

LABORATORYJNA METODA IDENTYFIKACJI PODWÓJNEJ PRZEPUSZCZALNOŚCI HYDRAULICZNEJ NA PODSTAWIE TESTU PARAMEX

LABORATORY METHOD FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF A DUAL PERMEABILITY GEOLOGICAL FORMATION BASED ON A PARAMEX TEST

FILIP WOLNY¹, MARIUSZ KACZMAREK², MAREK MARCINIAK¹

Abstrakt. Podczas badań terenowych, w trakcie wykonywania testu PARAMEX, odnotowano przypadki odstępstwa krzywych ruchu zwierciadła wody od wykładniczego charakteru. Zaobserwowany przypadek ruchu zwierciadła wody określono jako dwuwykładniczy i postawiono hipotezę, że za dwuwykładniczy charakter ruchu zwierciadła wody może odpowiadać podwójna przepuszczalność hydrauliczna zafiltrowanych utworów. W referacie przeanalizowano możliwości identyfikacji parametrów podwójnej przepuszczalności hydraulicznej utworów wodonośnych na podstawie testu PARAMEX.

Zaprojektowano i uruchomiono model laboratoryjny, składający się z trzech pionowych kolumn połączonych poziomą rurą. Model ten, ze względu na kształt i układ połączeń kolumn, nazwano W-rurką. Po zamknięciu jednego z zaworów odcinających, kolumna zewnętrzna i środkowa tworzyły U-rurkę, w której można było oznaczyć współczynnik filtracji jednej próbki gruntu metodą stałogradientową. Opracowano model matematyczny ruchu zwierciadła wody do laboratoryjnej symulacji testu PARAMEX. Model wyprowadzono z równań zachowania masy i rozwiązano metodami optymalizacyjnymi w środowisku obliczeniowym MATLAB. Wykorzystując model matematyczny rozwiązano zagadnienie odwrotne, poprzez wyznaczenie obu wartości współczynników filtracji na podstawie zarejestrowanej doświadczalnie dwuwykładniczej krzywej ruchu zwierciadła wody w kolumnie środkowej. Uzyskane wartości współczynników filtracji porównano ze współczynnikami uzyskanymi metodą stałogradientową. Przeprowadzone eksperymenty i obliczenia pozwoliły pozytywnie ocenić przydatność modelu matematycznego do identyfikacji parametrów podwójnej przepuszczalności hydraulicznej na podstawie testu PARAMEX.

Słowa kluczowe: podwójna porowatość, podwójna przepuszczalność hydrauliczna, identyfikacja parametrów, metoda PARAMEX, metody optymalizacyjne.

Abstract. During some PARAMEX field tests an unusual rate-of-rise curve was observed. This curve clearly differed from the exponential curve normally registered during such tests. The atypical curve indicates a faster than usual water level rise during the first stage of the test and a slower rise during the last stage. This type of rise is bi-exponential. Based on the documentation of the analysed piezometers, it should be assumed that this type of water level movement is caused by the dual-permeability of the geological formations surrounding the screened zone. In this paper, the possibility to identify the parameters of such formations using a PARAMEX test is analysed.

A model capable of simulating PARAMEX tests in a dual-permeability formation was constructed. Because of the model's shape, the conducted tests were called "W-tube" tests. Water valves at the bottom of the outward columns allowed cutting water flow and therefore registering "U-tube" tests. During these tests, the hydraulic conductivity of a single groundwater formation sample was determined using constant head permeability measurements. A mathematical model of water flow during the laboratory simulation of the PARAMEX test was created. This model allowed interpreting the results laboratory tests: a pair of hydraulic conductivity values was calculated based on the exper-

¹ Uniwersytet im. A. Mickiewicza w Poznaniu, Instytut Geografii Fizycznej i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego, ul. Dziegielowa 27, 61-680 Poznań; e-mail: filip.wolny@amu.edu.pl, mmarc@amu.edu.pl

² Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Instytut Mechaniki Środowiska i Informatyki Stosowanej, ul. Kopernika 1, 85-074 Bydgoszcz; e-mail: mkk@ukw.edu.pl

imentally registered bi-exponential curve. The obtained values of hydraulic conductivity were compared to the values determined during the constant head permeability tests. The mathematical model proved to be adequate for identifying the parameters of dual-permeability based on a PARAMEX test.

Key words: dual porosity, dual permeability, PARAMEX, determining hydrogeological parameters, optimization methods.

WSTĘP

Podczas konferencji naukowej „Modelowanie Przepływu Wód Podziemnych 4” w Gdańsku przedstawiono referat pt.: „Model fizyczny i matematyczny ośrodka wodonośnego o podwójnej przepuszczalności” (Marciniak, i in., 2010).

W niniejszym referacie zaprezentowano rozwiązanie „zagadnienia odwrotnego” dla modelu laboratoryjnego testu PARAMEX, które polega na wyznaczeniu wartości współczynników filtracji na podstawie zarejestrowanej eksperymentalnie krzywej wzniosu zwierciadła wody w kolumnie pomiarowej do położenia początkowego. Ponownie zamieszczono model matematyczny testu PARAMEX dla utworów o podwójnej przepuszczalności, uwzględniając uzupełnienia i korekty wynikające z dyskusji na poprzedniej konferencji.

Testy PARAMEX wykonano dotychczas w około 1300 piezometrach zlokalizowanych w różnych rejonach Polski. W zdecydowanej większości przypadków zaobserwowano ruch o charakterze aperiodycznym, przy którym krzywą wzniosu lub opadania zwierciadła można opisać za pomocą funkcji wykładniczej (Marciniak, 1999):

$$s(t) = s_0[1 - \exp(\lambda t)] \quad [1]$$

gdzie:

$s(t)$ – depresja zwierciadła wody w piezometrze w funkcji czasu, [cm];

s_0 – depresja początkowa, [cm];

λ – wykładnik potęgowy zależny od współczynnika filtracji, [1/s].

W zdecydowanej większości przypadków krzywą wykładniczą wystarczająco dokładnie przybliży wykres zarejestrowany doświadczalnie w piezometrze. Jednak w trakcie kilkunastu procent eksperymentów zarejestrowano krzywą dwuwykładniczą, której nie udaje się aproksymować za pomocą równania [1] z wystarczającą dokładnością. Na [figu-](#)

[rze 1](#) pokazano zarejestrowaną doświadczalnie krzywą dwuwykładniczą oraz cztery sąsiadujące krzywe wykładnicze. Żaden z przyjętych wykładników potęgowych nie dopasowuje wystarczająco dokładnie krzywej teoretycznej do krzywej doświadczalnej. Na podstawie opisu geologicznego strefy zafiltrowanej analizowanych piezometrów postawiono hipotezę, że dwuwykładniczy ruch wody jest efektem podwójnej przepuszczalności hydraulicznej utworów o podwójnej porowatości.

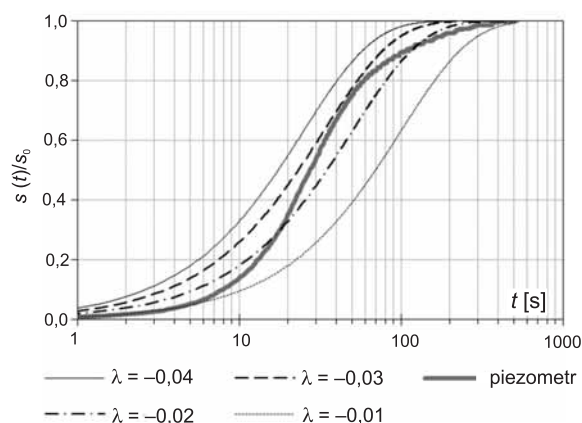


Fig. 1. Próby dopasowania krzywej wykładniczej do doświadczalnie zarejestrowanego dwuwykładniczego ruchu zwierciadła wody w piezometrze KT-177 na terenie Kopalni Węgla Brunatnego „Bełchatów” (depresja względna $[s(t)/s_0]$, logarytmiczna skala czasu)

Attempts to adjust the exponential curve to the experimentally registered bi-exponential water level rise in piezometer KT-177 located in the Bełchatów lignite mine (relative depression $[s(t)/s_0]$, logarithmic timescale)

MODEL TESTU PARAMEX DLA UTWORÓW O PODWÓJNEJ PRZEPUSZCZALNOŚCI

W warunkach laboratoryjnych zaprojektowano i uruchomiono model fizyczny symulujący test PARAMEX (Marciniak, 1999, 2002; Marciniak i in., 2010) wykonywany dla utworów wodonośnych cechujących się podwójną przepu-

szczalnością hydrauliczną. Model ten składał się z trzech pionowych kolumn połączonych poziomą rurą ([fig. 2](#)). W dolnej części obu kolumn zewnętrznych umieszczono zawory odcinające dopływ wody oraz próbniki z gruntami

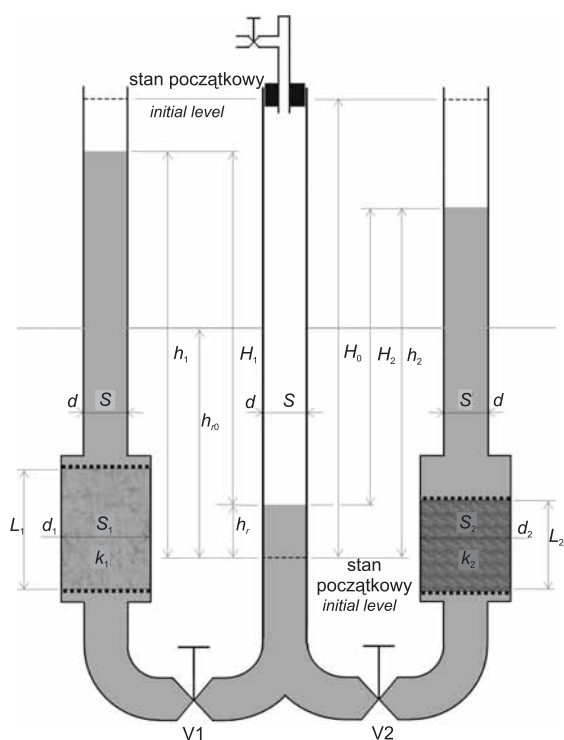


Fig. 2. Schemat ideowy stanowiska symulującego testy PARAMEX

Illustration of the apparatus used to simulate PARAMEX tests

o różnych wartościach współczynników filtracji. W kolumnie środkowej zamontowano sondę pomiarową, która rejestrowała ruch wody w tej kolumnie. Po uszczelnieniu wylotu kolumny środkowej za pomocą sprężonego powietrza obniżano w niej poziom wody, co skutkowało podniesieniem poziomu wody w kolumnach zewnętrznych. Po rozszczelnieniu kolumny środkowej następował swobodny wznios zwierciadła wody w tempie zależnym od parametrów filtracyjnych dwóch próbek gruntów umieszczonych w kolumnach zewnętrznych. W ten sposób zrealizowano model fizyczny testu PARAMEX dla utworów wodonośnych o podwójnej przepuszczalności hydraulicznej. Model ten, ze względu na kształt i układ połączeń kolumn, nazwano W-rurką. Po zamknięciu jednego z zaworów odcinających V1 lub V2 (fig. 2), kolumna zewnętrzna i środkowa tworzyły natomiast U-rurkę. W takiej konfiguracji wykonywano analizy dla pojedynczych próbek gruntu, a więc realizowano model fizyczny testu PARAMEX dla utworów charakteryzujących się zwykłą, tj. „pojedynczą” przepuszczalnością hydrauliczną. Po wprowadzeniu niewielkich modyfikacji można było w tym układzie oznaczać metodą stałogradientową współczynnik filtracji gruntu znajdującego się w próbniku. Kolejne etapy realizacji testu PARAMEX na modelu laboratoryjnym pokazano na figurze 3. Sformułowano także odpowiednie modele matematyczne dla przypadków: trójkolumnowego (W-rurki) i dwukolumnowego (U-rurki). Model dla W-rurki został przedstawiony przez Marciniaka i in. (2010), po wprowadzeniu licznych poprawek przedstawiono go w nowej wersji w niniejszym artykule.

W celu sformułowania modelu matematycznego ruchu wody w układzie W-rurki, pokazanym na figurze 2, kiedy oba zawory pozostają otwarte, sporządzono równania bilansu sił dla wody w porowatych próbkach piasku. Przyjęto,

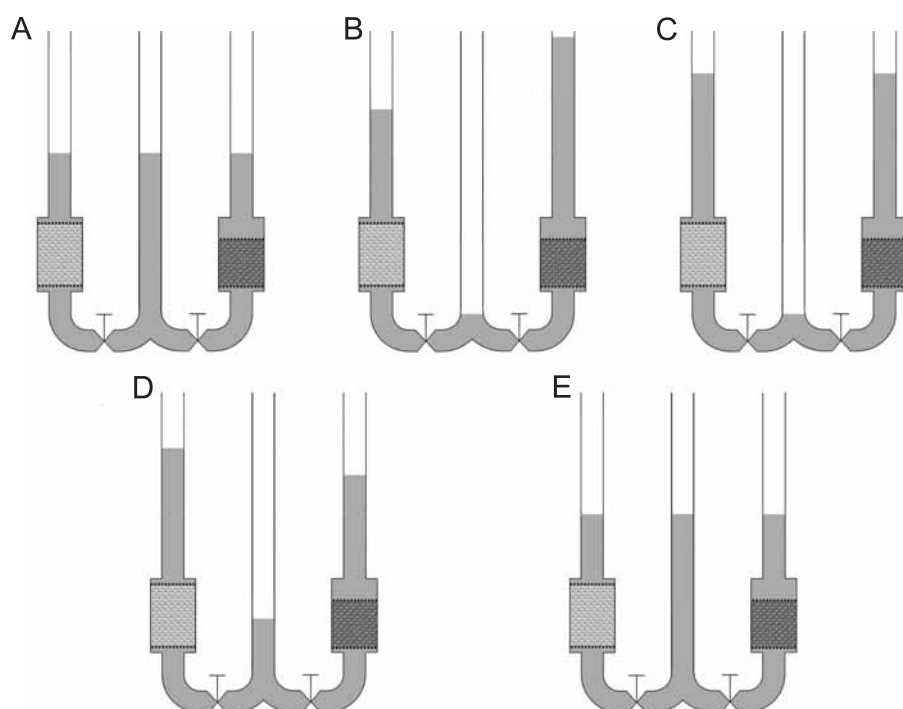


Fig. 3. Etapy przebiegu testów PARAMEX w układzie W-rurki

A – stan początkowy, B – wykonanie sprężania powietrza w kolumnie środkowej, C – wyrównanie poziomów wody w kolumnach skrajnych ze stabilizacją, D – powrót poziomów wody w układzie do stanu początkowego, E – koniec eksperymentu

Stages of a PARAMEX test combined in a W-tube configuration

A – initial state, B – air compression in the central column, C – stabilization of water levels in the outer columns at the same height, D – the return of water levels to the initial state, E – end of test

że wewnętrzne przekroje poprzeczne wszystkich kolumn są identyczne i wynoszą S , badane próbki piasków mają przekroje poprzeczne S_1 i S_2 , współczynniki filtracji k_1 i k_2 oraz wysokości L_1 i L_2 , Początkowo w środkowej kolumnie poziom wody jest niższy niż w kolumnach zewnętrznych i stanowi poziom odniesienia dla pomiaru chwilowych wysokości w kolumnach zewnętrznych, które wynoszą h_1 , h_2 oraz chwilowej wysokości w kolumnie środkowej wynoszącej h_r . W modelu pominięto wszystkie siły bezwładnościowe, zarówno dla wody w kolumnach, jak i w próbkach, a siły oporu są aproksymowane liniową zależnością od prędkości przepływu, zakładając przepływ zgodny z prawem Darcy'ego. Biorąc pod uwagę różnice sił pochodzących od ciśnienia hydrostatycznego na końcach próbek, powodowane ciśnieniem słupów cieczy w kolumnach, siły grawitacji działające na ciecz w próbkach oraz siły oporu przepływu przez próbki (oddziaływania ze szkieletem), można napisać następujący bilans sił dla wody w próbkach piasku (Kaczmarek, 2009):

$$\begin{cases} \rho g(h_1 - h_r)S_1 + \frac{\rho g}{k_1} L_1 \frac{dh_1}{dt} S = 0 \\ \rho g(h_2 - h_r)S_2 + \frac{\rho g}{k_2} L_2 \frac{dh_2}{dt} S = 0 \end{cases} \quad [2]$$

gdzie:

ρ – gęstość wody;

g – stała przyspieszenia ziemskiego;

$\frac{dh_1}{dt}$, $\frac{dh_2}{dt}$ – prędkość zmian wysokości słupa wody, równe

prędkościom filtracyjnym w odpowiednich próbkach.

Z uwagi na zachowanie masy w układzie pomiędzy zmianami wysokości wody w kolumnach dla każdego dt musi zachodzić związek:

$$dh_1 + dh_2 + dh_r = 0 \quad [3]$$

Po wprowadzeniu dodatkowych zmiennych – względnych wysokości słupa wody w kolumnach zewnętrznych w stosunku do wysokości w kolumnie środkowej:

$$\begin{aligned} H_1 &= h_1 - h_r \\ H_2 &= h_2 - h_r \end{aligned} \quad [4]$$

Z równań [2] i [3] można wyeliminować wysokość h_r i w rezultacie otrzymać układ sprzężonych równań różniczkowych zwyczajnych dla wysokości H_1 oraz H_2 :

$$\begin{cases} \frac{dH_1}{dt} = -2A_1 H_1 - A_2 H_2 \\ \frac{dH_2}{dt} = -A_1 H_1 - 2A_2 H_2 \end{cases} \quad [5]$$

gdzie:

$$A_1 = \frac{k_1 S_1}{L_1 S}, \quad A_2 = \frac{k_2 S_2}{L_2 S}$$

Przyjęto, że początkowe wartości wysokości H_1 oraz H_2 wynoszą:

$$H_1(t=0) = H_0$$

$$H_2(t=0) = H_0 \quad [6]$$

Rozwiązanie szczególne układu równań [5] przyjmuje się w postaci wykładniczej

$$H_i = \alpha_i e^{\lambda t} \quad [7]$$

gdzie:

α_i oraz λ są stałymi, natomiast $i = 1, 2$.

Podstawiając rozwiązania [7] do równań [5], otrzymuje się układ jednorodnych równań algebraicznych dla stałych α_i

$$\alpha_1(\lambda + 2A_1) + \alpha_2 A_2 = 0$$

$$\alpha_2 A_1 + \alpha_2(\lambda + 2A_1) = 0 \quad [8]$$

Z warunku istnienia nietrywialnych rozwiązań równań [8] wynika równanie charakterystyczne:

$$\lambda^2 + 2(A_1 + A_2)\lambda + 3A_1 A_2 = 0 \quad [9]$$

Rozwiązania równania [9] względem λ oraz odpowiadające tym rozwiązaniom stałe α_1 i α_2 wyznaczone z układu [8] pozwalają znaleźć rozwiązania szczególne układu równań [5]

$$H_{11} = \alpha_{11} e^{\lambda_1 t}, \quad H_{12} = \alpha_{12} e^{\lambda_2 t}, \quad H_{21} = \alpha_{21} e^{\lambda_1 t}, \quad H_{22} = \alpha_{22} e^{\lambda_2 t} \quad [10]$$

gdzie:

$$\lambda_{1,2} = -A_1 - A_2 \pm \sqrt{A_1^2 + A_2^2 - A_1 A_2}$$

Związki pomiędzy stałymi α_{11} i α_{21} oraz α_{12} i α_{22} można znaleźć, przyjmując, że $\alpha_{11} = 1$ oraz $\alpha_{12} = 1$, a także wykorzystując równania [8]:

$$\alpha_{21} = -\frac{\lambda_1 + 2A_1}{A_2}, \quad \alpha_{22} = -\frac{\lambda_2 + 2A_1}{A_2} \quad [11]$$

Ogólne rozwiązania równań [5] są kombinacjami liniowymi rozwiązań szczególnych [10], które wykorzystując [11], przyjmują postać:

$$\begin{aligned} H_1 &= C_1 H_{11} + C_2 H_{12} = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t}, \\ H_2 &= C_1 H_{21} + C_2 H_{22} = -C_1 \frac{\lambda_1 + 2A_1}{A_2} - C_2 \frac{\lambda_2 + 2A_1}{A_2} e^{\lambda_2 t} \end{aligned} \quad [12]$$

gdzie:

C_1 i C_2 są stałymi, które można wyznaczyć, wstawiając rozwiązanie [12] do warunków początkowych [6].

[13]

$$C_1 = \frac{H_0}{\lambda_2 - \lambda_1} (A_2 + \lambda_2 + 2A_1),$$

$$C_2 = \frac{-H_0}{\lambda_2 - \lambda_1} (A_2 + \lambda_1 + 2A_1)$$

Uwzględniając fakt, że suma wysokości h_1 , h_2 oraz h_r , jako całka równania [3] musi być równa $2H_0$:

[14]

$$h_1 + h_2 + h_r = 2H_0$$

oraz wykorzystując związki [4] otrzymuje się, wysokość h_r ,

[15]

$$h_r = \frac{1}{3}(2H_0 - H_1 - H_2)$$

Stąd mając rozwiązania [12], można wyznaczyć zależność wysokości cieczy w środkowej kolumnie od czasu.

W celu znalezienia opisu ruchu wody w kolumnach w przypadku kiedy jeden z zaworów V1 lub V2 (fig. 2) jest zamknięty oraz wszystkie pozostałe założenia są identyczne, jak w teście trójkolumnowym wykorzystano równania bilansu sił [2] zapisane w postaci:

[16]

$$\rho g (h_i - h_{ri}) S_i + \frac{\rho g}{k_i} L_i \frac{dh_i}{dt} S = 0$$

gdzie:

$i = 1, 2$ i h_{ri} oznacza wysokość wody w środkowej kolumnie podczas przepływu przez próbkę i . Równanie bilansu masy jest wówczas następujące:

[17]

$$dh_i + dh_{ri} = 0$$

Całkując związek [17], przyjmując, że w chwili początkowej $h_i(t=0) = H_{i0}$ zaś $h_{ri}(t=0) = 0$ oraz uwzględniając związki [4], otrzymujemy:

[18]

$$h_i = \frac{1}{2}(H_{i0} + H_i)$$

Wówczas równania [16] można przedstawić w postaci:

[19]

$$\frac{dH_i}{dt} = -2A_i dt$$

Rozwiązanie równań [19] przy wykorzystaniu warunków początkowych [6] przyjmuje postać:

[20]

$$H_i = H_{i0} \exp(-2A_i t)$$

Uwzględniając relacje [4] i [18], otrzymujemy:

[21]

$$h_{ri} = \frac{1}{2}(H_{i0} - H_i)$$

a stąd znając rozwiązania [20], można wyznaczyć zmiany wysokości wody w środkowej kolumnie w teście dwukolumnowym.

BADANIA LABORATORYJNE

Grunty do laboratoryjnej symulacji testu PARAMEX w warunkach podwójnej przepuszczalności hydraulicznej starano się pozyskać z jednego miejsca, aby były to utwory o podobnej genezie, współwystępujące w warunkach naturalnych. Zadbano też, aby zakres zmienności współczynnika filtracji tych gruntów obejmował możliwie szeroki przedział wartości charakterystycznych dla utworów wodonośnych – od 10^{-5} do 10^{-3} m/s. Po starannej selekcji wybrano piasek gruby będący obsypką filtracyjną stosowaną podczas wiercenia studni na ujęciu Dębina w Poznaniu, oznaczony jako grunt I, oraz trzy czwartorzędowe utwory piaszczyste o genezie fluwioglacjalnej, pochodzące z wyrobiska żwirowni „Niedźwiedziny” w Rejowcu k. Wągrowca oznaczone jako grunty II, III oraz IV (tab. 1).

Łącznie wykonano sześć serii eksperymentalnych – dla wszystkich możliwych kombinacji gruntów wymienionych powyżej, tj. I_II, I_III, I_IV, II_III, II_IV, III_IV. W każdej serii eksperymentalnej badano próbki o wysokości 25 i 50 cm. W tabeli 2 pokazano przykład zestawu badań wykonanych w ramach jednej serii eksperymentów. Na każdą serię składały się cztery badania każdego z gruntów w U-rurce (pola białe w tab. 2) oraz cztery badania obu gruntów w W-rurce (pola szare w tab. 2).

Wstępną ocenę wartości współczynnika filtracji analizowanych gruntów przeprowadzono na podstawie wzorów empirycznych oraz badania laboratoryjnego w permeametrze kolumnowym UPK-2003 metodą stałogradientową (Marciniak, 2003). Precyzyjne oznaczenie współczynnika

Tabela 1

Zestawienie wartości współczynnika filtracji analizowanych gruntów k [m/s]
 Hydraulic conductivity values of the analyzed sand samples k [m/s]

Nr próbki	Nazwa gruntu wg PN-86/B-02480	Wartość współczynnika filtracji k [m/s]			
		ze wzoru Hazena	ze wzoru amerykańskiego	metodą stałogradientową w permeametrze	metodą stałogradientową w U-rurce
I	piasek gruby	$7,81 \cdot 10^{-3}$	$3,77 \cdot 10^{-3}$	$1,71 \cdot 10^{-3}$	$2,08 \cdot 10^{-3}$ $2,17 \cdot 10^{-3}$ $2,49 \cdot 10^{-3}$
II	pospółka	$3,38 \cdot 10^{-4}$	$4,90 \cdot 10^{-4}$	$3,04 \cdot 10^{-4}$	$1,81 \cdot 10^{-4}$ $1,43 \cdot 10^{-4}$ $1,75 \cdot 10^{-4}$
III	piasek drobny	$5,10 \cdot 10^{-5}$	$2,74 \cdot 10^{-5}$	$5,35 \cdot 10^{-5}$	$4,82 \cdot 10^{-5}$ $4,19 \cdot 10^{-5}$ $5,95 \cdot 10^{-5}$
IV	piasek pylasty	b.d.*	$1,08 \cdot 10^{-5}$	$1,81 \cdot 10^{-5}$	$1,42 \cdot 10^{-5}$ **

* – poza granicą stosowalności wzoru ($0,1 < d_{10} < 3$); ** – badano tylko jedną próbkę gruntu IV

filtracji gruntów wykonano metodą stałogradientową w aparaturze pomiarowej przy pełnym zasypaniu próbników, tj. do 50 cm wysokości. Dzięki temu uzyskano wartości tego parametru dla konkretnych próbek gruntu.

W trakcie symulacji testów PARAMEX zarejestrowano łącznie 24 krzywe ruchu zwierciadła wody dla gruntów pojedynczych i 24 krzywe dla różnych kombinacji dwóch gruntów. Interpretację wyników symulacji wykonano na podstawie modeli matematycznych dla układu U-rurki i W-rurki omówionych w poprzednim rozdziale.

Tabela 2

Zestaw eksperymentów jednej serii badań na przykładzie gruntów I_II

Breakdown of experiments performed during one experimental series I_II

	I_25	I_50
II_25	I25_II25	I50_II25
II_50	I25_II50	I50_II50

WYNIKI IDENTYFIKACJI PODWÓJNEJ PRZEPUSZCZALNOŚCI HYDRAULICZNEJ

Zagadnienie odwrotne dla modelu laboratoryjnego testu PARAMEX rozwiązywano w środowisku obliczeniowym MATLAB z wykorzystaniem numerycznych procedur optymalizacyjnych. Na podstawie zarejestrowanej eksperymentalnie krzywej wzniosu wody poszukiwano wartości współczynników filtracji, które najlepiej odzwierciedlają przebieg zarejestrowanego eksperymentu. W przypadku eksperymentów dwukolumnowych uzyskiwano jedną wartość współczynnika filtracji, natomiast w eksperymentach trójkolumnowych, w których analizowano superpozycję właściwości filtracyjnych dwóch gruntów – zestaw dwóch wartości tego współczynnika. Porównano wartości współczynnika filtracji pomierzone

metodą stałogradientową w U-rurce k_{exp} z wartościami k_{ident} wyliczonymi za pomocą programu, poprzez obliczenie błędu bezwzględnego oraz względnego. Błędy te wraz z wartościami współczynnika filtracji pomierzonymi eksperymentalnie i identyfikowanymi w programie MATLAB zestawiono w tabelach 3–8.

Wyniki identyfikacji współczynników filtracji przedstawiono także w sposób graficzny na figurze 4. Wartości współczynników filtracji wyznaczone na podstawie modelu, którego rozwiązanie przeprowadzono w środowisku MATLAB, są zgodne z wartościami oznaczonymi metodą stałogradientową.

Tabela 3

Wyniki identyfikacji współczynnika filtracji w serii eksperymentalnej dla próbek I_II

Results of hydraulic conductivity identification for experimental series I_II

Nazwa eksperymentu	Numer próbki	Wartość współczynnika filtracji pomierzona k_{exp} [m/s]	Wartość współczynnika filtracji identyfikowana k_{ident} [m/s]	Błąd bezwzględny Δk [m/s]	Błąd względny $\delta_{k\%}$ [%]
I25	I	3,31E-3	2,87E-3	4,40E-4	13,3
I50	I	3,31E-3	2,96E-3	3,50E-4	10,6
II25	II	2,88E-4	3,00E-4	1,20E-5	4,2
II50	II	2,88E-4	2,33E-4	5,50E-5	19,1
I25_II25	I	3,31E-3	3,42E-3	1,10E-4	3,3
	II	2,88E-4	2,77E-4	1,10E-5	3,8
I25_II50	I	3,31E-3	3,60E-3	2,90E-4	8,8
	II	2,88E-4	2,43E-4	4,50E-5	15,6
I50_II25	I	3,31E-3	3,42E-3	1,10E-4	3,3
	II	2,88E-4	3,03E-4	1,50E-5	5,2
I50_II50	I	3,31E-3	3,52E-3	2,10E-4	6,3
	II	2,88E-4	2,52E-4	3,60E-5	12,5
			średnio	1,40E-4	8,8

Tabela 4

Wyniki identyfikacji współczynnika filtracji w serii eksperymentalnej dla próbek I_III

Results of hydraulic conductivity identification for experimental series I_III

Nazwa eksperymentu	Numer próbki	Wartość współczynnika filtracji pomierzona k_{exp} [m/s]	Wartość współczynnika filtracji identyfikowana k_{ident} [m/s]	Błąd bezwzględny Δk [m/s]	Błąd względny $\delta_{k\%}$ [%]
I25	I	3,48E-3	3,11E-3	3,70E-4	10,6
I50	I	3,48E-3	3,46E-3	2,00E-5	0,6
III25	III	7,71E-5	1,11E-4	3,39E-5	44,0
III50	III	7,71E-5	8,60E-5	8,90E-6	11,5
I25_III25	I	3,48E-3	3,59E-3	1,10E-4	3,2
	III	7,71E-5	1,12E-4	3,49E-5	45,3
I25_III50	I	3,48E-3	3,74E-3	2,60E-4	7,5
	III	7,71E-5	7,91E-5	2,00E-6	2,6
I50_III25	I	3,48E-3	3,85E-3	3,70E-4	10,6
	III	7,71E-5	1,15E-4	3,79E-5	49,2
I50_III50	I	3,48E-3	3,97E-3	4,90E-4	14,1
	III	7,71E-5	8,63E-5	9,20E-6	11,9
			średnio	1,46E-4	17,6

Tabela 5

Wyniki identyfikacji współczynnika filtracji w serii eksperymentalnej dla próbek I_IV
Results of hydraulic conductivity identification for experimental series I_IV

Nazwa eksperymentu	Numer próbki	Wartość współczynnika filtracji pomierzona k_{exp} [m/s]	Wartość współczynnika filtracji identyfikowana k_{ident} [m/s]	Błąd bezwzględny Δk [m/s]	Błąd względny $\delta_{k\%}$ [%]
I25	I	3,30E-3	3,46E-3	1,60E-4	4,8
I50	I	3,30E-3	3,45E-3	1,5-E-4	4,5
IV25	IV	1,90E-5	1,50E-5	4,00E-6	21,1
IV50	IV	1,90E-5	1,85E-5	5,00E-7	2,6
I25_IV25	I	3,30E-3	4,75E-3	1,45E-3	43,9
	IV	1,90E-5	2,11E-5	2,10E-6	11,1
I25_IV50	I	3,30E-3	4,52E-3	1,22E-3	37,0
	IV	1,90E-5	2,29E-5	3,90E-6	20,5
I50_IV25	I	3,30E-3	4,00E-3	7,00E-4	21,2
	IV	1,90E-5	2,00E-5	1,00E-6	5,3
I50_IV50	I	3,30E-3	4,53E-3	1,23E-3	37,3
	IV	1,90E-5	2,04E-5	1,40E-6	7,4
			średnio	4,11E-4	18,1

Tabela 6

Wyniki identyfikacji współczynnika filtracji w serii eksperymentalnej dla próbek II_III
Results of hydraulic conductivity identification for experimental series II_III

Nazwa eksperymentu	Numer próbki	Wartość współczynnika filtracji pomierzona k_{exp} [m/s]	Wartość współczynnika filtracji identyfikowana k_{ident} [m/s]	Błąd bezwzględny Δk [m/s]	Błąd względny $\delta_{k\%}$ [%]
II25	II	2,12E-4	2,16E-4	4,00E-6	1,9
II50	II	2,12E-4	2,03E-4	9,00E-6	4,2
III25	III	6,21E-5	1,11E-4	4,89E-5	78,7
III50	III	6,21E-5	7,97E-5	1,76E-5	28,3
II25_III25	II	2,12E-4	2,77E-4	6,50E-5	30,7
	III	6,21E-5	1,15E-4	5,29E-5	85,2
II25_III50	II	2,12E-4	2,28E-4	1,60E-5	7,5
	III	6,21E-5	7,97E-5	1,76E-5	28,3
II50_III25	II	2,12E-4	1,59E-4	5,30E-5	25,0
	III	6,21E-5	1,37E-4	7,49E-5	120,6
II50_III50	II	2,12E-4	2,02E-4	1,00E-5	4,7
	III	6,21E-5	8,17E-5	1,96E-5	31,6
			średnio	3,24E-5	37,2

Tabela 7

Wyniki identyfikacji współczynnika filtracji w serii eksperymentalnej dla próbek II_IV

Results of hydraulic conductivity identification for experimental series II_IV

Nazwa eksperymentu	Numer próbki	Wartość współczynnika filtracji pomierzona k_{exp} [m/s]	Wartość współczynnika filtracji identyfikowana k_{ident} [m/s]	Błąd bezwzględny Δk [m/s]	Błąd względny $\delta_{k\%}$ [%]
II25	II	2,38E-4	1,95E-4	4,30E-5	18,1
II50	II	2,38E-4	1,91E-4	4,70E-5	19,7
IV25	IV	1,90E-5	1,50E-5	4,00E-6	21,1
IV50	IV	1,90E-5	1,85E-5	5,00E-7	2,6
II25_IV25	II	2,38E-4	2,22E-4	1,60E-5	6,7
	IV	1,90E-5	1,80E-5	1,00E-6	5,3
II25_IV50	II	2,38E-4	2,48E-4	1,00E-5	4,2
	IV	1,90E-5	2,37E-5	4,70E-6	24,7
II50_IV25	II	2,38E-4	2,09E-4	2,90E-5	12,2
	IV	1,90E-5	1,69E-5	2,10E-6	11,1
II50_IV50	II	2,38E-4	2,14E-4	2,40E-5	10,1
	IV	1,90E-5	2,52E-5	6,20E-6	32,6
			średnio	1,56E-5	14,0

Tabela 8

Wyniki identyfikacji współczynnika filtracji w serii eksperymentalnej dla próbek III_IV

Results of hydraulic conductivity identification for experimental series III_IV

Nazwa eksperymentu	Numer próbki	Wartość współczynnika filtracji pomierzona k_{exp} [m/s]	Wartość współczynnika filtracji identyfikowana k_{ident} [m/s]	Błąd bezwzględny Δk [m/s]	Błąd względny $\delta_{k\%}$ [%]
III25	III	8,09E-5	1,05E-4	2,41E-5	29,8
III50	III	8,09E-5	8,41E-5	3,20E-6	4,0
IV25	IV	1,90E-5	1,50E-5	4,00E-6	21,1
IV50	IV	1,90E-5	1,85E-5	5,00E-7	2,6
III25_IV25	III	8,09E-5	1,14E-4	3,31E-5	40,9
	IV	1,90E-5	1,78E-5	1,20E-6	6,3
III25_IV50	III	8,09E-5	8,66E-5	5,70E-6	7,0
	IV	1,90E-5	2,42E-5	5,20E-6	27,4
III50_IV25	III	8,09E-5	4,41E-5	3,68E-5	45,5
	IV	1,90E-5	3,69E-5	1,79E-5	94,2
III50_IV50	III	8,09E-5	9,00E-5	9,10E-6	11,2
	IV	1,90E-5	2,74E-5	8,40E-6	44,2
			średnio	1,24E-5	27,9

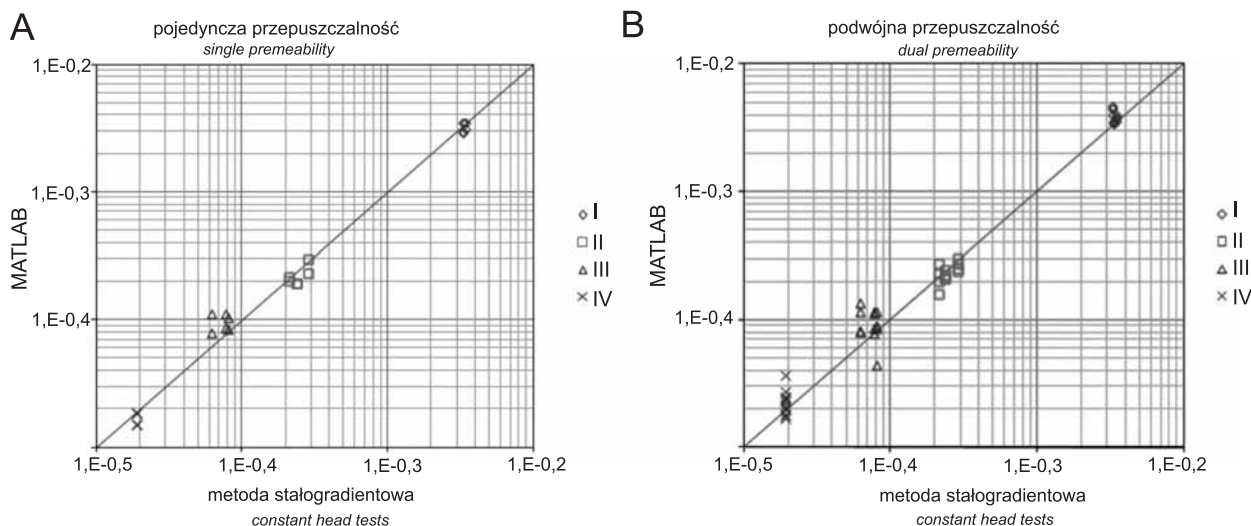


Fig. 4. Graficzna prezentacja wyników identyfikacji współczynnika filtracji dla eksperymentów dwukolumnowych (A) i trójkolumnowych (B)

Results of the hydraulic conductivity identification for U-tube (A) and W-tube (B) experiments

WNIOSKI I PODSUMOWANIE

Wartości współczynnika filtracji uzyskane w wyniku proponowanej metody interpretacji charakteryzują się niewielkim rozrzutem obliczonych błędów. Najmniejsze błędy uzyskano dla serii eksperymentalnej I_II, w której średni błąd względny wynosi 8,8%. Można uznać taki rezultat identyfikacji za bardzo dobry. Niskimi wartościami obliczonych błędów względnych charakteryzują się również serie I_III, I_IV i II_IV. Średni błąd względny wyniósł odpowiednio: 17,6%, 18,1% i 14,0%. Najwyższą wartość błędów względnych uzyskano w serii II_III dla gruntu III, przy zasypaniu próbnika do wysokości 25 cm. W przypadku eksperymentów III25; II25_III25 oraz II50_III25 błąd względny dla gruntu III wyniósł odpowiednio 78,7%; 85,2% i 120,6%, zaś średnia wartość błędu względnego dla całej serii wyniosła 37,2%.

Po analizie wyników identyfikacji stwierdzono, że przyczyną błędów były trudności związane ze zmieniającą się konsolidacją gruntów. Ponieważ oznaczenie współczynnika filtracji metodą stałogradientową przeprowadzano zawsze na końcu serii eksperymentalnej, to podczas tego badania grunty były zwykle bardziej skonsolidowane niż podczas eksperymentów wykonywanych na początku serii. W największym stopniu trudności te wystąpiły w przypadku gruntu III.

Inną przyczyną błędów identyfikacji mógł być mały kontrast pomiędzy przewodnością badanych gruntów. W szczególności dotyczy to eksperymentu III50_IV25, w którym błąd względny wyniósł 45,5% dla gruntu III i 94,2% dla gruntu IV.

Zauważono także pewną prawidłowość dla eksperymentów wykonywanych w konfiguracji W-rurki – błędy względne dla gruntu o wyższej wartości współczynnika filtracji były zazwyczaj mniejsze niż błędy dla gruntów o niższej wartości tego współczynnika. Fakt ten tłumaczy się tym, że przebieg pierwszej części takich eksperymentów jest w dużej mierze determinowany parametrami filtracyjnymi utworu o lepszej przepuszczalności – to na skutek filtracji przez ten utwór rejestrowana jest większa część powrotu poziomu wody w kolumnie pomiarowej do położenia początkowego. Jakość identyfikacji współczynnika filtracji o wyższej wartości jest zatem lepsza.

Badania współfinansowane ze środków MNiSW jako projekt badawczy NN 307 0697 39: „Identyfikacja parametrów przewodności hydraulicznej utworów wodonośnych o podwójnej porowatości”.

LITERATURA

KACZMAREK M., 2009 — Role of inertia in falling head permeability test. *Internat. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, **33**, 18: 1963–1970.

MARCINIAK M., 1999 — Identyfikacja parametrów hydrogeologicznych na podstawie skokowej zmiany potencjału hydraulicznego. *Metoda PARAMEX*. Wyd. Nauk. UAM, Poznań.

- MARCINIAK M., 2002 — Metoda oceny stanu technicznego piezometrów na potrzeby monitoringu wód podziemnych. Bogucki Wyd. Nauk., Poznań.
- MARCINIAK M., 2003 — Uniwersalny permeametr kolumnowy UPK-2003. Instrukcja obsługi. Arch. UAM, Poznań.
- MARCINIAK M., CHUDZIAK Ł., WOLNY F., 2010 — O zasięgu oddziaływania eksperymentu identyfikacyjnego metodą PARAMEX. *W: Zasoby, zagrożenia i ochrona wód podziemnych* (red. R. Graf, M. Marciniak): 97–107. Bogucki Wyd. Nauk., Poznań.
- MARCINIAK M., KACZMAREK M., WOLNY F., 2010 — Model fizyczny i matematyczny ośrodka wodonośnego o podwójnej przepuszczalności. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **442**: 129–136.
- POLSKA NORMA PN-86/B-02480 – Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów. Polski Komitet Normalizacji Miar i Jakości.

SUMMARY

The hydraulic conductivity values of the analysed samples calculated based on the mathematical model using optimization techniques varied in accuracy. The smallest errors were obtained for experimental series I_II. The average percent error between the hydraulic conductivity values measured during constant head tests and values identified using optimization techniques for this series was 8.8%. This indicates a good convergence between the measured and identified values. Relatively small percent errors were also obtained for series I_III, I_IV and II_IV (17.6, 18.1 and 14.0% respectively). The largest percent error was obtained for series II_III (37.2%) due to some problems with the proper installation of sand samples III in the chamber of the laboratory

model. Relatively large percent errors were also obtained for series III_IV. This was probably caused by a small difference in hydraulic conductivity between samples III and IV.

It should be noted that larger errors were observed for W-tube experiments than for U-tube ones. Moreover, during W-tube tests, larger errors were usually observed for the sample with a lower hydraulic conductivity. This may be explained by the fact that the sample with a higher hydraulic conductivity has a greater influence on the rate-of-rise curve registered during tests, therefore the ability to properly determine the filtration parameters of this sample is also greater.