

Numeryczna symulacja testu zbiornikowego i kolumnowego. Analiza wrażliwości modeli

Numerical simulation of the reservoir and column test. Sensitivity analysis of the models

Mariusz Kaczmarek, Katarzyna Kazimierska-Drobny

Uniwersytet Kazimierza Wielkiego, Instytut Mechaniki Środowiska
i Informatyki Stosowanej, ul. Chodkiewicza 30, 60-965 Bydgoszcz

Abstract: This paper presents results of simulations and sensitivity analysis of transport in porous materials studied in configurations corresponding to the two classical methods of identification of transport parameters: column and reservoir tests. The relative importance of change of values of input (constitutive) parameters for quantities that are measured in time for the two test is analysed. The results show that there are significant correlations between retardation factor and partition coefficient in the reservoir test and also between all transport parameters in column tests.

Key words: the reservoir and column test, sensitivity analysis

1. Wstęp

Na proces transportu masy w nasyconych geomateriałach wpływać może szereg mechanizmów, wśród których są: dyspersja mechaniczna, dyfuzja molekularna, adwekcja, procesy fizykochemiczne (biodegradacja, sorpcja), zjawiska chemo-elektro-osmotyczne, efekty kapilarne oraz chemokonsolidacja lub pęcznienie. Opis transportu powinien uwzględniać najważniejsze mechanizmy i np. dla substancji konserwatywnych może ograniczać się do uwzględnienia procesów adwekcji, dyfuzji oraz dyspersji mechanicznej (wynikającej z niejednorodności mikroskopowego pola prędkości). Opis podobnego procesu migracji w materiałach słabo przepuszczalnych, przy stosunkowo niewielkich gradientach hydraulicznych, można dalej zredukować do opisu samego procesu dyfuzji (Gillham, Cherry, 1982; Shackelford, 1991). W przypadku substancji niekonserwatywnej model matematyczny poszerza się o proces wymiany masy w wyniku np. sorpcji. Właściwe określenie roli poszczególnych czynników fizykochemicznych dla procesu transportu w konkretnym przypadku jest istotnym składnikiem identyfikacji modelu i odpowiednich parametrów.

Laboratoryjne metody wyznaczania podstawowych parametrów transportu w materiałach porowatych (takich jak współczynniki przepuszczalności, dyfuzji, dyspersji i sorpcji) dzieli się na metody stacjonarne oraz metody niestacjonarne (Shackelford, 1991). W przypadku drugiej grupy metod, rozważanych w niniejszej pracy, wyznaczenie parametrów transportu odbywa się na drodze dopasowania krzywej teoretycznej, otrzymanej z odpowiedniego modelu, do wyników eksperymentalnych. Jakkolwiek w niektórych przypadkach krzywe teoretyczne mogą być generowane na podstawie rozwiązań analitycznych, ze względu na ograniczoną dostępność tych rozwiązań obecnie zdecydowanie większe znaczenie mają rozwiązania uzyskane metodami numerycznymi. Są niezbędne zarówno dla samej estymacji parametrów, jak i na etapie projektowania eksperymentu, aby na podstawie analizy wrażliwości podejmować optymalne wybory rodzaju testu, wymuszenia, czasu (okna) obserwacji itd.

W pracy przedstawiono symulacje numeryczne oraz analizę wrażliwości modeli odpowiednich dla testu zbiornikowego i kolumnowego. Uwagę skupiono na analizie ewolucji koncentracji w zbiorniku (w teście zbiornikowym) oraz krzywych przejścia (w teście kolumnowym) i na ich podstawie przeprowadzono analizę wrażliwości modeli względem parametrów transportu. Do symulacji wykorzystano rozwiązania analityczne (dla testu zbiornikowego) oraz metodę elementów skończonych zaimplementowaną w środowisku programistycznym Matlab (dla testu kolumnowego). Zwrócono uwagę na korelacje współczynników wrażliwości niektórych parametrów, stanowiących potencjalne źródło niejednoznaczności rozwiązań zagadnień odwrotnych w procedurze identyfikacji.

2. Model matematyczny

Równanie adwekcyjno-dyversyjne jednokierunkowego nieustalonego transportu masy w nasyconych materiałach porowatych z uwzględnieniem równowagowej sorpcji ma postać (Gillham, Cherry, 1982):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{v}{R} \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{D_d}{R} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1)$$

gdzie c oznacza stężenie substancji dyfundującej w cieczy porowej, v jest średnią prędkością efektywną, D_d jest współczynnikiem dyspersji, równym sumie efektywnego współczynnika dyfuzji molekularnej D oraz współczynnika dyspersji mechanicznej D_m , określonym przez iloczyn dyspersyjności α ($\alpha = 1,75d$; d – średnica ziarna) oraz prędkości adwekcyjnej ($D_m = \alpha v$) (Rowe, 1987), tj. $D_d = D + \alpha v$. Parametr R definiowany jako współczynnik retardacji, opisuje średnie opóźnienie rozpuszczonej substancji transportowanej w wyniku sorpcji w stosunku do wody lub konserwatywnego znacznika, x oraz t określają współrzędną przestrzenną oraz czas.

W pracy rozważa się dwa zastosowania modelu (1) odpowiadające dwóm różnym testom parametrów transportu dla materiałów porowatych: A – testu zbiornikowego oraz B – testu kolumnowego, które schematycznie pokazano na rycinie 1.

Test zbiornikowy jest wykorzystywany w określaniu współczynników transportu dyfuzyjnego, zaś test kolumnowy jest podstawą badania współczynników transportu adwekcyjno-dyfuzyjnego w nieodeformowalnych materiałach porowatych. Wielkościami mierzonymi są: w teście zbiornikowym stężenie substancji w zbiorniku cieczy c_b , w teście kolumnowym koncentracja znacznika w odpływie c_e .

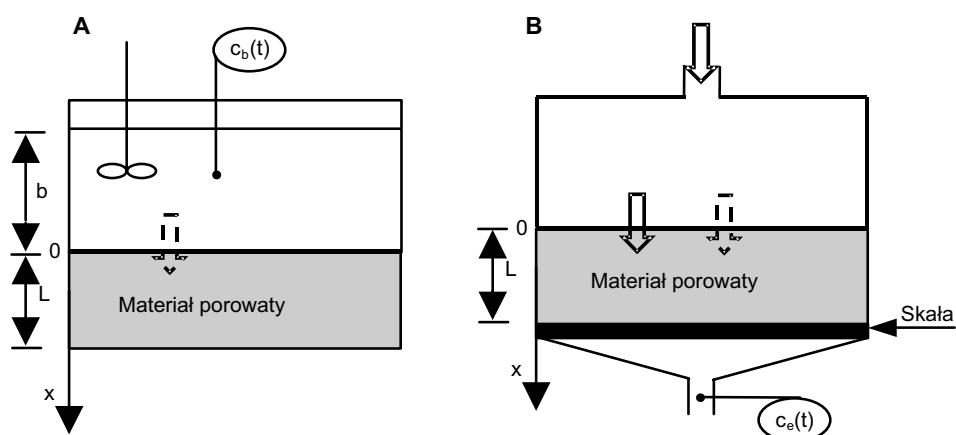
Rozwiązania równania (1) w konfiguracji odpowiadającej testowi zbiornikowemu uzyskano, przyjmując zerową wartość prędkości adwekcyjnej (w efekcie także współczynnika dyspersji mechanicznej) oraz uwzględniając warunki oddziaływań chemo-osmotycznych na granicy faz: materiał porowaty–ciecz, charakterystyczne dla materiałów o niskiej przepuszczalności. Założono, że skok koncentracji na granicy faz materiał porowaty–ciecz jest reprezentowany przez stały współczynnik podziału K (Crank, Park, 1968), przy czym koncentracja substancji w zbiorniku jest jednorodna poprzez ciągłe mieszanie cieczy. Zachodzą zatem relacje: $c(t,0) = K \cdot c_b$ oraz $b = \frac{\partial c_b}{\partial t}(t) = -D \cdot n \frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{x=0}$, gdzie b określa wysokość cieczy w zbiorniku, a n porowatość materiału. U dolnej podstawy próbka materiału jest izolowana, co oznacza brak transportu masy, tzn. $\frac{\partial c}{\partial x}(t,L) = 0$, gdzie L jest grubością próbki materiału porowatego. Warunki początkowe dla cieczy w materiale porowatym oraz w zbiorniku są następujące: $c(0, x) = c_0$ oraz $c_b(0, x) = c_{b0}$ i zakładają kolejno jednorodne i niezerowe stężenie substancji w wodzie porowej oraz w zbiorniku. Z uwagi na założenie równowagowej sorpcji $c_0 = \frac{1}{R} c_{tot}$, gdzie c_{tot} obejmuje początkową masę substancji w wodzie porowej oraz masę substancji zaadsorbowanej na wewnętrznej powierzchni materiału porowatego.

W przypadku testu kolumnowego numeryczne rozwiązanie równania (1) uzyskano przyjmując na górnym brzegu stałą niezerową wartość koncentracji $c(t,0) = c_0$, na dolnym brzegu gradient koncentracji równy zero $\frac{\partial c}{\partial x}(t,L) = 0$ oraz zerową wartość początkowego stężenia $c(0, x) = 0$. Warunek dla dolnego brzegu ($x = L$) oznacza ciągłość strumienia masy przy założeniu braku dyspersji w cieczy będącej w kontakcie z próbką.

W celu zbadania ilościowego wpływu parametrów transportu na wielkości w modelu, które odpowiadają wielkościom mierzonym w rozważanych testach, przeprowadzono analizę wrażliwości, wykorzystując dwie miary wrażliwości – logarytmiczny oraz znormalizowany współczynnik wrażliwości (Kabala, 2001):

$$\frac{P_i}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial P_i} = \frac{\partial \theta \setminus \theta}{\partial P_i \setminus P_i} = \frac{\partial \ln(\theta n)}{\partial \ln(P_i)} \quad \text{oraz} \quad P_i \frac{\partial \theta}{\partial P_i} = \frac{\partial \theta}{\partial P_i \setminus P_i} = \frac{\partial \theta}{\partial \ln(P_i)}$$

gdzie P jest wektorem parametrów wejściowych, a θ jest wielkością, której wrażliwość się bada. W niniejszej pracy wektor P stanowią dla testu zbiornikowego: współczynnik dyfuzji, retardacji oraz skoku koncentracji na granicy faz, natomiast dla testu kolumnowego: współczynnik dyfuzji, dyspersji, retardacji oraz dyspersyjności. Biorąc pod uwagę faktycznie kontrolowane wielkości w eksperymentach, wielkościami θ , których wrażliwość się bada, są w przypadku testu zbiornikowego koncentracja c_b substancji rozpuszczonej w zbiorniku, a w przypadku testu kolumnowego stężenie c_e substancji w odpływie, w obu przypadkach jako funkcje czasu.



Ryc. 1. Konfiguracje komory pomiarowej dla testu zbiornikowego (A) oraz kolumnowego (B)
Fig. 1. The schematic view of experimental configuration of chamber with sample for reservoir (A) and column (B) test

3. Symulacje i analiza wrażliwości modelu dla testu zbiornikowego

Rozwiązanie analityczne zagadnienia dyfuzji, pozwalające także opisać zmianę stężenia w zbiorniku uzyskano przekształcając wyżej sformułowany problem transportu w teście zbiornikowym do klasycznego problemu Sturm-Liouville'a (Kaczmarek, Kazimierska-Drobny, w druku). W rezultacie rozwiązanie dla koncentracji c_b ma postać:

$$c_b(t) = \frac{c_0 + \alpha K' c_{b0}}{Kn(1 + \alpha)} + \sum_n \frac{2a(Knc_{b0} - c_0)}{Kn(1 + \alpha + q_n^2 \alpha^2)} e^{-\gamma q_n^2 t}$$

gdzie q_n są pierwiastkami równania $\tan q_n = -\alpha q_n$, oraz $\alpha = \frac{a}{KnRL}$, $p_n = D \frac{q_n^2}{RL^2}$,
 $\gamma = \frac{D}{RL^2}$.

Na rycinie 2 przedstawiono przykładowe przebiegi ewolucji koncentracji substancji w zbiorniku, gdy dyfuzja następuje do (a) lub z (b) próbki materiału porowatego dla różnych wartości współczynnika dyfuzji $D = 1,5 \cdot 10^{-9}$, $1,5 \cdot 10^{-10}$ i $1,5 \cdot 10^{-11}$ m²/s przyjmując brak skoku koncentracji na granicy faz, tj. $K = 1$. Wartości pozostałych parametrów są następujące: grubość próbki $L = 0,01$ m, wysokość wody w zbiorniku $b = 0,04$ m, współczynnik retardacji $R = 1$, porowatość materiału $n = 0,8$. Początkowe wartości koncentracji podano w podpisie pod ryciną 2. Z wykresów tych wynika, że współczynnik dyfuzji określa czas, po którym następuje ustalenie wartości koncentracji, ale nie wpływa na jej poziom.

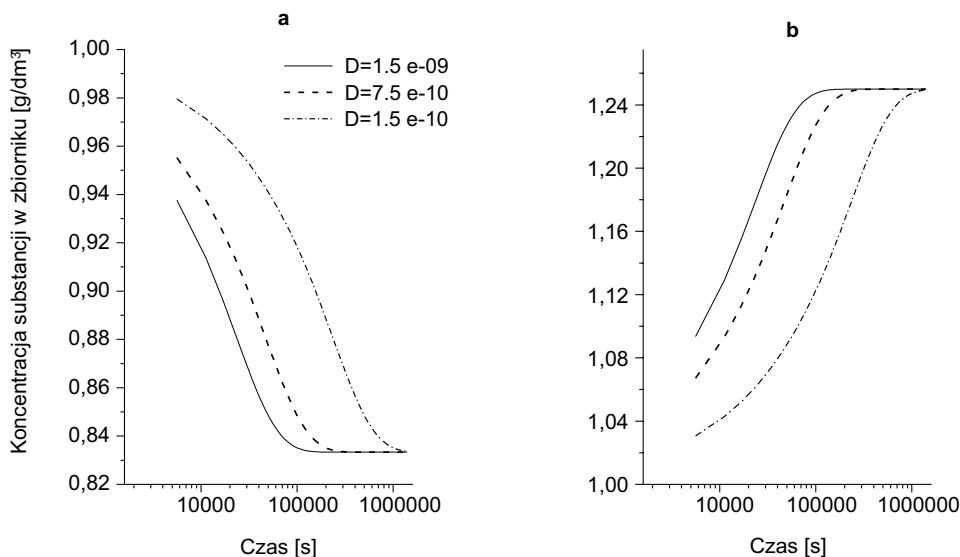
Na rycinie 3 przedstawiono symulację wpływu współczynnika retardacji na kształtowanie się profilu koncentracji w zbiorniku, zakładając różną wartość współczynnika R wynoszącą kolejno 1, 1,5 oraz 2.

Współczynnik dyfuzji przyjęto stały i równy $D = 1,5 \cdot 10^{-9}$ m²/s. Wyniki te pozwalają stwierdzić, że współczynnik retardacji wpływa zarówno na intensywność procesu dyfuzji, jak i na końcową wartość stężenia substancji rozpuszczonej w zbiorniku.

Wpływ współczynnika podziału, odpowiedzialnego za obecność skoku koncentracji na granicy faz, na koncentrację c_b przedstawiono na rycinie 4. Wartość współczynnika K przyjęto równe 1, 1,25, 1,9 zakładając wyższą koncentrację znacznika w zbiorniku niż w cieczy porowej.

Współczynnik skoku koncentracji podobnie jak współczynnik retardacji wpływa zarówno na intensywność procesu dyfuzji, jak i na końcową wartość stężenia.

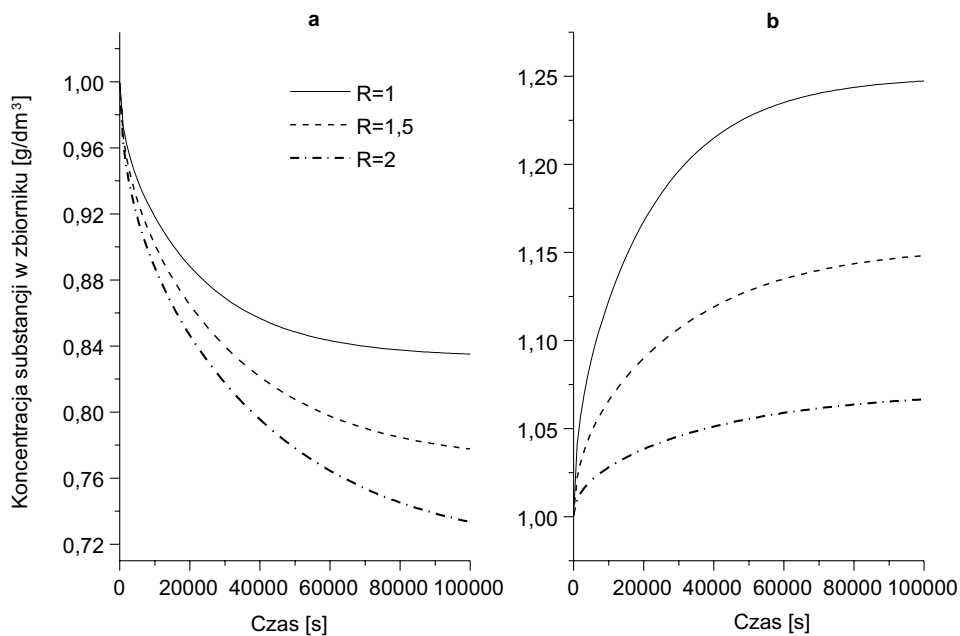
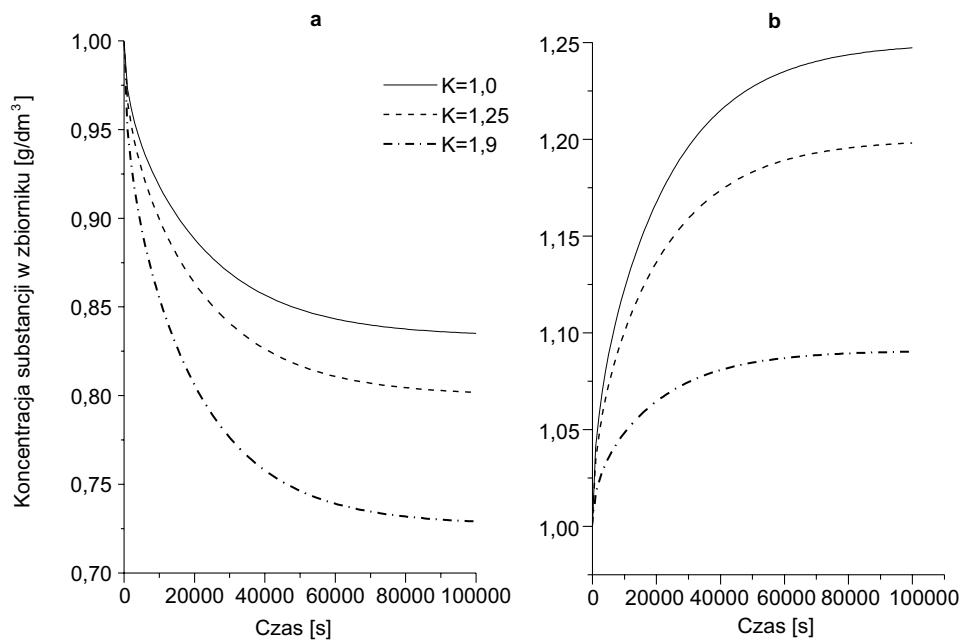
Na rycinie 5 przedstawiono wykresy logarymicznej wrażliwości koncentracji c_b ze względu na D , K i R , przyjmując $D = 1,5 \cdot 10^{-9}$ m²/s, $K = 1,25$ oraz $R = 1$, zaś

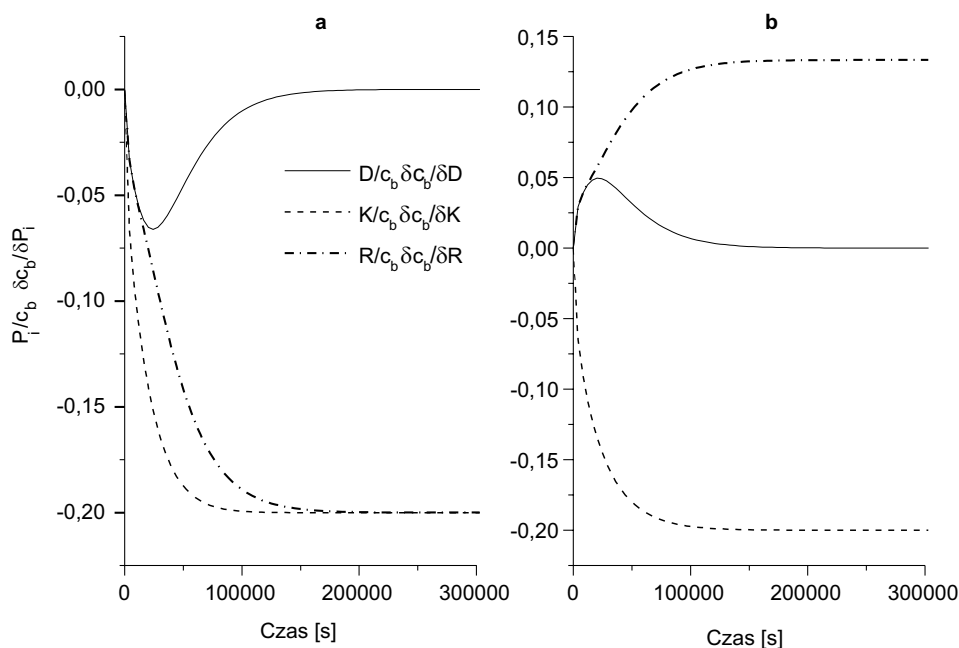


Ryc. 2. Ewolucja koncentracji znacznika w zbiorniku dla różnych wartości D

a) $c_{b0} = 1$, $c_0 = 0$ g/dm³; b) $c_{b0} = 1$, $c_0 = 2$ g/dm³

Fig. 2. The evolution of concentration of effluent with respect to different values of D

Ryc. 3. Ewolucja koncentracji znacznika w zbiorniku dla różnych wartości R Fig. 3. The evolution of concentration of effluent with respect to different values of R Ryc. 4. Ewolucja koncentracji znacznika w zbiorniku dla różnych wartości K Fig. 4. The evolution of concentration of effluent with respect to different values of K



Ryc. 5. Analiza wrażliwości koncentracji substancji w zbiorniku w odniesieniu do D , K , R
 Fig. 5. Sensitivity analysis of solute concentration with respect to parameters D , K , R

wartości pozostałych parametrów wybrano jak w przykładach prezentowanych na rycinach 2–4. Analizując przebieg współczynników wrażliwości można zauważyć, że bezwzględne wartości wrażliwości stężenia ze względu na K oraz R wzrastają ze wzrostem czasu trwania procesu oraz osiągają wartości ekstremalne dla długich okresów. Z kolei wrażliwość ze względu na D po okresowym wzroście (w sensie wartości bezwzględnej) dąży do zera. Znak wrażliwości ze względu na K i D zależy od kierunku procesu dyfuzji.

Z powyższych przebiegów wynika także, że współczynniki K i R są skorelowane i wzrost (spadek) wartości jednego z parametrów powoduje spadek (wzrost) drugiego. Oznacza to podwyższone prawdopodobieństwo popełnienia błędu w procedurze identyfikacji opartej na metodach optymalizacyjnych. Przedziały czasu, w których wartości współczynników wrażliwości są istotnie różne od zera, w szczególności w tym przypadku ze względu na D , wyznaczają optymalne zbiory danych eksperymentalnych dla metody identyfikacji opartej na teście zbiornikowym.

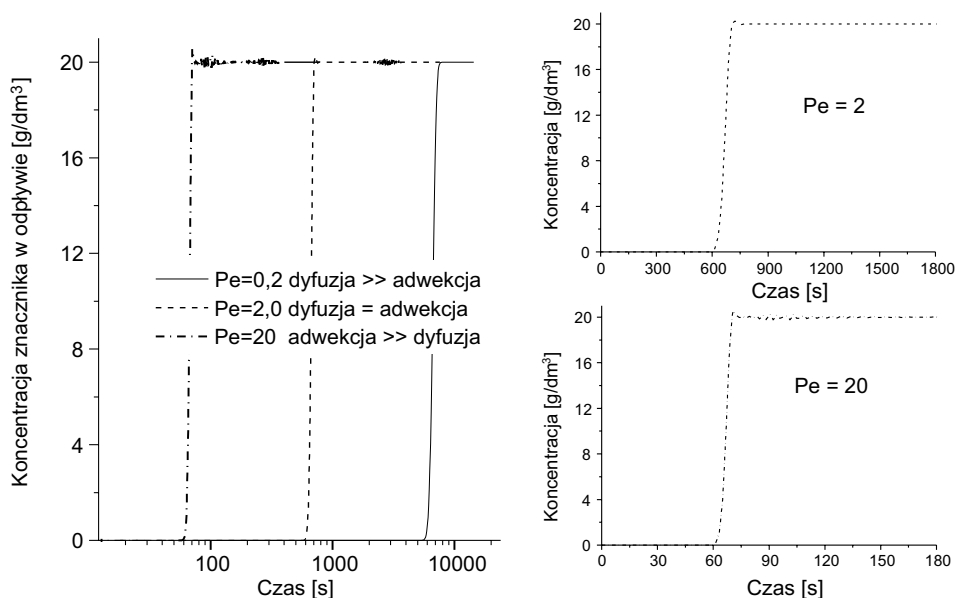
4. Symulacja i analiza wrażliwości modelu dla testu kolumnowego

Rozwiązanie pełnego równania transportu (1) dającego w rezultacie także postać krzywej przejścia opisującą ewolucję stężenia substancji po przejściu przez próbkę

materiału porowatego w teście kolumnowym uzyskano w oparciu o metodę elementów skończonych zaimplementowaną w środowisku Matlab z wykorzystaniem funkcji pdepe. Rozważano trzy przypadki: 1) dominującej dyfuzji, 2) równoważnej roli dyfuzji i adwekcji, 3) dominującej adwekcji (dyspersji mechanicznej). Jako kryterium podziału przyjęto bezwymiarową liczbę Peclet, $Pe = \frac{v \cdot d}{D}$, gdzie d oznacza charakterystyczny wymiar mikrostruktury, najczęściej średnią średnicę ziarna, D jest efektywnym współczynnikiem dyfuzji, a prędkość adwekcyjnego przepływu v może być określona jako: $v = k \frac{p_1 - p_2}{g_1 \cdot n \cdot L}$, gdzie p_1 i p_2 są ciśnieniami po dwóch stronach próbki, g_1 oznacza ciężar właściwy cieczy, a L jest wysokością próbki. Jako charakterystyczne dla poszczególnych trzech zakresów transportu przyjęto Pe równe 0,2, 2 i 20 (Gillham, Cherry, 1982).

Na rycinie 6 porównano krzywe przejścia dla przyjętych wartości liczby Peclet. Wartości pozostałych parametrów przyjętych do symulacji są następujące: grubość próbki $L = 0,1$ m, efektywny współczynnik dyfuzji $D = 1,5 \cdot 10^{-9}$ m²/s, współczynnik retardacji $R = 1$, $n = 0,5$; średnica ziaren $d = 2 \cdot 10^{-5}$ m, przewodność hydrauliczna $k = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s, ciężar właściwy cieczy $g_1 = 10000$ kg/m² s², stężenie znacznika na górnym brzegu $c_0 = 20$ oraz ciśnienia na górnym brzegu p_1 kolejno 750, 7500 i 75000 Pa zaś na dolnym brzegu $p_2 = 0$ Pa.

Z wykresów wynika, iż dla przyjętych parametrów pojawienie się znacznika w cieczy następuje w przybliżeniu odwrotnie proporcjonalnie do liczby Peclet, tj. po



Ryc. 6. Ewolucja krzywej przejścia dla różnych liczb Peclet

Fig. 6. The evolution of breakthrough curve for different Peclet number

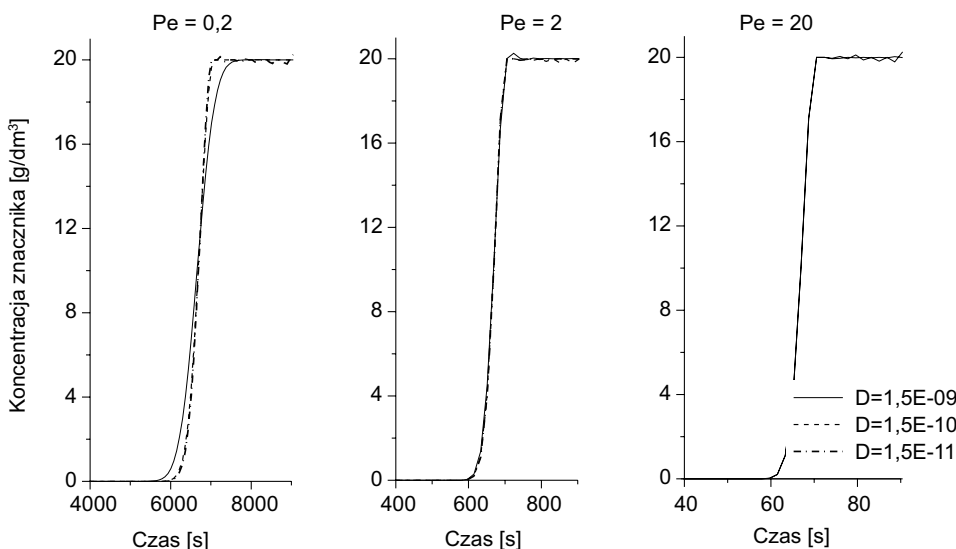
6000, 600 i 60 s, natomiast pełne ustalenie się stężenia w odpływającej cieczy następuje odpowiednio po upływie około 7200, 700 i 70 s.

Rycina 7 przedstawia wpływ współczynnika dyfuzji na kształt krzywej przejścia dla analizowanych zakresów transportu, przyjmując następujące wartości współczynnika dyfuzji: $D = 1,5 \cdot 10^{-9}$, $1,5 \cdot 10^{-10}$, $1,5 \cdot 10^{-11}$ m²/s. Zgodnie z oczekiwaniem jedynie widoczny wpływ zmiany wartości współczynnika dyfuzji obserwuje się dla najniższej wartości liczby Pe .

Rycina 8 przedstawia symulację wpływu współczynnika retardacji na kształt krzywej przejścia dla rozważanych wartości liczby Pe . Zmiana wartości R , kolejno z 1 na 1,5 i 2 powoduje równoległe przesunięcie krzywej przejścia, tj. opóźnienie w przebiegu krzywej stężenia.

Rycina 9 ilustruje rolę, jaką dla przebiegu transportu ma parametr dyspersyjności α , którego wartość zależy od średniej średnicy ziaren badanego materiału (Gillham, Cherry, 1982; Gooseff i in., 2005). W symulacji przyjęto następujące wartości parametrów α : $3,5 \cdot 10^{-6}$, $3,5 \cdot 10^{-5}$, $3,5 \cdot 10^{-4}$ m. Z symulacji wynika, że parametr dyspersyjności ma podobny wpływ na kształt krzywej przejścia jak współczynnik dyfuzji, przy czym jego znaczenie jest wyraźne dla wszystkich trzech zakresów transportu masy.

Na rycinach 10 i 11 przedstawiono wykresy znormalizowanych współczynników wrażliwości koncentracji cieczy opuszczającej próbkę c_v , w teście kolumnowym, ze względu na R , D , D_d oraz α . Obliczenia wykonano, stosując różnicową aproksymację pochodnych w otoczeniu następujących wartości parametrów transportu: $D = 1,5 \cdot 10^{-9}$ m²/s, a $R = 1$, $D_d = 2,0 \cdot 10^{-9}$. Wartości pozostałych wielkości niezbędnych w obliczeniach przyjęto jak w przykładach powyżej. Badanie wrażliwości przeprowadzono dla różnych, analizowanych wcześniej zakresów transportu



Ryc. 7. Ewolucja krzywej przejścia dla różnych wartości D
 Fig. 7. The evolution of breakthrough curve for different D

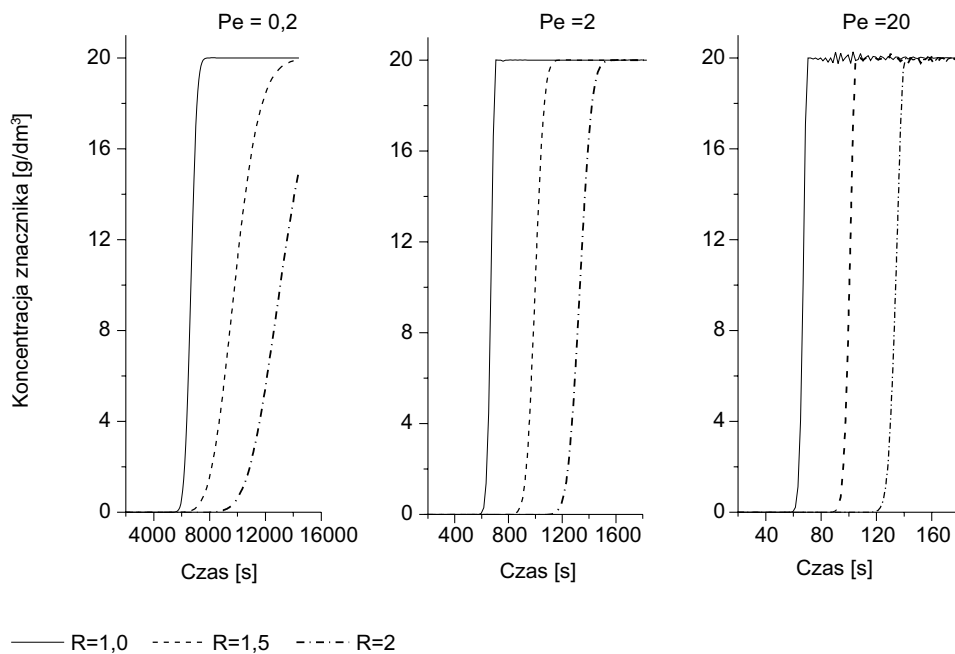


Fig. 8. Ewolucja krzywej przejścia dla różnych wartości R
 Ryc. 8. The evolution of breakthrough curve for different R

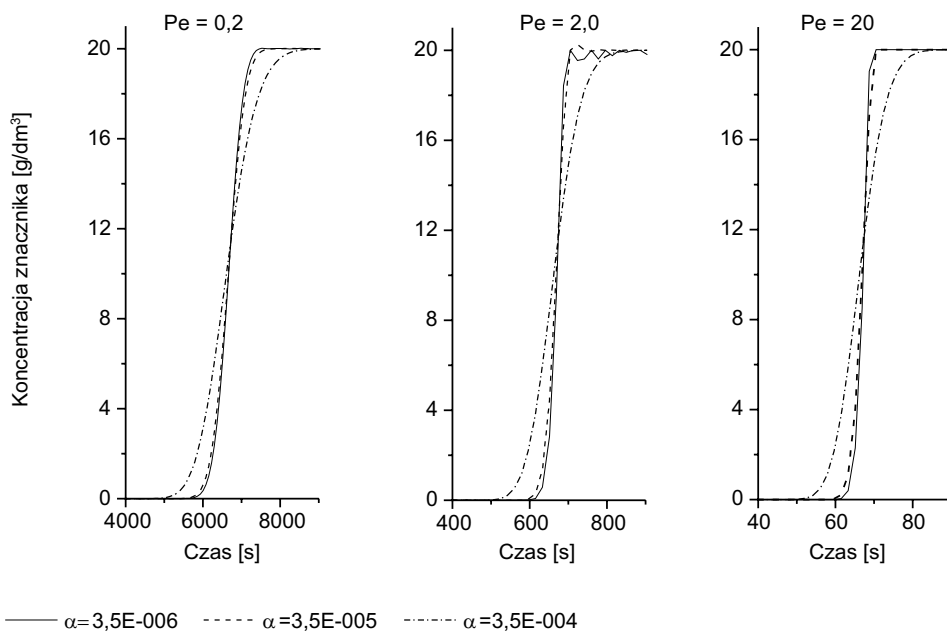
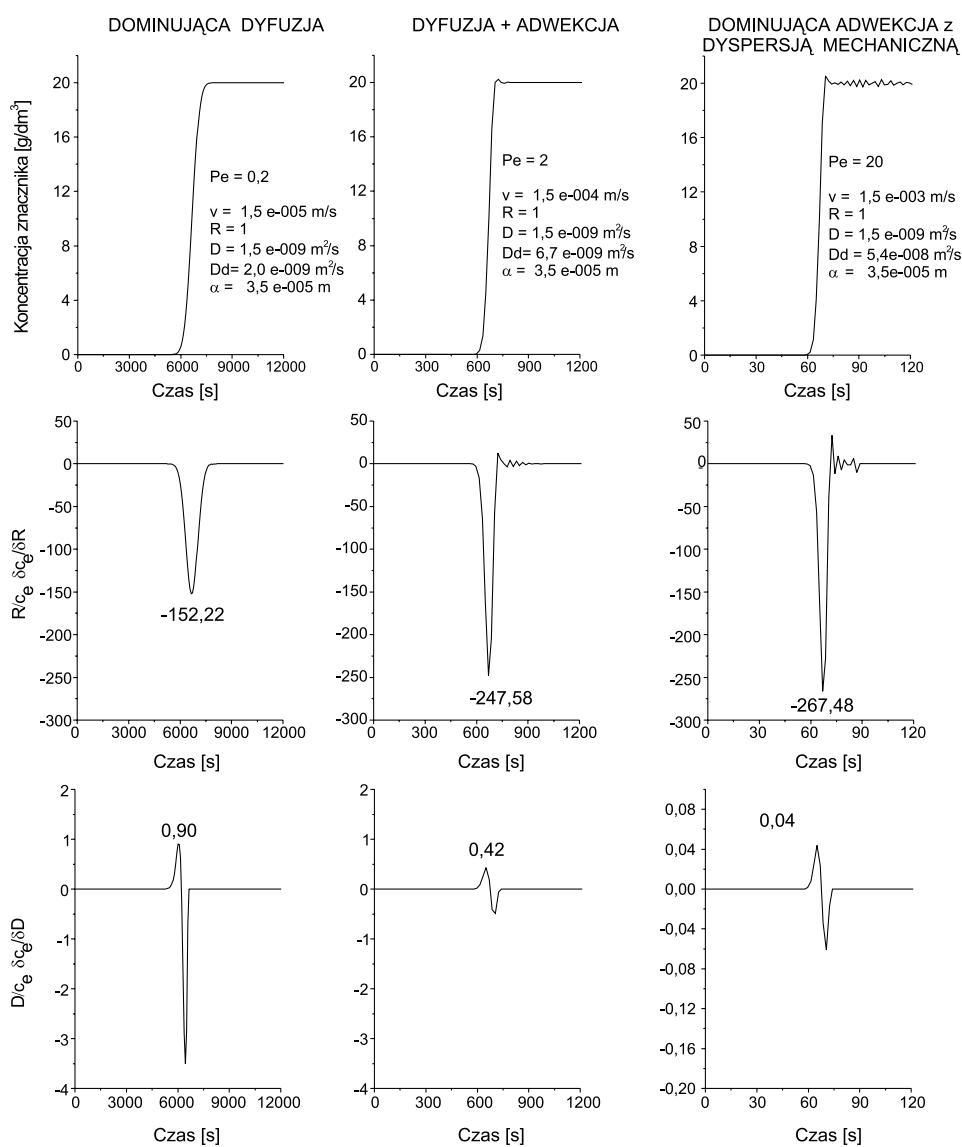


Fig. 9. Ewolucja krzywej przejścia dla różnych wartości α
 Fig. 9. The evolution of breakthrough curve for different α

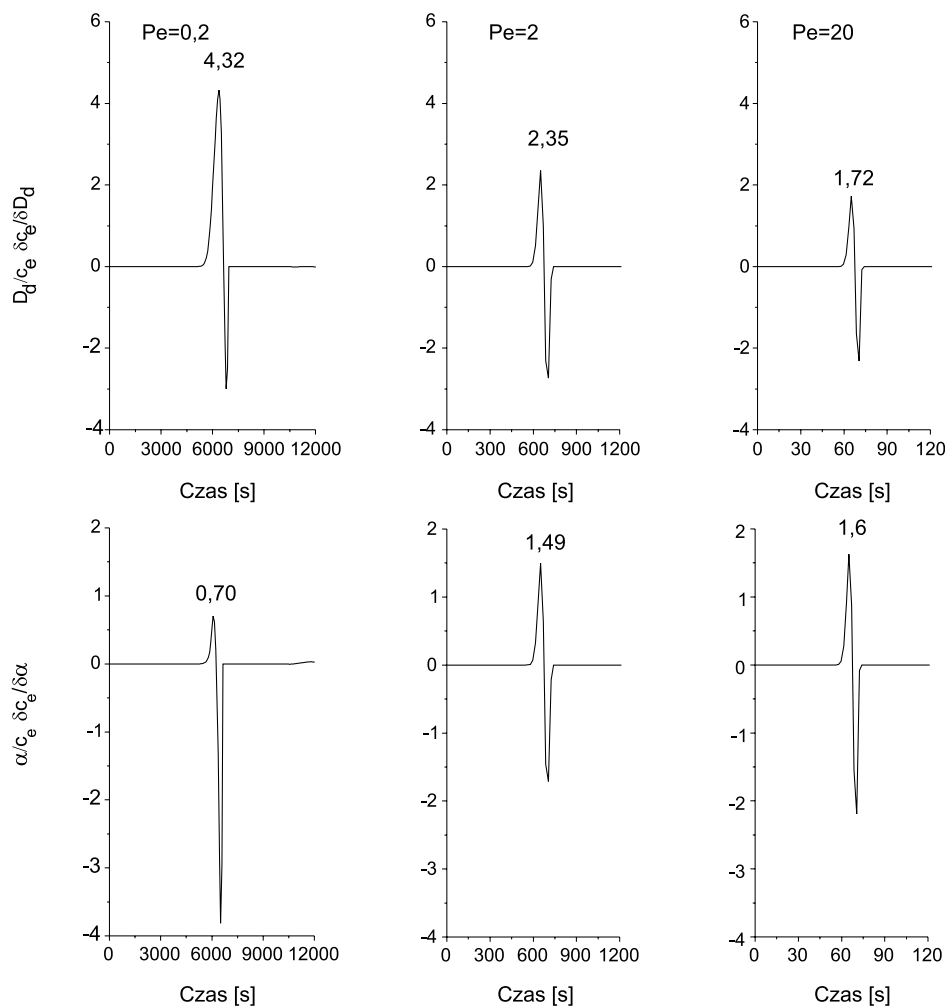
(wartości liczby Pe). Do porównywania wyników przyjęto głównie, podobnie jak w pracy Gooseff i in. (2005) oraz Sun i in. (2001), wartości pierwszego ekstremum, jakie osiąga krzywa wrażliwości w odniesieniu do rozważanych współczynników modelu.



Ryc. 10. Znormalizowane współczynniki wrażliwości koncentracji substancji wpływającej z próbki w teście kolumnowym ze względu na R i D

Fig. 10. Normalized sensitivity analysis of breakthrough curve with respect to R and D

Analizując przebieg współczynników wrażliwości, obserwuje się, że wszystkie nietrywialne wartości tych wielkości odnotowywane są w zakresie „przełamania” krzywej stężenia. Koncentrując uwagę na roli prędkości przepływu i związanej z nią liczby Pe , można zauważyć, że jej wzrost powoduje istotny wzrost wrażliwości ze względu na współczynnik retardacji. Oznacza to, że chwilowa rola sorpcji na przebiegu procesu transportu masy rośnie ze wzrostem prędkości przepływu. Przeciwnie zmiany obserwuje się w przypadku współczynnika dyfuzji, dla którego wartość odpowiedniego współczynnika wrażliwości spada ze wzrostem prędkości. Podobne zachowanie odnotowuje się dla współczynnika dyspersji, przy czym zmiany wrażliwości są niewielkie w stosunku do zmian dla wrażliwości ze względu na współczynnik dyfuzji. Pierwsze ekstremum wrażliwości ze względu na dyspersyj-



Ryc. 11. Znormalizowane współczynniki wrażliwości koncentracji ze względu na D_d i α
 Fig. 11. Normalized sensitivity analysis of breakthrough curve with respect to D_d and α

ność rośnie ze wzrostem prędkości, jednakże wyraźnie inaczej zachowuje się drugie ekstremum. Analizując czas osiągnięcia ekstremum przez poszczególne krzywe wrażliwości, można zauważyć, że początkowo obserwuje się wzrost wrażliwości ze względu na parametry odpowiedzialne za transport substancji, tj. współczynnik dyfuzji, dyspersji i dyspersyjności, a następnie po około 660 s (dla $Pe = 0,2$), 18 s (dla $Pe = 2$) i 2 s (dla $Pe = 20$) następuje ekstremum dla współczynnika charakteryzującego proces sorpcyjny.

Z powyższych przebiegów współczynników wrażliwości wynika, że ze względu na subtelne różnice w roli, jaką odgrywają badane współczynniki w procesie transportu, dla procedury identyfikacji ważna jest możliwie gęsta i pełna akwizycja danych z całego okresu zmian koncentracji. Ponadto należy zwrócić uwagę na skorelowanie współczynników (w szczególności odpowiedzialnych za transport) istotne bez względu na wielkość prędkości przypiływu, co podobnie jak dla testu zbiornikowego oznacza podwyższone prawdopodobieństwo popełnienia błędu w procedurze identyfikacji.

5. Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono symulacje procesów transportu dyfuzyjno-adwekcyjnego w materiałach porowatych oraz analizę wrażliwości modeli w odniesieniu do dwóch układów eksperymentalnych: testu zbiornikowego oraz kolumnowego. Zbadano ilościowy wpływ parametrów transportu na wielkości, które są kontrolowane podczas eksperymentów. Z przeprowadzonych symulacji wynikają indywidualne charakterystyki wrażliwości procesów transportu w analizowanych testach, objawiające się zróżnicowanym wpływem parametrów modeli na wartość stężenia w poszczególnych przedziałach czasu trwania testów. Wyraźne jest w szczególności przesunięcie w czasie roli współczynników odpowiadających za transport oraz za sorpcję (współczynnik retardacji). Ponadto należy zwrócić uwagę na korelacje współczynników R i K w teście zbiornikowym oraz parametrów D , D_a oraz α w teście kolumnowym.

Literatura

- Crank J., Park G., 1968. Diffusion in polymers. Academic Press, London, New York.
- Gillham R.M., Cherry J.A., 1982. Contaminant migration in saturated unconsolidated geologic desposits. Geological Society of America. Spacial Paper 189: 31–62.
- Gooseff M.N., Bencala K.E., Scott D.T., Runkel R.L., McKnight D.M., 2005. Sensitivity analysis of conservative and reactive stream transient storage models applied to field data from multiple-reach experiments. *Advances in Water Resources* 28: 479–492.
- Kabala Z.J., 2001. Sensitivity analysis of a pumping test on a well with wellbore storage and skin. *Advances in Water Resources* 24: 483–504.
- Kaczmarek M., Kazimierska-Drobny K. Identification problem for diffusive transport in porous materials based on single reservoir test. I. Analytical equilibrium models and sensitivity analysis. Praca przygotowana do druku.

- Rowe R.K., 1987. Pollutant transport through barriers. Proceedings of Geotechnical Practice for Waste Disposal.
- Shackelford C.D., 1991. Laboratory diffusion testing for waste disposal – A review. Journal of Contaminant Hydrogeology 7: 177–217.
- Sun N., Sun Ne-Z., Elimelech M., Ryan J.N., 2001. Sensitivity analysis and parameter identifiability for colloid transport in geotechnically heterogeneous porous media. Water Resources Reserch 37(2): 209–222.