

ANALIZA PARAMETRYCZNA KRZYWEJ PRZEJŚCIA ZNACZNIKA PRZEZ KOLUMNĘ FILTRACYJNĄ

THE SENSITIVITY TEST FOR A BREAKTHROUGH CURVE RECORDED DURING TRACER MIGRATION IN A FILTRATION COLUMN

MAREK MARCINIAK¹, MONIKA OKOŃSKA¹, MARIUSZ KACZMAREK², KATARZYNA KAZIMIERSKA-DROBNY²

Abstrakt. Kształt krzywej przejścia znacznika przez kolumnę filtracyjną jest zdeterminowany przez udział różnych mechanizmów migracji, zachodzących podczas transportu danej substancji. Na podstawie interpretacji krzywej przejścia można rozpoznać wartości parametrów filtracji i migracji znacznika przez próbkę gruntu, tj. dokonać kalibracji modelu. Celem badań opisanych w artykule była analiza zależności kształtu krzywej przejścia od procesów zachodzących w kolumnie i wartości parametrów filtracji i migracji. Opracowano model matematyczny eksperymentu kolumnowego i napisano kod dla jego rozwiązania metodą elementów skończonych w środowisku obliczeniowym MATLAB. Na podstawie analizy parametrycznej modelu zbadano zależność kształtu krzywej przejścia od parametrów procesów filtracji i migracji. Analizę parametryczną przeprowadzono dla parametrów występujących w makroskopowym opisie matematycznym procesu migracji uwzględniając mechanizmy adwekcji, dyfuzji i dyspersji. Proces sorpcji opisano równowagowymi modelami Henry'ego, Freundlicha lub Langmuira lub liniowym modelem kinetycznym sorpcji odwracalnej lub nieodwracalnej. Obliczenia przeprowadzono przy założeniu, że na wejściu do kolumny znacznik jest iniekowany przez krótki czas, co można traktować jako superpozycję dwóch impulsów Heaviside'a o przeciwnych amplitudach, przesuniętych w czasie. Zakres zmienności parametrów dobierano uwzględniając podawane w literaturze dane dotyczące parametrów migracji w warunkach laboratoryjnych.

Słowa kluczowe: eksperyment kolumnowy, krzywa przejścia, analiza parametryczna, transport znacznika.

Abstract. The shape of a breakthrough curve characterizing tracer migration in a filtration column is determined by several migration processes that occur during the transport of the tracer. The research presented in this paper was based on the interpretation of a breakthrough curve. This interpretation was performed in order to establish the parameters of water flow and tracer migration in a sample of soil. The relationship between the shape of a breakthrough curve and the processes that occur in the filtration column, as well as the parameters of water flow and tracer migration, were characterized. A mathematical model of a column experiment was formulated and solved using the MATLAB computational environment. Based on the sensitivity test executed for the model, the relation between the curve's shape and the parameters of water flow and tracer migration was established. The sensitivity test was used for the parameters included in the mathematical equation of water flow and the following migration processes: advection, diffusion, dispersion, and sorption described by the Henry, Freundlich and Langmuir equations, as well as kinetic models of sorption. Calculations were performed assuming that the tracer is briefly injected at the input of the column. Such procedure creates conditions which resemble the superposition of two Heaviside impulses shifted in time and of opposite amplitudes. The variability range of the analyzed parameters was selected in accordance with data reported in the literature on migration parameters in laboratory conditions.

Key words: column experiment, breakthrough curve, parametric statistics, tracer migration.

¹ Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, ul. Dziegielowa 27, 61-680 Poznań; e-mail: mmarc@amu.edu.pl, okonska@amu.edu.pl

² Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Wydział Matematyki, Fizyki i Techniki, Zakład Modelowania i Symulacji, ul. Chodkiewicza 30, 85-064 Bydgoszcz; e-mail: mkk@ukw.edu.pl, kkd@ukw.edu.pl

WSTĘP

Laboratoryjne badania kolumnowe prowadzone są w celu uzyskania danych do modelowania procesów filtracji i migracji substancji w ośrodku wodonośnym. Efektywne planowanie eksperymentów kolumnowych oraz interpretacja uzyskiwanych wyników wymaga rozpoznania zależności kształtu krzywej przejścia od procesów zachodzących w kolumnie oraz od wartości parametrów tych procesów. Takie rozpoznanie przeprowadzono poprzez analizę parametryczną krzywej przejścia, nazywaną analizą wrażliwości. Analizę parametryczną krzywej przejścia przedstawioną we wcześniejszych badaniach (Kaczmarek i in., 2008; Marciniak i in., 2009) autorzy poszerzyli obecnie o dodatkowe modele procesów sorpcyjnych.

W literaturze naukowej nieczęsto spotyka się dane o analizie wrażliwości eksperymentów kolumnowych. Zazwyczaj prezentowane są wyniki badań eksperymentalnych realizowanych dla różnych ośrodków, przez które migrują różne

zanieczyszczenia (Małecki i in., 2006; Marciniak, Okońska, 2006; Dai i in., 2012). Analiza teoretyczna zmienności czasowej krzywej przejścia wymaga zdefiniowania modelu matematycznego procesów zachodzących podczas migracji znacznika przez ośrodek. Dodatkowym utrudnieniem podczas wykonywania analizy wrażliwości jest zależność krzywej przejścia od czasu przepływu wody przez kolumnę, który zależy głównie od gradientu hydraulicznego i rozmiarów kolumny. Prezentowaną w artykule analizę wrażliwości przeprowadzono dla kolumny o średnicy 90 mm i długości 500 mm. Takie wymiary spełniają zalecane w literaturze relacje średnicy do długości kolumny (Klotz i in., 1988). Przydatność analizy parametrycznej w dalszych badaniach kolumnowych będzie polegać na możliwości rozpoznania poszczególnych procesów migracji na podstawie zarejestrowanego doświadczalnie kształtu krzywej przejścia (Okońska i in., 2009).

MODEL MATEMATYCZNY EKSPERYMENTU KOLUMNOWEGO

Na proces migracji substancji w kolumnie filtracyjnej mogą się składać mechanizmy adwekcji, dyfuzji molekularnej, dyspersji mechanicznej oraz procesy wymiany masy ze szkieletem gruntowym (Weber i in., 1991). Dla jednowymiarowego ośrodka, w którym zachodzi transport substancji równanie migracji przyjmuje postać:

$$\frac{\delta C}{\delta t} = -\frac{ki}{n_e} \frac{\delta C}{\delta x} + \left(D_M + \alpha \frac{ki}{n_e} \right) \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} - (1-n_e) \frac{\rho_s}{n_e} \frac{\delta s}{\delta t} \quad [1]$$

gdzie: C – stężenie substancji w objętości wody porowej [$\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$], D_M – współczynnik dyfuzji [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$], i – gradient hydrauliczny [cm/cm], k – współczynnik filtracji [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], n_e – współczynnik porowatości efektywnej [-], s – stężenie substancji zaadsorbowanej w materiale porowatym [$\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$], α – stała dyspersji podłużnej [m], ρ_s – gęstość szkieletu gruntowego [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

W pracy wśród procesów wymiany uwzględniono procesy sorpcyjne, a pominięto efekty takie jak: reakcje chemiczne ze szkieletem, biodegradacja, zjawiska chemo-elektro-osmotyczne lub efekty kapilarne.

W pierwszej kolejności z funkcjonujących modeli sorpcyjnych przeanalizowano przypadek, gdy tempo przebiegu procesu sorpcji jest względnie szybkie i może być opisane jako proces równowagowy. Przetestowano trzy podstawowe izotermie sorpcji mające zastosowanie w praktyce hydrogeologicznej:

- izotermę liniową Henry'ego

$$s = K_d C \quad [2]$$

- izotermę nieliniową Freundlicha

$$s = K_F C^{n_F}, \text{ dla } 0 < n_F \leq 1 \quad [3]$$

- izotermę nieliniową Langmuira

$$s = \frac{\alpha_L \beta_L C}{1 + \alpha_L C} \quad [4]$$

gdzie współczynniki K_d , K_F , n_F , α_L oraz β_L są stałymi opisującymi poszczególne rodzaje sorpcji.

Zakładając jednopolozeniowy model sorpcji równowagowej (*one-site sorption*) (Van Genuchten, Wagenet, 1989) oraz niezależność współczynników sorpcji od czasu, równanie ogólne transportu (1) przyjmuje postać:

$$R \frac{\delta C}{\delta t} + \frac{ki}{n_e} \frac{\delta C}{\delta x} - \left(D_M + \alpha \frac{ki}{n_e} \right) \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} = 0 \quad [5]$$

gdzie

$$R = 1 + (1-n_e) \frac{\rho_s}{n_e} \frac{\delta f}{\delta C} \quad [6]$$

nazywany jest współczynnikiem retardacji, natomiast funkcja $\frac{\delta f}{\delta C}$ zależy od przyjętego modelu sorpcji.

W dalszych rozważaniach zastosowano modele opisujące sorpcję nierównowagową, wykorzystując poniższe najczęściej rozważane w hydrogeologii równania kinetyki sorpcji:

- liniowy, kinetyczny model sorpcji nieodwracalnej

$$\frac{\delta s}{\delta t} = k_1 C \quad [7]$$

- liniowy, kinetyczny model sorpcji odwracalnej

$$\frac{\delta s}{\delta t} = k_2 C - k_3 s \quad [8]$$

Modele opisujące jednowymiarowy transport dyspersyjny z jednopółżeniową sorpcją nierównowagową mają postać układów równań:

- model z liniową sorpcją nieodwracalną

$$\begin{cases} \frac{\delta C}{\delta t} + (1-n_e) \frac{\rho_s}{n_e} \frac{\delta s}{\delta t} + \frac{ki}{n_e} \frac{\delta C}{\delta x} - \left(D_M + \alpha \frac{ki}{n_e} \right) \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} = 0 \\ \frac{\delta s}{\delta t} = k_1 C \end{cases} \quad [9]$$

- model z liniową sorpcją odwracalną

$$\begin{cases} \frac{\delta C}{\delta t} + (1-n_e) \frac{\rho_s}{n_e} \frac{\delta s}{\delta t} + \frac{ki}{n_e} \frac{\delta C}{\delta x} - \left(D_M + \alpha \frac{ki}{n_e} \right) \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} = 0 \\ \frac{\delta s}{\delta t} = k_2 C - k_3 s \end{cases} \quad [10]$$

Do rozwiązania równań opisujących migrację, przyjęto warunki graniczne. Warunek początkowy określał rozkład stężenia substancji w całym analizowanym obszarze w chwili $t = 0$, przyjętej jako początkową:

$$C(x, t = 0) = 0 \text{ dla } x \geq 0 \quad [11]$$

Warunek brzegowy I rodzaju (Dirichleta) przyjęto w postaci:

$$C(x=0, t) = C_0 \text{ dla } 0 < t \leq T \quad [12]$$

gdzie T oznacza czas trwania iniekcji.

Warunek brzegowy II rodzaju określał wartość pochodnej funkcji $C(x, t)$ w kierunku normalnej do powierzchni Γ rozpatrywanego obszaru:

$$\frac{\delta C}{\delta n} \Big|_{\Gamma} = f(x, t) \quad [13]$$

przy czym brzeg obszaru $\Gamma = \Gamma_{x=L}$.

ZASADY PRZEPROWADZENIA ANALIZY PARAMETRYCZNEJ

Analizę parametryczną przeprowadzono dla dwunastu parametrów filtracji i migracji:

- parametru procesu filtracji: współczynnika filtracji k ;
- parametrów procesów adwekcji, dyfuzji i dyspersji: współczynnika porowatości efektywnej n_e , współczynnika dyfuzji molekularnej D_M oraz stałej dyspersji α ;
- parametrów procesów sorpcyjnych opisanych izotermą Henry’ego K_d , izotermą Freundlicha K_F i n_F oraz izotermą Langmuira α_L oraz β_L ;
- parametrów procesu sorpcji nieodwracalnej uwzględniającej kinetykę reakcji k_1 oraz procesu sorpcji odwracalnej uwzględniającej kinetykę reakcji k_2 i k_3 .

Wrażliwość krzywej przejścia testowano, wykorzystując sześć modeli matematycznych. Rozwiązania tych modeli przeprowadzono w programie napisanym w środowisku obliczeniowym MATLAB. Program, przez specjalnie wbudowany *interfejs*, umożliwia wprowadzanie danych wejściowych, wizualizację wygenerowanej krzywej przejścia oraz eksport wyników obliczeń. Jeśli w analizowanych modelach matematycznych, krzywe przejścia znacznika przez kolumnę fil-

tracyjną zależały od więcej niż jednego parametru, to analizę wrażliwości krzywej przejścia prowadzono kolejno dla jednego parametru, przyjmując wartości pozostałych parametrów jako stałe.

Oceny zmienności krzywych przejścia uzyskanych na podstawie przeprowadzonej analizy parametrycznej dokonano poprzez porównanie:

- maksymalnych wartości koncentracji znacznika na wyjściu, nazwanych amplitudą krzywej przejścia,
- czasu trwania impulsu na wyjściu, nazwanego szerokością krzywej przejścia,
- momentu pojawienia się znacznika na wyjściu z kolumny, nazwanego początkiem krzywej przejścia.

Analizę parametryczną krzywych przejścia przeprowadzono w kolumnie filtracyjnej. Przyjęto stężenie znacznika na wejściu do kolumny $C_0 = 10 \text{ mg/dm}^3$. Symulacje przeprowadzono dla impulsowej iniekcji znacznika trwającej 30 min, co odwzorowano na modelach jako superpozycję dwóch impulsów Heaviside’a o przeciwnych amplitudach i przesuniętych w czasie o 30 minut.

W pierwszej kolejności sprawdzono wpływ współczynnika filtracji na kształt krzywej przejścia. Obliczenia przeprowadzono dla trzech wartości współczynnika filtracji: $k = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$, $k = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$, $k = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ (fig. 1). Następnie ustalono wartości parametrów krzywej przejścia, którą uznano za krzywą odniesienia (k.o., tab. 1). Wpływ poszczególnych parametrów filtracji i migracji na kształt krzywej przejścia oceniano poprzez porównanie uzyskiwanych krzywych przejścia z krzywą odniesienia.

Przyjęty w analizie parametrycznej zakres zmienności parametrów filtracji i migracji ustalono na podstawie danych literaturowych. W przypadku braku odpowiednich danych zakres zmienności parametru dobierano w taki sposób, aby czytelnie pokazać na wykresach wpływ danego parametru na kształt krzywej przejścia. Wartości parametrów przyjęte podczas analizy zestawiono w tabeli 1.

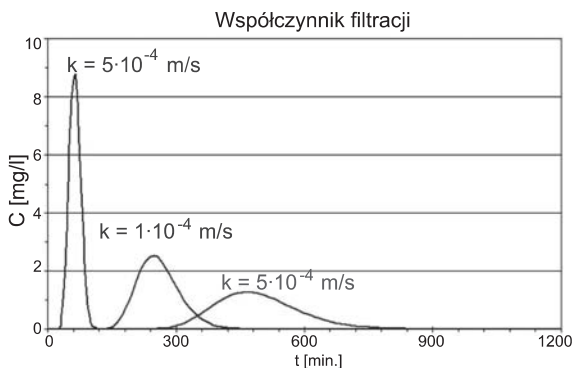


Fig. 1. Krzywe $C = C(t)$ przejścia znacznika dla trzech wartości współczynnika filtracji

The breakthrough curves of the tracer $C = C(t)$ for three values of hydraulic conductivity

Tabela 1

Zakres zmienności parametrów filtracji i migracji przyjęty podczas analizy parametrycznej eksperymentu kolumnowego

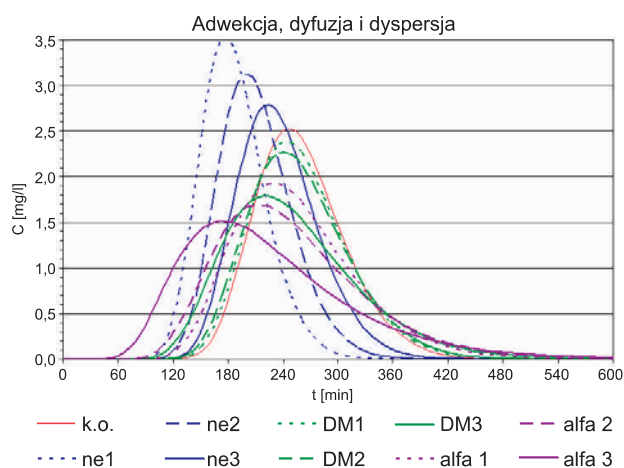
The range of the variability of the filtration and migration parameters accepted during the parametric analysis of the column experiment

Parametry kolumny			k.o.													
Wysokość próbki	L	m	0,5													
Średnica	d	m	0,09													
Gradient hydrauliczny	i	m/m	0,1													
Gęstość materiału szkieletu	ρ_s	kg/l	2,65													
Parametry filtracji				n_{c1}	n_{c2}	n_{c3}										
Współczynnik filtracji	k	m/s	$1 \cdot 10^{-4}$													
Współczynnik porowatości	n	-	0,3													
Współczynnik porowatości efektywnej	n_e	-	0,3	0,21	0,24	0,27										
Parametry migracji				α_1	α_2	α_3	D_{M1}	D_{M2}	D_{M3}							
Współczynnik dyfuzji molekularnej	D_M	m^2/s	0				$5 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$							
Stała dyspersji hydrodynamicznej	α	m	0,01	0,02	0,03	0,05										
Parametry sorpcji				K_{d1}	K_{d2}	K_{d3}	n_{f1}	n_{f2}	n_{f3}	α_{L1}	α_{L2}	α_{L3}	β_{L1}	β_{L2}	β_{L3}	
Izoterma Henry'ego	K_d	dm^3/mg	0	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$										
Izoterma Freundlicha	K_F	dm^3/mg	0				$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$							
	n_F	-	1				1,2	1,4	1,6							
Izoterma Langmuira	α_L		0							0,04	0,07	0,10	0,07	0,07	0,07	
	β_L		0							1,0	1,0	1,0	1,1	1,2	1,3	
Parametry kinetyki sorpcji				k_1	k_2	k_3	k_3	k_3	k_3							
Sorpcja kinetyczna nieodwracalna	k_1	$dm^3/mg \cdot s$	0	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$										
Sorpcja kinetyczna odwracalna	k_2	$dm^3/mg \cdot s$	0				$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$							
	k_3	$dm^3/mg \cdot s$	0				$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$							
Parametry eksperymentu i algorytmu																
Liczba przedziałów czasowych	dt		100													
Liczba elementów przestrzennych	dx		200													
Koncentracja znacznika na wejściu	C_0	mg/l	10													
Czas trwania impulsu	T	min	30													
Czas trwania symulowanego procesu	t_{max}	min	1200													

k.o. – krzywa odniesienia, k.o. – the reference curve

UZYSKANE WYNIKI

W wyniku przeprowadzonej analizy parametrycznej uzyskano krzywe przejścia znacznika przez złożę w kolumnie dla różnych wartości parametrów filtracji i migracji. Najwięk-



szy wpływ na kształt krzywej przejścia mają zmiany współczynnika filtracji (fig. 1).

Analizę parametryczną pozostałych parametrów przeprowadzono dla trzech ustalonych wartości współczynnika filtracji. W ramach niniejszego artykułu, ze względu na ograniczoną liczbę stron, pokazano wyniki analizy wrażliwości dla $k = 10^{-4}$ m/s. Wpływ zmienności parametrów migracji na kształt krzywej przejścia pokazano na figurze 2. Na figurze 3 przedstawiono natomiast wpływ wartości parametrów izo-

←

Fig. 2. Krzywe $C = C(t)$ przejścia znacznika dla różnych wartości współczynnika porowatości efektywnej n_e , współczynnika dyfuzji D_M oraz stałej dyspersji α

The breakthrough curves of the tracer $C = C(t)$ for various values of the effective porosity n_e , the diffusion coefficient D_M and the

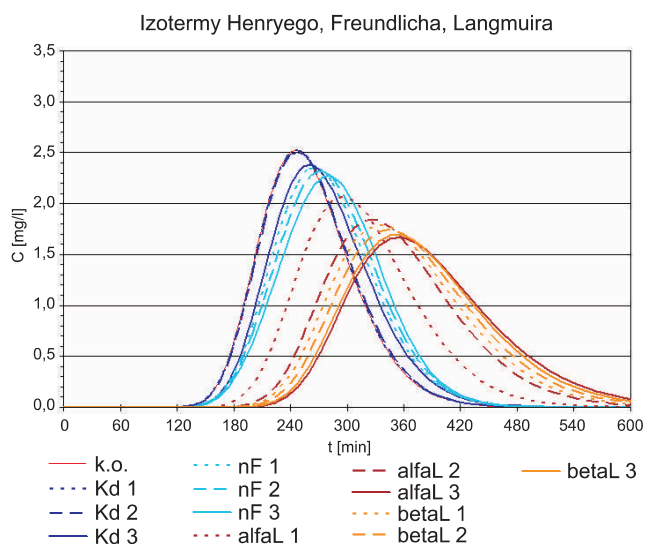


Fig. 3. Krzywe $C = C(t)$ przejścia znacznika dla różnych izoterm sorpcji: Henry’ego K_d , Freundlicha $K_F = K_d, n_F$ oraz Langmuira α_L, β_L

The breakthrough curves of the tracer $C = C(t)$ for various sorption isotherms: Henry K_d , Freundlich $K_F = K_d, n_F$ and Langmuir α_L, β_L

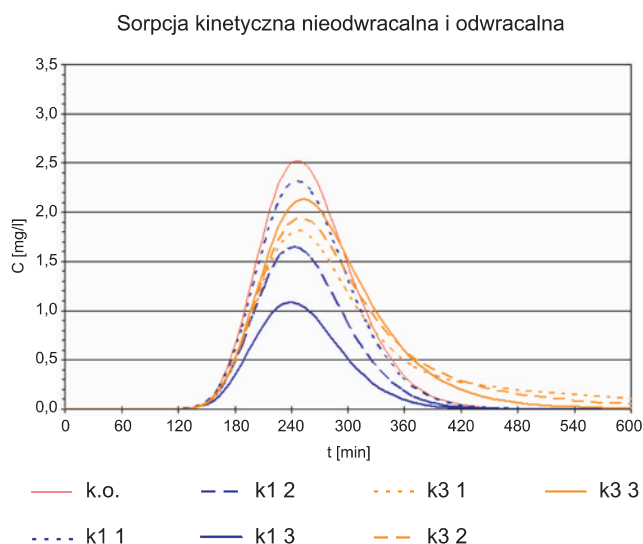


Fig. 4. Krzywe $C = C(t)$ przejścia znacznika dla różnych wartości parametrów kinetyki sorpcji: nieodwracalnej k_1 oraz odwracalnej $k_2 = k_1$ i k_3

The breakthrough curves of the tracer $C = C(t)$ for various values of the sorption kinetics: irreversible k_1 and reversible $k_2 = k_1$ and k_3

term Henry’ego, Freundlicha i Langmuira na kształt krzywej $C = C(t)$. Na figurze 4 przedstawiono wpływ parametrów kinetyki sorpcji na krzywą przejścia.

Tendencja zmian krzywej przejścia pod wpływem wzrostu wartości poszczególnych parametrów zestawiono w tabeli 2. W ocenie zmienności kształtu krzywej $C = C(t)$ uwzględ-

niono amplitudę (a ściślej – jej maksymalną wartość), szerokość krzywej przejścia (liczoną od momentu pojawienia się niezerowej koncentracji znacznika do momentu ponownego osiągnięcia wartości zerowej) oraz początek krzywej przejścia (rozumiany jako moment, w którym pierwszy raz pojawia się niezerowa koncentracja znacznika).

Tabela 2

Tendencje zmian krzywej przejścia pod wpływem wzrostu wartości poszczególnych parametrów

Changes in the breakthrough curve caused by an increase in the values of the analyzed parameters

Ze wzrostem wartości parametru		Amplituda	Szerokość	Początek
Parametry filtracji				
Współczynnik filtracji	k	rośnie	maleje	wcześniej
Porowatość efektywna	n_e	maleje	rośnie	później
Parametry migracji				
Współczynnik dyfuzji molekularnej	D_M	maleje	rośnie	wcześniej
Stała dyspersji podłużnej	α	maleje	rośnie	wcześniej
Parametry sorpcji				
Izoterma Henry’ego	K_d	maleje	bez zmian	bez zmian
Izoterma Freundlicha	n_F	maleje	bez zmian	bez zmian
Izoterma Langmuira	α_L	maleje	rośnie	później
Izoterma Langmuira	β_L	maleje	rośnie	bez zmian
Parametry kinetyki sorpcji				
Sorpcja nieodwracalna	k_1	maleje	bez zmian	bez zmian
Sorpcja odwracalna	k_3	rośnie	maleje	bez zmian

PODSUMOWANIE

Analiza parametryczna krzywej $C = C(t)$ przejścia znacznika przez kolumnę filtracyjną wykazała, że na kształt krzywej przejścia największy wpływ ma wartość współczynnika filtracji badanego złoża, co pokazano na [figurze 1](#). Pozostałe parametry w znacznie mniejszym stopniu wpływają na kształt krzywej przejścia. Dla pokazania tej różnicy na [figurach 2, 3](#), oraz [4](#) obie skale wykresów $C = C(t)$ zmieniono w stosunku do skal na [figurze 1](#). Niewielka zależność krzywej przejścia od wartości parametrów migracji może utrudniać identyfikację wartości parametrów na podstawie wyników badań kolumnowych.

Analiza parametryczna powinna być elementem planowania eksperymentu kolumnowego. Po zasyceniu kolumny

filtracyjnej złożem i ustabilizowaniu parametrów filtracji można wyznaczyć doświadczalnie wartość współczynnika filtracji danego złoża. Przeprowadzenie analizy parametrycznej dla wyznaczonej doświadczalnie wartości współczynnika filtracji otwiera nowe możliwości planowania badań kolumnowych. Wyniki analizy parametryczną mogą ułatwić rozpoznanie procesów migracji zachodzących podczas danego eksperymentu.

Prezentowane w artykule wyniki uzyskano w ramach projektów badawczych finansowanych ze środków na naukę w latach 2009–2013 przez MNiSW 3630/B/T02/2009/37 oraz NCN DEC-2011/01/B/ST10/02063.

LITERATURA

- DAI Z., WOLFSBERG A., REIMUS P., DENG H., KWICKLIS E., DING M., WARE D., YE M., 2012 — Identification of sorption processes and parameters for radionuclide transport in fractured rock. *J. Hydrol.*, **414–415**: 516–526.
- KACZMAREK M., KAZIMIERSKA-DROBNY K., MARCINIAK M., OKOŃSKA M., 2008 — Identyfikacja parametrów hydrogeologicznych na podstawie modelowania krzywej przejścia w środowisku MATLAB. *Biul. Państw. Inst. Geol. Hydrogeologia*, **431**: 75–84.
- KLOTZ D., MALOSZEWSKI P., MOSER H., 1988 — Mathematical modeling of radioactive tracer migration in water flowing through saturated porous media. *Radiochim. Acta*, **44/45**: 373–379.
- MAŁECKI J.J., NAWALANY M., WITCZAK S., GRUSCZCZYŃSKI T., 2006 — Wyznaczanie parametrów migracji zanieczyszczeń w ośrodku porowatym dla potrzeb badań hydrogeologicznych i ochrony środowiska. Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, Warszawa.
- MARCINIAK M., KACZMAREK M., OKOŃSKA M., KAZIMIERSKA-DROBNY K., 2009 — Identyfikacja parametrów hydrogeologicznych z zastosowaniem numerycznej symulacji krzywej przejścia oraz metod optymalizacyjnych. Bogucki Wyd. Naukowe, Poznań.
- MARCINIAK M., OKOŃSKA M., 2006 — The identification of hydrogeological parameters on the basis of the column experiment modelling. *Hidrogeologia y aguas subterranas*, **21**: 421–427.
- OKOŃSKA M., MARCINIAK M., KACZMAREK M., KAZIMIERSKA-DROBNY K., 2009 — Identification of filtration and migration parameters in MATLAB calculation environment using numerical simulation of breakthrough curve and optimization method. *W: Water Resources Management V*, Brebbia C.A., Popov V. (ed.). *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, **125**: 471–482.
- VAN GENUCHTEN M.T., WAGENET R.J., 1989 — Two-Site/Two-Region Models for Pesticide Transport and Degradation: Theoretical Development and Analytical Solutions. *Soil Sci. Soc. America*, **53**: 1303–1310.
- WEBER W.JR., MCGINLEY P.M., KATZ L.E., 1991 — Sorption phenomena in subsurface systems: concepts, models and effects on contaminant fate and transport. *Wat. Res.*, **25**: 499–528.

SUMMARY

The sensitivity test for tracer breakthrough curve $C = C(t)$ showed that its shape strongly depends on the hydraulic conductivity of the analyzed sand sample. The influence of other parameters is considerably smaller. To illustrate this difference, both scales of graphs $C = C(t)$ were changed on [Figs. 2, 3](#), and [4](#), in accordance with the scales on [Fig. 1](#). The insignificant relation between the shape of the breakthrough curve and the value of migration parameters makes it difficult to identify the parameter values based on the results of column experiments.

The sensitivity test should be a part of column experiment planning. After filling the filtration column with a sample of sand and stabilizing the water flow, the hydraulic conductivity of the sample has to be assessed. The sensitivity test for the experimentally obtained value of hydraulic conductivity creates new possibilities of analyzing tracer migration processes during the experiment and identifying parameters.