–195) dotyczy opisu poligonu badawczego, którym jest składowisko odpadów komunalnych w Otwocku i jego otoczenie. W rozdziale tym przedstawiono uwarunkowania geosrodowiskowe, takie jak: budowa geologiczna, warunki hydrogeologiczne udokumentowane badaniami geofizycznymi, oznaczeniami współczynnika filtracji w warunkach laboratoryjnych i polowych, badaniami porowatości efektywnej i współczynnika odsączalności, wyniki badań składu chemicznego wód powierzchniowych i podziemnych (uwaga: na 244 próbkach wykonano 4417 oznaczeń parametrów fizycznych i chemicznych, a więc w bardzo szerokim zakresie), badania gęstości objętościowej szkieletu gruntowego (a nie — jak piszą autorzy — gęstości objętościowej skał), wyniki badań laboratoryjnych składu kompleksu sorpcyjnego i pojemności kationów wymiennych wraz z obliczeniami modelowymi składu tego kompleksu w oparciu o program PHREEQC, a także oznaczenia parametrów sorpcyjnych aluwii w odniesieniu do jonu Mg^{2+} metodą statyczną i dynamiczną (na podstawie równania Langmuira), z dyskusją wyników uzyskanych z tych metod. Ten blisko 60-stronicowy rozdział, zdaniem autorki, jest zbyt obszerny i prezentuje wyniki badań (i ich dyskusję) nie dotyczących wprost parametrów migracji zanieczyszczeń. Jest bowiem oczywiste, że dane klimatyczne czy też parametry hydrogeologiczne ośrodka (współczynnik filtracji i jego rozkład, porowatość efektywna, dynamika zwierciadła wód gruntowych) to podstawowe dane hydrogeologiczne, niezbędne do stworzenia numerycznego modelu przepływu, który jest podstawą dla stworzenia modelu transportu mas. Można więc było ten rozdział ograniczyć, sprowadzając go do krótkiego syntetycznego opracowania, stanowiącego podstawę dla stworzenia matematycznego modelu transportu zanieczyszczeń.

W tym miejscu należy też postawić pytanie, czy wybrany poligon badawczy jest dobrym przykładem dla poradnika metodycznego. Moim zdaniem — być może subiektywnym — nie jest to przykład dobry. Mimo szerokiego zakresu badań terenowych i laboratoryjnych nie został w pełni rozpoznany system krążenia wód podziemnych, tak bardzo zależny od stanów wód powierzchniowych w Wiśle i Świdrze.

Rozdział 4 (str. 196–221) stanowi opis numerycznego modelu transportu zanieczyszczeń, do którego obliczenia wykonano w oparciu o program MODFLOW, szczegółowo opisując zarówno model przepływu (podrozdz. 4.1.), jak i model migracyjny (podrozdz. 4.2.). Ten ostatni model pozwolił wyznaczyć parametr tego transportu, jakim jest stała dyspersji podłużnej. Wynikiem obliczeń jest mapa rozkładu stężeń jonów Cl^- w funkcji czasu i drogi migracji, a także podobne odwzorowanie adsorpcji jonu Mg^{2+} . Autorzy dyskutują wyniki tych obliczeń

(dla czasu $t = 368$ dni), wskazując na wysoką ich zgodność z danymi empirycznymi.

Autorzy nie uniknęli tu drobnych błędów, jak chociażby (por. Visual MODFLOW, 2000):

❑ w zapisie wyrażenia na błąd średni (wzór 4.8);

❑ w zapisie wyrażenia na standardowy błąd estymacji (*standard error of the estimate*, a nie — jak objaśniono — *root mean squared = RMS*). Podany wzór 4.10 jest wzorem na RMS.

W krótkim rozdziale 5 (str. 222–228) przedstawiono możliwości wykorzystania naturalnych znaczników izotopowych do wyznaczania parametrów migracji zanieczyszczeń. Przykład zaczerpnięto z literatury. Jest nim składowisko odpadów w Borden k. Toronto. W oparciu o badania zawartości trytu w wodach podziemnych określono stałą dyspersji dla piaszczystej warstwy wodonośnej. Ponieważ w recenzowanym poradniku przykładem obliczeń parametrów migracji zanieczyszczeń jest składowisko odpadów komunalnych w Otwocku, należy żałować, że nie wykonano tu badań izotopowych i w oparciu o nie nie wyznaczono stałej dyspersji. Byłby to jednocześnie materiał porównawczy dla wyników stałej dyspersji uzyskanych z modelu numerycznego.

Pracę kończy spis literatury, norm i rozporządzeń, krótkie posłowie oraz wykaz oznaczeń, wymiarów i jednostek.

Podsumowując: uważam, że recenzowana praca tylko częściowo spełnia funkcję poradnika metodycznego. Wiele zagadnień istotnych dla praktyki hydrogeologicznej przedstawionych zostało tylko w ujęciu teoretycznym, a nie praktycznym. Do mankamentów zaliczam w szczególności:

❑ brak prezentacji rozwiązań analitycznych dla prostych schematów przepływu wód podziemnych;

❑ brak konkretnych obliczeniowych przykładów interpretacji wyników badań;

❑ zbyt małe uwypuklenie możliwości zastosowania (wraz z interpretacją) znaczników środowiskowych dla rozwiązywania zagadnień migracji zanieczyszczeń.

Pomimo tych braków recenzowana praca wypełnia w jakimś stopniu ponad 20-letnią lukę w polskiej literaturze hydrogeologicznej od czasu ukazania się pracy pod red. A.S. Kleczkowskiego (1984). Dlatego, mimo powyższych wielu uwag krytycznych, które w znacznym stopniu odzwierciedlają moje marzenia o tego typu poradniku metodycznym, polecam ją polskim hydrogeologom. Ale równocześnie mam nadzieję na rychłe ukazanie się drugiego wydania, znacznie poszerzonego o konkretne przykłady. No i liczę na erratę.

Ewa Liszkowska