

POTRZEBY I MOŻLIWOŚCI IDENTYFIKACJI PARAMETRÓW OŚRODKA KONIECZNYCH DO MODELOWANIA PRZEPŁYWU WÓD PODZIEMNYCH

NEEDS AND POSSIBILITIES OF IDENTIFICATION OF HYDROGEOLOGICAL PARAMETERS FOR GROUNDWATER FLOW MODELLING

MAREK MARCINIAK¹

Abstrakt. Przedstawiono matematyczny opis przepływu wód podziemnych, na który składają się: filtracja wody, migracja zanieczyszczeń oraz przewodzenie ciepła. Dokonano przeglądu metod identyfikacji wszystkich parametrów hydrogeologicznych niezbędnych do opisu przepływu wód podziemnych. Przeanalizowano stan badań w zakresie identyfikacji parametrów hydrogeologicznych. W rezultacie zaproponowano serię eksperymentów identyfikacyjnych, która może być przeprowadzona w hydrowężle parametrycznym.

Słowa kluczowe: przepływ wód podziemnych, modelowanie, parametry hydrogeologiczne, identyfikacja.

Abstract. The paper presents a mathematical description of groundwater flow which includes: water filtration, migration of pollutants and heat flow. It is followed by an overview of recent research advances in identification methods of all the hydrogeological parameters necessary for description of groundwater flow. A new series of identification experiments, which may be applied in a pumping well with observation wells for parameters identification, is proposed.

Key words: groundwater flow, modelling, hydrogeological parameters, identification.

PODSTAWY TEORETYCZNE

RÓWNANIE FILTRACJI WODY

Filtrację wody w anizotropowej, niejednorodnej warstwie wodonośnej można opisać za pomocą uogólnionego równania Boussinesque'a w postaci (Bear, 1972):

$$\operatorname{div}(k \operatorname{grad} H) + \sum_{i,j,k} (q_F)_{i,j,k} = S \frac{\partial H}{\partial t} \quad [1]$$

gdzie:

H – potencjał hydrauliczny $H = H(x, y, z, t)$ [m],

k – współczynnik filtracji o składowych k_x, k_y, k_z [m/s],

$(q_F)_{i,j,k}$ – elementy zasilania i drenażu [1/s],

S – jednostkowy współczynnik pojemności sprężystej S_s lub grawitacyjnej S_y [1/m],

x, y, z, t – współrzędne przestrzennoczasowe [m], [s].

Poszczególne składniki równania [1] oznaczają: filtrację, elementy zasilania i drenażu oraz pojemność wodną. Aby uzyskać jednoznaczne rozwiązanie równania [1], konieczne jest określenie warunków początkowych [2] i brzegowych [3]:

¹ Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Instytut Geografii Fizycznej i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego, ul. Dziegielewa 27, 61-680 Poznań; e-mail: mmarc@amu.edu.pl

$$H(x, y, z, t)|_{t=t_0} = H_0(h, y, z) \quad [2]$$

$$\begin{cases} H(x_i, y_j, z_k) = \text{const} \\ \frac{\partial H(x_i, y_j, z_k)}{\partial t} = q_{i,j,k} = \text{const} \\ \frac{\partial H(x_i, y_j, z_k)}{\partial t} = \frac{k'}{m'}(H - H_R) \end{cases} \quad [3]$$

gdzie:

- H_0 – początkowy rozkład zwierciadła wód podziemnych w badanym obszarze [m],
- k' – współczynnik filtracji pionowej osadów wyścielających koryto rzeki [m/s],
- m' – miąższość osadów wyścielających koryto rzeki [m],
- H_R – zwierciadło wody w rzece [m],
- i, j, k – współrzędne bloków obliczeniowych modelowanego obszaru.

RÓWNANIA MIGRACJI ZANIECZYSZCZEŃ

Migrację znacznika w anizotropowej, niejednorodnej warstwie wodonośnej można opisać za pomocą uogólnionego równania Ficka w postaci (Fetter, 2001):

$$\text{div}[D^* \text{grad}C] + \text{div}[D \text{grad}C] + \text{div}[vC] + \sum_{i,j,k} (q_c)_{i,j,k} - \frac{\rho_s}{n_c} \frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad [4]$$

gdzie:

- C – koncentracja znacznika $C = C(x, y, z, t)$ [g/m³],
- D^* – współczynnik dyfuzji molekularnej [m²/s],
- D – współczynnik dyspersji hydrodynamicznej [m²/s],
- $(q_c)_{i,j,k}$ – dodatkowe źródła znacznika [g/m³·s],
- v – wektor średniej prędkości przepływu [m/s],
- ρ_s – gęstość ośrodka porowatego [g/m³],
- n_c – porowatość całkowita [-],
- N – masa znacznika adsorbowana przez ośrodek skalny, odniesiona do jednostkowej masy ośrodka skalnego [g/g].

Poszczególne składniki równania [4] oznaczają: dyfuzję molekularną, dyspersję hydrodynamiczną, adwekcję (konwekcję), sorpcję (adsorpcję i desorpcję).

W procesie migracji znacznika w porowym ośrodku wodonośnym dyspersja hydrodynamiczna ma znaczenie dominujące, natomiast dyfuzję molekularną często można pominąć. Według Burnetta i Frinda (1987) ze względu na analogię opisu matematycznego oba te procesy można opisać łącznie jako:

$$\text{div}[D_{ij} \text{grad}C], \quad [5]$$

przy czym wówczas tensor D_{ij} ma składowe zdefiniowane przez następujące układy równań (Bear, 1961):

$$\begin{cases} D_{xx} = \alpha_L \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_{TH} \frac{v_y^2}{|v|} + \alpha_{TV} \frac{v_z^2}{|v|} + D^* \\ D_{yy} = \alpha_L \frac{v_y^2}{|v|} + \alpha_{TH} \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_{TV} \frac{v_z^2}{|v|} + D^* \\ D_{zz} = \alpha_L \frac{v_z^2}{|v|} + \alpha_{TH} \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_{TV} \frac{v_y^2}{|v|} + D^* \end{cases} \quad [6]$$

$$\begin{cases} D_{xy} = D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_{TH}) \frac{v_x v_y}{|v|} \\ D_{xz} = D_{zx} = (\alpha_L - \alpha_{TV}) \frac{v_x v_z}{|v|} \\ D_{yz} = D_{zy} = (\alpha_L - \alpha_{TV}) \frac{v_y v_z}{|v|} \end{cases} \quad [7]$$

gdzie:

- α_L – współczynnik dyspersji podłużnej [m],
- α_T – współczynnik dyspersji poprzecznej [m], który jest sumą współczynników dyspersji poprzecznej poziomej α_{TH} [m] oraz pionowej α_{TV} [m].

Zarówno adsorpcja, jak i desorpcja wpływają na zmiany koncentracji znacznika, co opisuje składnik sorpcyjny (Boeker, van Geondelle, 2002) $-\frac{\rho_s}{n_c} \frac{\partial N}{\partial t}$. Związek pomiędzy jed-

nostkową masą N znacznika zaadsorbowaną przez ośrodek skalny a koncentracją C znacznika w wodzie opisują izotermy sorpcji (Kinzelbach, 1986):

– izoterma Henry'ego (liniowa):

$$N = K_d C \quad [8]$$

– izoterma Freundlicha (wykładnicza):

$$N = K_f C^a \quad [9]$$

– izoterma Langmuira (nieliniowa):

$$N = C_z K_l \frac{C}{1 + K_l C} \quad [10]$$

gdzie:

- K_d – stała podziału Henry'ego [1/(g/m³)],
- K_f – stała podziału Freundlicha [1/(g/m³)],
- a – wykładnik potęgowy Freundlicha [-],
- K_l – stała podziału Langmuira [1/(g/m³)],
- C_s – pojemność sorpcyjna ośrodka skalnego [g/g].

Aby uwzględnić izotermę sorpcji [8], [9] oraz [10] w bilansie koncentracji zanieczyszczenia [4], należy obliczyć ich pochodne cząstkowe po czasie.

Po uwzględnieniu przedstawionych powyżej założeń równanie [4] można przekształcić do postaci:

$$\operatorname{div}[\mathbf{D}_{ij} \operatorname{grad} C] - \operatorname{div}[vC] + \sum_{i,j,k} (q_c)_{i,j,k} = R \frac{\partial C}{\partial t} \quad [11]$$

gdzie:

R – współczynnik opóźnienia (retardacji) [-].

Współczynnik opóźnienia (retardacji) wynosi:

– dla izotermi Henry’ego:

$$R = 1 + \frac{\rho_s K_d}{n_c} \quad [12]$$

– dla izotermi Freundlicha:

$$R = 1 + \frac{\rho_s K_f a C^{a-1}}{n_c} \quad [13]$$

– dla izotermi Langmuira:

$$R = 1 + \frac{\rho_s K_l C_s}{n_c (1 + K_l C)^2} \quad [14]$$

Aby uzyskać jednoznaczne rozwiązanie równania [11], konieczne jest określenie warunków początkowych [15] i brzegowych [16]:

$$C(x, y, z, t)|_{t=t_0} = C_0(x, y, z) \quad [15]$$

$$\begin{cases} C(x_i, y_j, z_k) = \text{const} \\ \frac{\partial C(x_i, y_j, z_k)}{\partial t} = \text{const} \end{cases} \quad [16]$$

gdzie:

C_0 – początkowy rozkład koncentracji zanieczyszczenia w badanym obszarze [g/m^3].

RÓWNANIE TRANSPORTU CIEPŁA

Transport ciepła w anizotropowym i niejednorodnym ośrodku wodonośnym można ograniczyć do analizy przewodnictwa cieplnego. Konwekcję i promieniowane ciepła w zagadnieniach hydrogeologicznych można zaniedbać. Równanie przewodnictwa cieplnego, nazywane niekiedy równaniem Fouriera, można zapisać w postaci (Katscher, 1976):

$$\operatorname{div}\left(\frac{\lambda}{c_w \rho} \operatorname{grad} T\right) + \sum_{i,j,k} (q_T)_{i,j,k} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad [17]$$

gdzie:

T – temperatura wody $T = T(x, y, z, t)$ [$^{\circ}\text{C}$],

λ – współczynnik przewodnictwa cieplnego o składowych $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ [$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$],

c_w – ciepło właściwe ośrodka wodonośnego [$\text{J}/\text{g}^{\circ}\text{C}$],

ρ – gęstość ośrodka wodonośnego [g/m^3],

$(q_T)_{i,j,k}$ – źródła ciepła w badanym obszarze [$^{\circ}\text{C}/\text{s}$].

Poszczególne składniki równania [17] oznaczają: przewodnictwo ciepła, źródła ciepła oraz pojemność cieplną ośrodka. Aby uzyskać jednoznaczne rozwiązanie równania [17], konieczne jest określenie warunków początkowych [18] i brzegowych [19]:

$$T(x, y, z, t)|_{t=t_0} = T_0(x, y, z) \quad [18]$$

$$\begin{cases} T(x_i, y_j, z_k) = \text{const} \\ \frac{\partial T(x_i, y_j, z_k)}{\partial t} = \text{const} \end{cases} \quad [19]$$

gdzie:

T_0 – początkowy rozkład temperatur w badanym obszarze [$^{\circ}\text{C}$].

PRZEGLĄD OPROGRAMOWANIA POD KĄTEM ZAPOTRZEBOWANIA NA PARAMETRY

Lista parametrów hydrogeologicznych niezbędnych do realizacji modeli filtracji wód podziemnych, migracji zanieczyszczeń w warstwie wodonośnej oraz przewodzenia ciepła w ośrodku wodonośnym przedstawia się następująco:

Filtracja wód podziemnych:

- współczynnik filtracji k_x, k_y, k_z ,
- jednostkowy współczynnik pojemności sprężystej S_s ,
- jednostkowy współczynnik pojemności grawitacyjnej S_y ,
- współczynnik porowatości całkowitej n_c ,
- współczynnik porowatości efektywnej n_e ,
- współczynnik filtracji pionowej osadów wyścielających koryto rzeki k' ,
- miąższość osadów wyścielających koryto rzeki m' .

Migracja zanieczyszczeń w warstwie wodonośnej:

- współczynnik dyfuzji molekularnej D^* ,
- współczynnik dyspersji całkowitej D ,
- współczynnik dyspersji podłużnej α_L ,
- współczynnik dyspersji poprzecznej poziomej α_{TH} ,
- współczynnik dyspersji poprzecznej pionowej α_{TV} ,
- współczynnik opóźnienia (retardacji) R ,
- stała podziału Henry'ego K_d ,
- stała podziału Freundlicha K_f ,
- wykładnik potęgowy Freundlicha α ,
- stała podziału Langmuira K_l ,
- pojemność sorpcyjna ośrodka skalnego C_s .

Przewodzenie ciepła:

- współczynnik przewodnictwa cieplnego $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$,
- ciepło właściwe ośrodka wodonośnego c_w ,
- gęstość ośrodka wodonośnego ρ .

W celu rozpoznania zapotrzebowania na poszczególne parametry przez programy komputerowe realizujące modele hydrogeologiczne przeanalizowano kilka najczęściej stosowanych programów (tab. 1):

- Visual MODFLOW oraz MT3D99 kanadyjskiej firmy Waterloo Hydrogeologic Inc.,
- MIKE.SHI opracowany przez duńsko-francusko-brytyjski zespół specjalistów z Danish Hydraulic Institute z Hørsholm koło Kopenhagi,
- GMS ver. 5.1 *Groundwater Modeling System* opracowany przez Environmental Modeling System Inc. Utah, USA jako jeden z segmentów pakietu programów do modelowania zagadnień z zakresu hydrologii i gospodarki wodnej,
- FEFLOW ver.5.2 opracowany przez niemiecko-duńską spółkę DHI-WASY GmbH; wszechstronny pakiet pro-

Tabela 1

Zestawienie parametrów hydrogeologicznych koniecznych do modelowania procesów hydrogeologicznych

Parameters for hydrogeological processes modelling

Parametr hydrogeologiczny	Modflow 4.2	MT3D99	Mike.shi	GMS 5.1	Feflow 5.2
Filtracja wód podziemnych					
Wsp. filtracji k_x, k_y, k_z	+	–	+	+	+
Wsp. pojemności sprężystej S_s	+	–	+	+	+
Wsp. pojemności grawitacyjnej S_y	+	–	+	+	+
Wsp. porowatości całkowitej n_c	+	–	+	+	+
Wsp. porowatości efektywnej n_e	+	–	+	+	+
Wsp. filtracji osadów dennych k'	+	–	+	+	+
Miąższość osadów dennych m'	+	–	+	+	+
Migracja zanieczyszczeń w warstwie wodonośnej					
Wsp. dyfuzji molekularnej D^*	–	+	–	+	+
Wsp. dyspersji całkowitej D	–	+	–	+	+
Wsp. dyspersji podłużnej α_L	–	+	–	+	+
Wsp. dyspersji poprzecznej poziomej α_{TH}	–	+	–	+	+
Wsp. dyspersji poprzecznej pionowej α_{TV}	–	+	–	+	+
Wsp. opóźnienia (retardacji) R	–	+	–	+	+
Stała podziału Henry'ego K_d	–	+	–	+	+
Stała podziału Freundlicha K_f	–	+	–	+	+
Wykładnik potęgowy Freundlicha α	–	+	–	+	+
Stała podziału Langmuira K_l	–	+	–	+	+
Pojemność sorpcyjna ośrodka skalnego C_s	–	+	–	+	+
Przewodzenie ciepła					
Wsp. przewodnictwa cieplnego $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$	–	–	–	–	+
Ciepło właściwe ośrodka wodonośnego c_w	–	–	–	–	+
Gęstość ośrodka wodonośnego ρ	–	–	–	–	+

gramów do modelowania filtracji, migracji i transportu ciepła w ośrodku wodonośnym.

Algorytmy numeryczne programów Visual MODFLOW, MT3D99 oraz MIKE.SHI bazują na metodzie różnic skoń-

czonych. Natomiast algorytmy numeryczne programów GMS oraz FEFLOW dyskretyzują obszar realizując metodą elementów skończonych.

STAN BADAŃ I PRAKTYKI HYDROGEOLOGICZNEJ W ZAKRESIE IDENTYFIKACJI PARAMETRÓW

AKTUALNE MOŻLIWOŚCI IDENTYFIKACJI PARAMETRÓW HYDROGEOLOGICZNYCH

Źródła danych o wartościach parametrów hydrogeologicznych można podzielić na:

- dane literaturowe,
- parametry określone poprzez analogię do obszarów o podobnej budowie geologicznej i zbliżonych warunkach hydrogeologicznych,
- wzory empiryczne,
- badania laboratoryjne,
- badania terenowe.

Każde z tych źródeł dostarcza danych do modelowania o różnym stopniu wiarygodności. Modele przepływu wód podziemnych konstruowane na podstawie parametrów, których wartości określono w przybliżeniu na podstawie danych literaturowych są mało wiarygodne. Najbardziej wartościowe są wartości parametrów hydrogeologicznych określone na podstawie badań terenowych przeprowadzonych w modelowanym obszarze. Zakres opracowań teoretycznych w zakresie identyfikacji parametrów hydrogeologicznych zestawiono w tabeli 2. Trzeba zaznaczyć, że chodzi tutaj o metody identyfikacyjne opracowane dla potrzeb badań hydrogeologicznych i w tego rodzaju badaniach wykorzystywane. Identyfikacja parametrów przewodzenia ciepła może być wykonywana w warunkach terenowych, ale obecnie stosowane metody dotyczą w zasadzie zagadnień geologiczno-inżynierskich. Ich wykorzystanie w hydrogeologii wymaga przeprowadzenia odpowiednich adaptacji, zwłaszcza w zakresie głębokości występowania badanych struktur oraz punkowego do nich dostępu poprzez otwory hydrogeologiczne.

Analizując dane zestawione w tabeli 2, należy zauważyć, że najlepiej opracowane są **metody identyfikacji parametrów filtracji wód podziemnych**. Dotyczy to zwłaszcza współczynnika filtracji. Rozpoznanie tego parametru można przeprowadzić za pomocą wzorów empirycznych, metod laboratoryjnych i terenowych. Wzory empiryczne pozwalają określić wartość współczynnika filtracji na podstawie analizy granulometrycznej składu litologicznego próbki gruntu. Metody laboratoryjne dzielą się na stało- i zmiennogradentowe. Opracowano cały zestaw aparatów zwanych permeametriami do oznaczania w laboratorium wartości współczynnika filtracji próbki gruntu (Olsen i in., 1985). Permeametry hydrogeologiczne mają różną konstrukcję w zależności od tego, czy przystosowane są do oznaczania współczynnika filtracji utworów przepuszczalnych, czy też półprzepuszczalnych

Tabela 2

Identyfikacja parametrów hydrogeologicznych
Identification of hydrogeological parameters

Parametr hydrogeologiczny	Wzory empiryczne	Metody laboratoryjne	Metody terenowe
Filtracja wód podziemnych			
Wsp. filtracji k_x, k_y, k_z	+	+	+
Wsp. pojemności sprężystej S_s	+	+	+
Wsp. pojemności grawitacyjnej S_y	+	+	+
Wsp. porowatości całkowitej n_c	+	+	–
Wsp. porowatości efektywnej n_e	+	+	–
Wsp. filtracji osadów dennych k'	–	+	+
Miąższość osadów dennych m'	–	+	+
Migracja zanieczyszczeń w warstwie wodonośnej			
Wsp. dyfuzji molekularnej D^*	+	+	–
Wsp. dyspersji całkowitej D	+	+	–
Wsp. dyspersji podłużnej α_L	+	+	–
Wsp. dyspersji poprzecznej poziomej α_{TH}	–	+	–
Wsp. dyspersji poprzecznej pionowej α_{TV}	–	+	–
Wsp. opóźnienia (retardacji) R	–	+	–
Stała podziału Henry'ego K_d	+	+	–
Stała podziału Freundlicha K_f	+	+	–
Wykładnik potęgowy Freundlicha α	+	+	–
Stała podziału Langmuira K_l	+	+	–
Pojemność sorpcyjna ośrodka skalnego C_s	+	+	–
Przewodzenie ciepła			
Wsp. przewodnictwa cieplnego $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$	–	+	–
Ciepło właściwe ośrodka wodonośnego c_w	–	+	–
Gęstość ośrodka wodonośnego ρ	–	+	–

(Herzig, Szczepańska, 1995). Opracowano też wiele sposobów oznaczania współczynnika filtracji w warunkach terenowych. W rejonach zasilania ujęć wód podziemnych współczynnik filtracji oznacza się na podstawie badań *in situ* w piezometrach. W tym celu można wykonać *slug-test*, *boil-test* (Bouwer, Rice, 1976) lub przeprowadzić badanie metodą PARAMEX (Marciniak, 1999). Najlepiej opracowane zostały metody określania współczynnika filtracji w rejonach eksploatacji wód podziemnych, gdzie występują zarówno studnie, jak i piezometry. Podstawową metodą oznaczania współczynnika filtracji w hydrowęzle jest pompowanie parametryczne. Opracowano wiele metod przeprowadzenia tego pompowania w zależności od tego, w ilu piezometrach można przeprowadzić obserwacje ruchu zwierciadła wód podziemnych. Rozpatrzono teoretycznie wiele schematów budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych występujących w rejonie pompowanego hydrowęzła. Do dyspozycji hydrogeologa jest w pełni zautomatyzowana obsługa pomiarowa pompowania parametrycznego oraz nowoczesne oprogramowanie do interpretacji jego wyników. Pomimo że interpretacja pompowań parametrycznych jest trudna, to jej oprogramowanie można ocenić jako przyjazne dla hydrogeologa.

Identyfikacja wartości współczynnika filtracji ma kluczowe znaczenie dla oceny zasobów wód podziemnych. Wyznaczeniem wartości tego parametru zajmowano się więc od samego początku badań hydrogeologicznych, czyli od ponad 150 lat. Wyniki wszechstronnych badań współczynnika filtracji doczekały się już zestawienia właściwości filtracyjnych skał w całym zakresie zmienności tego najważniejszego parametru hydrogeologicznego. Zestawienie to, z podziałem na filtrację poziomą i pionową, pokazano w tabeli 3.

Pozostałe parametry hydrogeologiczne opisujące filtrację wód podziemnych nie są już tak dobrze rozpoznawalne jak współczynnik filtracji. Brakuje metod poleowego oznaczania współczynników porowatości (Skempton, 1994). Natomiast badania przepuszczalności hydraulicznej koryt rzecznych oraz osadów dennych zbiorników wód powierzchniowych są słabo oprzyrządowane aparaturowo.

Tabela 3

Zestawienie właściwości filtracyjnych skał (Marciniak i in., 1998)
Breakdown filtration properties of rocks (Marciniak *et al.*, 1998)

Filtracja pozioma			Przykłady skał	Filtracja pionowa			
współczynnik filtracji poziomej k [m/s]	charakter przepuszczalności skał (Pazdro, 1977)	utwory przepuszczalne (Słownik hydrogeologiczny)		współczynnik filtracji pionowej k [m/s]	klasa przepuszczalności pionowej skał (Gawicz, 1983)	nazwa klasy utworów izolujących (Witczak, Adameczyk, 1994)	utwory izolujące (półprzepuszczalne) (Słownik hydrogeologiczny)
$> 10^{-3}$	bardzo dobra	bardzo dobrze	rumosze, żwiry, żwiry piaszczyste, piaski grubo- i równoziarniste, skały masywne z bardzo gęstą siecią szczelin nadkapilarnych				
$10^{-4} - 10^{-3}$	dobra	dobrze	piaski grubo-, różno- i średnioziarniste, słabo spójne piaszkowce, skały masywne z gęstą siecią szczelin nadkapilarnych				
$10^{-5} - 10^{-4}$	średnia	średnio	piaski drobnoziarniste równomiernie uziarnione, less, skały masywne z siecią szczelin nadkapilarnych				
$10^{-6} - 10^{-5}$	słaba	słabo	piaski pylaste, piaski gliniaste, mulki, piaszkowce, skały masywne z rzadką siecią szczelin nadkapilarnych	$> 10^{-6}$	bardzo dobra	nie izolująca	nie izolujące
$10^{-8} - 10^{-6}$	półprzepuszczalne	bardzo słabo	gliny pylaste, namuły, mułowce, ility piaszczyste, skały słabo szczelinowate	$10^{-8} - 10^{-6}$	dobra	bardzo słabo izolująca	bardzo słabo izolujące
$< 10^{-8}$	nieprzepuszczalne	nieprzepuszczalne	gliny pylaste, ility piaszczyste	$10^{-10} - 10^{-8}$	średnia	słabo izolująca	słabo izolujące
			ility słabo zapiaszczone, ility plastyczne	$10^{-12} - 10^{-10}$	słaba i bardzo słaba	średnio i dobrze izolująca	średnio i dobrze izolujące
			ility zwięzłe	$< 10^{-12}$	praktycznie nieprzepuszczalna	bardzo dobrze izolująca	bardzo dobrze izolujące

Znacznie niżej należy ocenić możliwości identyfikacji **parametrów migracji zanieczyszczeń w warstwach wodonośnych**. Możliwości oznaczania parametrów migracji na podstawie wzorów empirycznych ograniczają się do wykorzystania wyników badań chemicznych, fizycznych albo z zakresu technologii uzdatniania wód (Witczak, Adamczyk, 1994). Identyfikacja parametrów migracji dla potrzeb modelowania zagadnień hydrogeologicznych jest obecnie na etapie badań laboratoryjnych. Podstawową metodą jest wykonanie eksperymentu kolumnowego (Marciniak, Okońska, 2005). Celem tego eksperymentu jest zarejestrowanie krzywej przejścia, czyli zmian w czasie koncentracji znacznika na wyjściu z kolumny przy skokowej lub impulsowej zmianie koncentracji tego znacznika na wejściu do kolumny. Eksperyment kolumnowy jest jednak obciążony efektem skali, zwłaszcza w odniesieniu do parametrów dyfuzyjodypersji (Nawalany, 1999). Na obecnym etapie badań nie wypracowano jeszcze standardu realizacji eksperymentu kolumnowego. Brakuje zgody co do wymiarów kolumny, czasu trwania eksperymentu, sposobu iniekcji oraz koncentracji znaczników (Klotz i in., 1988). Na wiele trudności napotyka interpretacja wyników eksperymentu kolumnowego. W odniesieniu do znaczników pasywnych można mówić o dobrej zgodności wyników badań laboratoryjnych z opisem matematycznym migracji tych znaczników (Marciniak i in., 2006). Jednak w odniesieniu do znaczników aktywnych występują zasadnicze trudności ze sformułowaniem opisu matematycznego migracji tych znaczników. Szczególnie dotyczy to procesów sorpcyjnych oraz reakcji kinetycznych pomiędzy znacznikiem, wodą podziemną i ośrodkiem skalnym (Marciniak i in., 2008). Natomiast terenowe metody identyfikacji parametrów migracji znajdują się obecnie na etapie badań pilotowych. Dzisiejszy stan wiedzy na temat wartości parametrów migracji zanieczyszczeń nie upoważnia do sporządzenia zestawień tabelarycznych, na wzór tabeli 3, z charakterystyką zakresu zmienności poszczególnych parametrów. Trudno zatem uznać, że hydrogeologia dysponuje zadowalającymi metodami identyfikacji parametrów migracji zanieczyszczeń w warstwie wodonośnej.

Ostatnia grupa **parametrów** hydrogeologicznych występujących w tabeli 2 związana jest z procesami **przewodzenia ciepła**. W tym zakresie dostępne są metody opracowane na gruncie geologii inżynierskiej (Wiłun, 1982) oraz geoter-

miki (Dowgiałło i in., 1969). Identyfikacja parametrów związanych z transportem ciepła dotyczy raczej zagadnień lokalnych, związanych z pozyskiwaniem energii geotermalnej (Chowaniec, 2003). Rozpoznanie regionalne współczynnika przewodnictwa cieplnego oraz ciepła właściwego ośrodków wodonośnych dla potrzeb badań i praktyki hydrogeologicznej wymaga dalszych badań teoretycznych i praktycznych (Górecki red., 1990).

BADANIA MODELOWE W POLSCE

Badania modelowe na stałe weszły do metodyki badań hydrogeologicznych w Polsce. Budowa modelu przepływu wód podziemnych wymusza przeprowadzenie kompleksowego rozpoznania budowy geologicznej, warunków hydrogeologicznych oraz wartości parametrów. Rozpoznanie to musi obejmować nie tylko rejony eksploatacji wód podziemnych, ale także obszary ich zasilania. O ile w rejonach eksploatacji zazwyczaj występuje wystarczająca liczba otworów hydrogeologicznych – studni i piezometrów, to w rejonach zasilania możliwości przeprowadzenia rozpoznania hydrogeologicznego są zazwyczaj znacząco mniejsze. Dlatego stopień rozpoznania hydrogeologicznego jest zwykle lepszy na obszarach eksploatacji wód podziemnych, natomiast w strefach zasilania często brakuje danych o parametrach hydrogeologicznych.

Innym problemem są wysokie koszty badań terenowych, które czasami próbuje się minimalizować poprzez zastąpienie badań terenowych badaniami modelowymi. Wobec braku danych o parametrach hydrogeologicznych próbuje się niekiedy poszukiwać wartości tych parametrów w procesie tarowania modelu. Odbywa się to kosztem wiarygodności modelu, która jest niska przy słabym rozpoznaniu hydrogeologicznym. Model przepływu wód podziemnych może być tylko na tyle wiarygodny, na ile wiarygodne jest rozpoznanie hydrogeologiczne, szczególnie w odniesieniu do wartości wszystkich parametrów.

Konieczne jest zatem zwiększenie wymagań dotyczących wiarygodności parametrów hydrogeologicznych. Można to osiągnąć jedynie poprzez większą liczbę badań związanych z identyfikacją parametrów hydrogeologicznych, zwłaszcza badań terenowych.

NOWE MOŻLIWOŚCI IDENTYFIKACJI PARAMETRÓW HYDROGEOLOGICZNYCH W TERENIE

W metodologii badań naukowych wyróżnia się eksperymenty biernie, związane z prowadzeniem obserwacji, oraz eksperymenty czynne, związane z identyfikacją parametrów obiektu. Eksperyment bierny w żaden sposób nie zakłóca przebiegu obserwowanego procesu. Natomiast podczas eksperymentu czynnego dochodzi do celowego wymuszenia reakcji badanego obiektu, która umożliwia identyfikację jego

parametrów. Wymuszenia stosowane podczas eksperymentów czynnych nazywane są sygnałami identyfikacyjnymi. Ze względu na rodzaj wielkości fizycznej sygnały identyfikacyjne dzieli się na I rodzaju, kiedy następuje zmiana w czasie wielkości intensywnych (potencjał hydrauliczny, koncentracja znacznika, temperatura), oraz II rodzaju, kiedy następuje zmiana w czasie wielkości ekstensywnych (wydatek

przepływu, strumień migracji, strumień ciepła). Ze względu na typ zmienności w czasie sygnały identyfikacyjne w hydrogeologii dzieli się na skokowe, typu Heaviside'a, oraz impulsowe, typu Diraca.

PARAMETRY FILTRACJI WÓD PODZIEMNYCH

Najlepiej opracowano dotąd metody identyfikacji współczynnika filtracji. W strefach zasilania wód podziemnych, gdzie brakuje studni i eksperymenty można przeprowadzić jedynie w piezometrach, stosuje się sygnały identyfikacyjne I rodzaju poprzez wykonanie *slug-testu*, *boil-testu* lub badanie metodą PARAMEX. Natomiast w rejonach eksploatacji wód podziemnych istnieje możliwość wykonania pompowania parametrycznego w hydrowężle hydrogeologicznym. Oznacza to zastosowanie sygnału identyfikacyjnego II rodzaju. Zasady projektowania i budowy hydrowęzłów zostały już dobrze sprawdzone w praktyce hydrogeologicznej. Dobrze opracowana jest też metodyka przeprowadzenia testów i pompowań. Ponadto gotowe jest oprogramowanie, które pozwala na automatyczną interpretację wyników eksperymentów identyfikacyjnych.

Stan badań i zakres zastosowań praktycznych w zakresie identyfikacji współczynnika filtracji można uznać za wzorcowy dla rozważań o identyfikacji pozostałych parametrów hydrogeologicznych.

MIGRACJA ZNACZNIKA PASYWNEGO

W celu rozszerzenia tych możliwości na parametry migracji zanieczyszczeń oraz parametry przewodzenia ciepła należy rozbudować tradycyjny hydroweżel krzyżowy o cztery dodatkowe piezometry. Zespół otworów hydrogeologicznych, studni z ośmioma piezometrami, którego plan pokazano na figurze 1, proponuje się nazwać hydroweżłem parametrycznym.

Piezometry P1N, P1E, P1S oraz P1W służą do obserwacji pompowania parametrycznego. Ich odległość od studni zależy od warunków hydrogeologicznych w rejonie hydroweżła (Pazdro, 1977). Natomiast dodatkowe piezometry P2N, P2E, P2S oraz P2W są przeznaczone do obserwacji procesu migracji znaczników oraz transportu ciepła. Muszą one być zlokalizowane bardzo blisko studni ze względu na realny czas trwania obserwacji procesu migracji znaczników oraz ze względu na wielkość ładunku, jaki trzeba iniekować do warstwy wodonośnej. Zasady lokalizacji dodatkowych piezometrów trzeba dopiero wypracować.

Eksperyment identyfikacyjny ze znacznikiem pasywnym można przeprowadzić z wykorzystaniem sygnału identyfikacyjnego zarówno I, jak i II rodzaju. Może to być skokowa lub impulsowa zmiana koncentracji znacznika w studni. Może to być także skokowa lub impulsowa zmiana strumienia migracji znacznika w studni. Sposób technicznej realizacji takich sygnałów wcale nie jest prosty. Wystarczy uświadomić sobie, że wszelkie zmiany koncentracji znacznika muszą być dokonane przy niezakłóconym strumieniu filtracji wód pod-

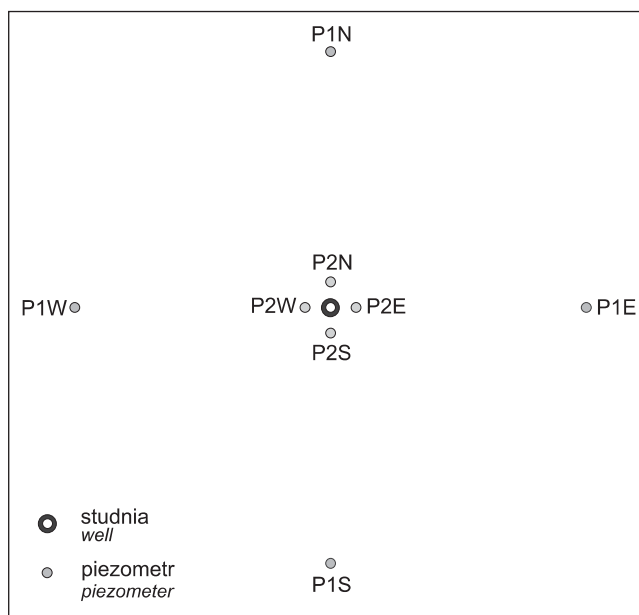


Fig. 1. Plan hydroweżła parametrycznego

Location of a pumping well with piezometers

ziemnych. Do opracowania jest też opis matematyczny takiego eksperymentu, łącznie z jego rozwiązaniem, które ze względu na liczbę poszukiwanych parametrów trzeba będzie przeprowadzić z wykorzystaniem metod optymalizacyjnych (Marciniak i in., 2008). Aby nowy eksperyment identyfikacyjny mógł znaleźć zastosowania praktyczne, potrzebna jeszcze będzie odpowiednia aparatura rejestrująca oraz oprogramowanie do interpretacji wyników i obliczania wartości parametrów hydrogeologicznych.

Pomimo wielu trudności, na jakie musi napotkać realizacja zarysowanego powyżej eksperymentu identyfikacyjnego, warto podjąć badania w kierunku opracowania zasad jego realizacji. Otworzy to bowiem możliwość identyfikacji *in situ* parametrów dyfuzji, dyspersji oraz adwekcji znacznika. A ponadto przy znajomości współczynnika filtracji pojawi się możliwość oznaczenia *in situ* porowatości efektywnej.

MIGRACJA ZNACZNIKA AKTYWNEGO

Analogicznie może przebiegać terenowy eksperyment identyfikacyjny ze znacznikiem aktywnym. W tym przypadku identyfikacji podlegać będą parametry sorpcji oraz kinetyki reakcji. Zarejestrowanie krzywych przejścia znacznika aktywnego w piezometrach P2 wymagać będzie kłopotliwego poboru próbek wody do analiz. Muszą się też pojawić dodatkowe trudności, na które już dziś napotyka identyfikacja realizowana w warunkach laboratoryjnych podczas eksperymentu kolumnowego. Trudności te polegają głównie na znalezieniu właściwego modelu matematycznego procesów sorpcyjnych oraz kinetyki reakcji. Może się też okazać, że nie każdy znacznik będzie mógł być iniekowany do warstwy wodonośnej bez szkody dla jakości wód podziemnych. Pompowanie oczyszczające hydroweżel parametryczny po eks-

perymentach identyfikacyjnych ze znacznikami pasywnymi i aktywnymi nie zawsze musi być skuteczne, zwłaszcza w przypadku znaczników aktywnych.

TRANSPORT CIEPŁA

Warto jeszcze rozważyć celowość wykonywania eksperymentu identyfikacyjnego ze znacznikiem termicznym.

Oprządowanie pomiarowe będzie mogło być w tym przypadku w pełni automatyczne. Realizacja techniczna sygnałów identyfikacyjnych też wydaje się prostsza, bo można ją sprowadzić do umieszczenia w studni grzałki elektrycznej z odpowiednim programem grzania. Opis matematyczny procesu przewodzenia ciepła jest znany i jego rozwiązanie nie powinno nastręczać trudności. Należałoby albo przygotować nowe oprogramowanie identyfikacyjne, albo skorzystać z doświadczeń geotermiki.

PODSUMOWANIE

Ważąc potrzeby i możliwości w zakresie identyfikacji parametrów hydrogeologicznych na potrzeby modelowania przepływu wód podziemnych, trzeba zauważyć dysproporcję pomiędzy dużymi potrzebami i skromnymi możliwościami.

Zarysowany program badań otwiera drogę do opracowania nowych metod identyfikacji wszystkich parametrów hydrogeologicznych w warunkach terenowych. Odpowiednio zaprojektowany hydrowęzeł parametryczny umożliwiłby przeprowadzenie zarówno pompowania parametrycznego, jak i iniekcji znaczników – pasywnego, aktywnego oraz ter-

micznego. Wobec szerokiego i skomplikowanego programu badań w hydrowęzle parametrycznym trzeba postawić wysokie wymagania dotyczące stanu technicznego wszystkich otworów hydrogeologicznych. Do opracowania pozostają: sposób realizacji eksperymentów identyfikacyjnych, opis matematyczny poszczególnych procesów, a także jego rozwiązanie. Konieczne też będzie przyjazne oprogramowanie do interpretacji wyników i obliczania poszukiwanych wartości wszystkich parametrów hydrogeologicznych.

LITERATURA

- BEAR J., 1961 – On the tensor form of dispersion in porous media. *J. Geophys. Res.*, **66**.
- BEAR J., 1972 – Dynamic of fluids in porous media. Dover Publications, New York.
- BOEKER E., van GEONDELLE R., 2002 – Fizyka środowiska. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- BOUWER H., RICE R.C., 1976 – A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or penetrating wells. *Water Res. Research*, **12**, 3.
- BURNETT R.D., FRIND E.O., 1987 – An alternating direction Galerkin technique for simulation of groundwater contaminant transport in tree dimensions, 2, Dimensionality effects. *Water Res. Research*, **23**, 4.
- CHOWANIEC J., 2003 – Wody podziemne niecki podhalańskiej. *W: Współczesne problemy hydrogeologii*, t. 11, cz. 1: 45–53. Gdańsk.
- DOWGIAŁŁO J., KARSKI A., POTOCKI I., 1969 – Geologia surowców balneologicznych. Wyd. Geol., Warszawa.
- FETTER C.W., 2001 – Applied hydrogeology. New York.
- GAWICZ I.K., 1983 – Teoreticzeskije osnovy izuczenija dwizenija podzemnych wod w zemnoj kore. *W: (I.S. Zekcer red.), Osnovy gidrogeologii. T. II: Hidrogeodinamika*. Izd. Nauka, Nowosybirsk.
- GÓRECKI W. (red.), 1990 – Atlas wód geotermalnych Niziny Polskiej. Kraków.
- HERZIG J., SZCZEPAŃSKA J., 1995 – Zastosowanie metody „flow-pump” do badań współczynnika filtracji w gruntach słabo przepuszczalnych. *W: Współczesne problemy hydrogeologii*, t. 7, cz. 2: 289–296. Wyd. Profil, Kraków.
- KATSCHER F., 1976 – Fizyka popularna. Wiedza Powszechna, Warszawa.
- KINZELBACH W., 1986 – Groundwater modeling. Elsevier, Amsterdam.
- KLOTZ D., MAŁOSZEWSKI P., MOSER H., 1988 – Mathematical modeling of radioactive tracer migration in water flowing through saturated porous media. *Radiochim. Acta*, **44/45**.
- MARCINIAK M., 1999 – Identyfikacja parametrów hydrogeologicznych na podstawie skokowej zmiany potencjału hydraulicznego. Metoda PARAMEX. Wyd. Nauk. UAM, Poznań.
- MARCINIAK M., OKOŃSKA M., 2005 – The identification of hydrogeological parameters on the basis of the column experiment modeling. International Workshop “From data gathering and groundwater modeling to integrated management”. Alicante – Spain.
- MARCINIAK M., PRZYBYŁEK J., HERZIG J., SZCZEPAŃSKA J., 1998 – Badania współczynnika filtracji utworów półprzepuszczalnych. Wyd. SORUS, Poznań.
- MARCINIAK M., MAŁOSZEWSKI P., OKOŃSKA M., 2006 – Wpływ efektu skali eksperymentu kolumnowego na identyfikację parametrów migracji znaczników metodą rozwiązań analitycznych i modelowania numerycznego. *Geologos*, **10**.
- MARCINIAK M., KACZMAREK M., OKOŃSKA M., KAZMIERSKA-DROBNY K., 2008 – Identyfikacja parametrów hydrogeologicznych z zastosowaniem numerycznej symulacji krzywej przejścia oraz metod optymalizacyjnych. Sprawozdanie z grantu MNiSW 3223/T02/2006/31, UAM Poznań.

- NAWALANY M., 1999 – Zagadnienie skali w hydrogeologii. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **388**: 179–193.
- OLSEN H.W., NICHOLS R.W., RICE T.L., 1985 – Low gradient permeability measurements in triaxial system. *Geotechnique*, **35**, 2.
- PAZDRO Z., 1977 – Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geol., Warszawa.
- SKEMPTON A.W., 1994 – The pore-pressure coefficients A and B. *Geotechnique*, **4**.
- WIŁUN Z., 1982 – Zarys geotechniki. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- WITCZAK S., ADAMCZYK A., 1994 – Katalog wybranych fizycznych i chemicznych wskaźników zanieczyszczeń wód podziemnych i metod ich oznaczania. T. I. Bibl. Monit. Środ., Warszawa.

SUMMARY

The present studies of groundwater flow modelling include models of water filtration, migration of pollutants and heat flow. Modelling studies quality is dependent on reliability of input data, including hydrogeological parameters. The paper presents a mathematical description of groundwater flow and an overview of software used for groundwater flow modelling. A list of hydrogeological parameters necessary for modelling studies is presented. Previously used methods of hydrogeological parameters determination are critically assessed. Estimation of hydrogeological parameters, based on either literature data or analogy to areas with similar geology and hydrogeology, are not reliable. Establishing of parameter values on the basis of empirical formulae or laboratory experiments is also unsatisfactory. The most desired method of hydrogeological parameters identification is field research. However, only methods of permeability coefficient

determination in the field are well developed. There are no methods for in situ determination of remaining parameters of groundwater filtration, migration of pollutants and heat flow. It is suggested to extend a traditional pumping well with observation wells for parameters identification by four additional observation wells located near the pumping well. The suggested new pumping well with observation wells for parameters identification is named 'parametrical', because it should allow in situ determination of pollutant migration parameters and heat flow along with groundwater filtration parameters. Conditions necessary to perform identification experiments for passive tracer, active tracer and thermal tracer migration are analysed. The outlined research program creates new perspectives for determination of new identification methods for all the hydrogeological parameters during field studies.