

## KILKA UWAG O MODELOWANIU FILTRACJI WÓD PODZIEMNYCH

### A FEW REMARKS ABOUT GROUNDWATER MODELLING

ROBERT ZDECHLIK<sup>1</sup>, RYSZARD KULMA<sup>1</sup>

**Abstrakt.** Obecnie modelowanie przepływu wód podziemnych jest podstawową metodą rozwiązywania skomplikowanych problemów hydrogeologicznych. Szerokie zainteresowanie modelowaniem numerycznym pojawiło się w latach 80. XX w., jako wynik ułatwionego dostępu do komputerów klasy PC i programów symulacyjnych dostosowanych do ich możliwości. Głównymi zaletami numerycznego modelowania są prędkość, dokładność i wiarygodność obliczeń. Modelowanie wymaga jednak przede wszystkim zrozumienia procesów i zjawisk oraz właściwego podejścia, polegającego na łączeniu wiedzy geologicznej z możliwościami sprzętu komputerowego i programów obliczeniowych. Ważnymi cechami modelowania są możliwości wykonywania prognoz i prezentacji wyników w postaci bilansu wodnego oraz graficznie, w formie map hydroizohips wraz z liniami prądu.

**Słowa kluczowe:** model hydrogeologiczny, filtracja wód podziemnych.

**Abstract.** Nowadays groundwater flow modelling is the basic method of solving complicated hydrogeological problems. Wide interests of numerical modelling started in the 1980s as a result of easier access to personal computers and calculation programs adjusted to PC capabilities. The main advantages of numerical modelling are speed, accuracy and reliability of calculations. Groundwater modelling require first of all both understanding flow processes and phenomena as well as appropriate approach, based on connecting geological knowledge with computer hardware and software capabilities. Important attributes of groundwater modelling are possibilities to make predictions and presenting results as a water budget or water table contour maps with flow lines.

**Key words:** groundwater model, groundwater filtration.

### WSTĘP

Dokumentowanie zasobów wód podziemnych i racjonalne gospodarowanie nimi, wspomaganie projektowania ujęć i wyznaczenie dla nich stref ochronnych, szacowanie wielkości dopływów do kopalń, wyrobisk górniczych i innych systemów drenażowych, a także ocena możliwych skutków oddziaływania składowisk lub innych budowli hydrotechnicznych na środowisko wodne – to tylko niektóre z licznych zagadnień wymagających wiarygodnych i dokładnych obliczeń prognostycznych. Aby tym zadaniom sprostać, w obliczeniach hydrogeologicznych należy wykorzystywać takie metody, które najlepiej opisują zjawiska przepływu wód podziemnych.

Techniki symulacji przepływu wód podziemnych i transportu masy na modelach numerycznych zaczęły rozwijać się względnie niedawno, bo z początkiem lat 70. XX w. (Emsellem, 1975; Szymanko, 1980). Szerokie zainteresowanie taką metodą modelowania pojawiło się w latach 80. ubiegłego stulecia, jako wynik ułatwionego dostępu do komputerów klasy PC i programów symulacyjnych dostosowanych do ich możliwości. Wykorzystanie metod modelowania zwiększyło się wraz z rozwojem technik informatycznych i systemów informacji geograficznej (GIS). Obecnie numeryczne modelowanie przepływu wód podziemnych i migracji zanieczyszczeń w ośrodku skalnym jest podstawową metodą rozwiązy-

<sup>1</sup> Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

wania skomplikowanych problemów hydrogeologicznych. Modelowanie wymaga jednak przede wszystkim zrozumienia procesów i zjawisk oraz właściwego podejścia, polegającego na łączeniu wiedzy geologicznej z możliwościami programów obliczeniowych. Ważną cechą modelowania jest prezentacja wyników w postaci bilansu wodnego oraz graficznie w formie map i wykresów.

Większość stosowanych obecnie programów symulacyjnych do obliczeń filtracji w obrębie systemów wodonośnych cechuje się zbliżoną ideą funkcjonowania. Struktura pakietów programowych pozwala zwykle na wyróżnienie części związanej z tworzeniem modelu, wprowadzaniem i edycją danych wejściowych (tzw. preprocesory), części odpowiedzialnej bezpośrednio za wykonanie obliczeń symulacyjnych (tzw. procesory) oraz części związanej z wizualizacją osiągniętych rezultatów (tzw. postprocesory) w postaci m.in. bilansów wodnych i map wynikowych. Pakiety programowe wykorzystujące metodę różnic skończonych (FDM – *Finite-Difference Method*) bazują najczęściej na programie obliczeniowym MODFLOW (<http://waters.usgs.gov/nrp/gwsoftware/modflow.html>), służącym do symulacji trójwymiarowego przepływu wód podziemnych w ośrodkach porowych. Program MODFLOW został stworzony na początku lat 80. przez Służbę Geologiczną Stanów Zjednoczonych (*U.S. Geological Survey*) i w kolejnych wersjach rozwojowych jest z powodzeniem stosowany do dziś.

Doświadczenie wskazuje, że raz opracowany model hydrogeologiczny jest zwykle wielokrotnie wykorzystywany jako narzędzie badawcze. Potrzeba wykonania bieżącej aktualizacji obliczeń prognostycznych wynika z postępujących zmian sytuacji rzeczywistej. Zaletą tej metody okazuje się wówczas możliwość łatwej adaptacji istniejącego modelu poprzez proste wprowadzanie poprawek bądź uzupełnień.

Przygotowanie modelu numerycznego i wykonanie obliczeń symulacyjnych jest procesem złożonym, przebiegającym jednak według określonego porządku. Szczegółowo proces modelowania filtracji wód prezentują m.in. Anderson i Woessner (1991), Spitz i Moreno (1996), a także Kulma i Zdechlik (2009). Poniżej scharakteryzowano główne etapy badań modelowych.

Przygotowanie modelu numerycznego i wykonanie obliczeń symulacyjnych jest procesem złożonym, przebiegającym jednak według określonego porządku. Szczegółowo proces modelowania filtracji wód prezentują m.in. Anderson i Woessner (1991), Spitz i Moreno (1996), a także Kulma i Zdechlik (2009). Poniżej scharakteryzowano główne etapy badań modelowych.

## ZROZUMIENIE SYSTEMU RZECZYWISTEGO

Zrozumienie systemu rzeczywistego jest wynikiem gromadzenia, kompilacji, a często również ponownej interpretacji danych, uzyskanych na podstawie rozpoznania warunków środowiskowych. Przedmiotem zainteresowania jest głównie: rozprzestrzenienie i zmienność warstw wodonośnych, utworów słabo przepuszczalnych oraz izolujących, warunki zasilania i drenażu w wydzielonych piętrach wodonośnych, położenie zwierciadła wody i główne kierunki przepływu strumieni wód podziemnych oraz czynniki antropogeniczne wpływające na stan aktualny (początkowy) i/lub mo-

gące oddziaływać na stany prognozowane (końcowe). Prawidłowe zrozumienie funkcjonowania rzeczywistego systemu wodonośnego jest warunkiem poprawnej konstrukcji modelu i wiarygodności badań symulacyjnych. Od kompletności rozpoznania ośrodka skalnego oraz wszystkich głównych czynników mających wpływ na kształtowanie kierunków i wielkości przepływów filtracyjnych zależy, czy model będzie możliwie najlepiej odpowiadał warunkom rzeczywistym z punktu widzenia potrzeb, kosztów i dostępności danych wejściowych.

## SCHEMATYZACJA SYSTEMU WODONOŚNEGO

Schematyzacja systemu wodonośnego ma prowadzić do ograniczenia obszaru filtracji związanego z przyjęciem konkretnych granic modelu, wydzielenia warstw wodonośnych i słabo przepuszczalnych oraz stworzenia koncepcji funkcjonowania systemu wodonośnego (wyjaśnienie warunków formowania strumieni filtracji, poziomych dróg przepływu i pionowej wymiany wody). W badaniach modelowych naturalny system wodonośny jest reprezentowany przez model pojęciowy (koncepcyjny), będący uproszczeniem rzeczywistych warunków hydrogeologicznych. Do jego utworzenia potrzebny jest szeroki zakres informacji o systemie naturalnym. Model numeryczny może funkcjonować poprawnie pod warunkiem, że właściwie został skonstruowany model koncepcyjny.

Schematyzacja warunków hydrogeologicznych powinna prowadzić do wskazania istotnych elementów budowy geo-

logicznej oraz innych czynników przyrodniczych i techniczno-eksploatacyjnych, które determinują przepływ wód podziemnych. Zakres schematyzacji powinien odzwierciedlać aktualny stan rozpoznania budowy geologicznej oraz warunków zasilania i drenażu warstw wodonośnych na całym obszarze badań.

Tworzenie każdego modelu hydrogeologicznego rozpoczyna się od wstępnego wyznaczenia jego poziomych i pionowych granic. W większości przypadków mają one charakter naturalny i związane są z rozprzestrzenieniem struktury wodonośnej oraz głębokością, do której obserwowana jest aktywna wymiana wody. Zwykle o przyjęciu tych granic decydują uwarunkowania geologiczne, wskazujące na zasięg występowania utworów wodonośnych i zaleganie nieprzepuszczalnego podłoża.

## SELEKCJA MODELU

Selekcja modelu to działania polegające na wyborze metody badań numerycznych związanej z pakietem programowym wykorzystywanym do utworzenia modelu i wykonania na nim obliczeń symulacyjnych. W ramach selekcji modelu dokonuje się także podziału obszaru filtracji na bloki obliczeniowe, definiuje warunki początkowe i brzegowe oraz tworzy tablice zawierające niezbędne parametry, a także inne wielkości (infiltracyjne zasilanie przez opady atmosferyczne, pobór wody przez studnie itp.).

Dyskretyzacja obszaru filtracji prowadzi do jego podziału na pola elementarne (bloki obliczeniowe), w obrębie których przyjmuje się średnie wartości parametrów hydrogeologicznych (charakteryzujących ośrodek skalno-gruntowy) i parametrów strumienia wód podziemnych (opisujących położenie zwierciadła wody). W tym stanie rzeczy znaczenia nabiera taki podział obszaru filtracji, który, przy określonej liczbie bloków obliczeniowych, pozwala uzyskać możliwie dużą dokładność rozwiązania, odwzorowując rozpoznaną zmienność parametrów filtracyjnych obszaru, jego kształt, liczbę i rodzaj źródeł wewnętrznych itp.

Przeprowadzenie obliczeń symulacyjnych dla przyjętego obszaru filtracji staje się możliwe z chwilą realizacji na modelu warunków granicznych rozwiązania. Stanowią je warunki początkowe i brzegowe. Prawidłowość ich przyjęcia bezpośrednio rzutuje na jakość uzyskanych wyników i ich wiarygodność.

**Warunki początkowe** określają wartości funkcji  $H$  (położenie zwierciadła wody, wysokość hydrauliczna) na całym obszarze filtracji w momencie czasu  $t_0$ , przyjmowanym jako początek rozwiązania:

$$H = f(x, y, z, t_0). \quad [1]$$

Przyjęcie tych warunków jest konieczne w przypadku prowadzenia obliczeń filtracji zmiennej w czasie (nieustalonej). Dla ruchu ustalonego warunki początkowe nie spełniają istotnej roli, gdyż nie wpływają na końcowy rezultat; stanowią tylko wysokość zwierciadła (tzw.  $H$  startowe), od której rozpoczyna się proces obliczeniowy.

**Warunki brzegowe** charakteryzują przyjęte w obliczeniach zasady zmian naporu hydrostatycznego i wydatku strumienia wód podziemnych na granicach zewnętrznych bądź wewnątrz obszaru filtracji. W zależności od elementu rozpoznania hydrogeologicznego, z którym są związane, mogą mieć charakter punktowy (np. eksploatowane studnie), liniowy (przebieg rzek, działów wodnych, wybranych hydroizohips) lub powierzchniowy (obszar zasilania opadami atmosferycznymi). Wyróżnić można trzy rodzaje warunków (Szczeniński, 1977; Flisowski, Wieczysty, 1979).

Warunki brzegowe I rodzaju (Dirichleta) określają wartość funkcji  $H$  na brzegu obszaru (warunki zewnętrzne) lub w jego wnętrzu (warunki wewnętrzne):

$$H = f(x, y, z, t). \quad [2]$$

W modelowaniu przepływów filtracyjnych wymusza się je, zadając w bloku obliczeniowym wysokość zwierciadła wody, która może być wielkością stałą  $H = \text{const}$  (warunki ustalone) lub zmieniającą się w czasie  $H = f(t)$  (warunki nieustalone). W tym drugim przypadku zmienność wysokości hydraulicznej może być realizowana jedynie pomiędzy kolejnymi krokami czasowymi, zachowując stałość w ich obrębie.

Warunki brzegowe II rodzaju (Neumanna) określają wartość przepływu na brzegu obszaru lub w jego wnętrzu, wyrażoną przez pochodną funkcji  $H$  w kierunku normalnym do kierunku przepływu wody w warstwie wodonośnej:

$$Q = \frac{\partial H}{\partial n_{\perp}} = f(x, y, z, t) \quad [3]$$

Na modelu realizuje się je w postaci stałego  $Q = \text{const}$  (warunki ustalone) lub zmiennego w czasie  $Q = f(t)$  (warunki nieustalone) wydatku wody wpływającej lub wypływającej z bloku obliczeniowego.

Warunki brzegowe III rodzaju (Robbinsa, zwane również warunkami Dirichleta-Neumanna) stanowią liniową kombinację warunków I i II rodzaju i oznaczają stałą (w ustalonych warunkach filtracji) lub zmienną (w warunkach nieustalonych) przepływ, zwykle o kierunku pionowym, zachodzący w wyniku zmian różnicy ciśnień:

$$H(x, y, z, t) + \frac{\partial H}{\partial n_{\perp}} = f(x, y, z, t) \quad [4]$$

Warunki brzegowe III rodzaju realizowane są w tych blokach modelu, w których ruch strumienia wód podziemnych jest utrudniony przez dodatkowy opór wynikający z czynników naturalnych bądź antropogenicznych. Warunki te polegają na wymuszeniu wielkości zasilania (przesączenie), będącego funkcją wysokości położenia zwierciadła wody w modelowanym elemencie (cieku powierzchniowym, warstwie zasilającej itp.), obliczonej w danym bloku rzędnej zwierciadła wód podziemnych, oraz przewodności (najczęściej pionowej) warstwy stwarzającej dodatkowy opór (np. warstwy kolmatacyjnej utrudniającej kontakt hydrauliczny wód powierzchniowych i podziemnych, warstwy osadów słabo przepuszczalnych lub też sztucznej przegrody przeciwnofiltracyjnej).

Przy tworzeniu modelu wstępnie zakłada się, że wszystkie bloki są aktywne, tzn. będą brały czynny udział w procesie obliczeniowym. Rzeczywistość zwykle jednak odbiega od takiego schematu, co wymusza potrzebę dostosowania modelu do rozpoznanej sytuacji. Temu celowi służy tablica warunków brzegowych, w obrębie której definiuje się charakter poszczególnych bloków modelu (aktywne, nieaktywne, aktywne z zadeklarowanymi warunkami brzegowymi I rodzaju  $H = \text{const}$ ).

Poziomym ograniczeniem bloków obliczeniowych zdefiniowanych w przestrzeni filtracyjnej jest położenie ich górnej i dolnej powierzchni, wyznaczone przez strop i spąg mo-

delowanych warstw wodonośnych oraz utworów słabo przepuszczalnych. Najczęściej ustalenie tych wielkości wynika bezpośrednio z rozpoznania warunków hydrogeologicznych, a tylko wyjątkowo zakłada się inne, umownie przyjmowane powierzchnie.

Podział przestrzeni filtracyjnej na bloki obliczeniowe umożliwia przypisanie im wielkości charakteryzujących naturalne środowisko wodno-gruntowe i zachowanie się w nim wód podziemnych. Przyjmowane parametry hydrogeologiczne powinny zapewnić poprawne odwzorowanie na modelu rzeczywistych warunków przepływu strumienia filtracji.

Jednoznacznie zdefiniowany w obliczeniach symulacyjnych powinien być parametr czasu. Wybrana jednostka ma ścisły związek z innymi parametrami hydrogeologicznymi, w których często występuje jako kombinacja z jednostką długości, np. m/d lub m<sup>2</sup>/d.

Utworzenie tablicy początkowego zwierciadła wody odpowiada określeniu warunków początkowych, rozumianych jako położenie zwierciadła wody w momencie czasu  $t = 0$ , przyjmowanym za wyjściowy dla rozwiązania prognostycznego.

Współczynnik filtracji poziomej jest podstawowym parametrem wyrażającym przepuszczalność ośrodka skalnego dla wody podziemnej. Odpowiada prędkości filtracji przy spadku hydraulicznym równym jedności (tylko w warunkach, gdy spełnione jest liniowe prawo Darcy'ego). Jego wartość, według wielu klasyfikacji właściwości filtracyjnych skał (Marciniak i in., 1999), decyduje o roli, jaką dane utwory mogą spełniać przy ruchu wody.

W układach wielowarstwowych oprócz ruchu poziomego występuje również wymiana wody pomiędzy poszczególnymi warstwami. Wielkość pionowego przesączania zależy przede wszystkim od zdolności utworów geologicznych do transmisji wody w tym kierunku. Charakteryzuje ją przewodność pionowa, odpowiadająca ilorazowi pionowego współczynnika filtracji warstwy słabo przepuszczalnej i jej miąższości ( $T^\circ = k^\circ/m^\circ$ ).

Wykonanie badań na modelu hydrogeologicznym wymaga często uwzględnienia specyficznych czynników decydujących o warunkach formowania strumieni filtracji i wpły-

wających na układ pola hydrodynamicznego. Moduły realizujące poszczególne wymuszenia mogą być stosowane fakultatywnie, w zależności od rozpatrywanej sytuacji.

Wielkość zasilania infiltracyjnego określana jest z uwzględnieniem wysokości opadów atmosferycznych i wykształcenia litologicznego utworów strefy aeracji. Powierzchniowe zasilanie warstwy wodonośnej pochodzące z infiltracji opadów w badaniach modelowych traktowane jest jako warunek brzegowy II rodzaju.

Z uwagi na powszechność występowania ujęć studziennych, w większości programów obliczeniowych symulacja pracy studni odbywa się przy zastosowaniu warunku II rodzaju ( $Q = \text{const}$ ). Studnie można również symulować przy wykorzystaniu warunku brzegowego I rodzaju ( $H = \text{const}$ ). Istnieje także możliwość zamodelowania studni warunkiem brzegowym III rodzaju, z wymuszeniem rzeczywistej depresji zwierciadła wody ( $s_{st} = H_{zw} - H_{st}$ ). Można to osiągnąć poprzez symulację dodatkowego oporu, wynikającego z przewodności hydraulicznej studni  $T_h$  (Kulma, Zdechlik, 2009). Określenie rzeczywistej wielkości obniżenia poziomu zwierciadła wody w studni eksploatacyjnej pozwala na ocenę warunków odbioru wody z warstwy wodonośnej oraz umożliwia właściwe zaprojektowanie otworu studziennego. Niezbędne jest przeliczenie prognozowanej depresji w bloku obliczeniowym na realną depresję w studni oraz określenie maksymalnej długości części roboczej filtru  $l_{max}$ .

Oddziaływanie cieków powierzchniowych na wody podziemne można symulować warunkiem brzegowym III rodzaju. Wielkość przesączania jest obliczana przy założeniu, że pomiędzy rzeką a warstwą wodonośną istnieje niepełna więź hydrauliczna. Wynika ona najczęściej z występowania utworów słabo przepuszczalnych wyściełających koryto cieków.

Ogólnie sformułowany model numeryczny po wypełnieniu wymaganych tablic danych wejściowych przeistacza się w specyficzny dla danej lokalizacji prototyp modelu systemu wodonośnego. Staje się on pełnowartościowym modelem numerycznym pod warunkiem poprawnego przeprowadzenia na nim procesów kalibracji i weryfikacji.

## ZASTOSOWANIE MODELU

Zastosowanie modelu to końcowy etap badań symulacyjnych, w którym uzyskuje się ostateczny wynik rozwiązania. W pierwszej kolejności należy dokonać wyboru procedury obliczeniowej, odpowiedniej dla realizowanego zadania. Wybór ten uzależniony jest od stopnia komplikacji realizowanego zadania (modelu). Kolejną czynnością, po wybraniu procedury obliczeniowej, jest uruchomienie obliczeń symulacyjnych.

W początkowej fazie obliczeń dąży się zwykle do odtworzenia na modelu określonego stanu hydrodynamicznego, stwierdzonego rozpoznaniem terenowym. Działania z tym związane, zwane kalibracją oraz weryfikacją modelu, mają na celu przewyższenie niedostatku danych wejściowych

oraz ocenę zasadności wprowadzonych na modelu uproszczeń systemu naturalnego. Ta faza badań, polegająca na odtworzeniu na modelu określonych stanów i przepływów wód podziemnych, ma wykazać prawidłowość przeprowadzonej schematyzacji hydrogeologicznej i przyjęcia parametrów filtracyjnych. W trakcie kalibracji wartości symulowane (np. położenie zwierciadła wody, natężenia przepływów) są porównywane z wynikami pomiarów terenowych. Uzyskanie zadowalającej zgodności pomiędzy stanem hydrodynamicznym stwierdzonym pomiarami terenowymi a rozkładem wysokości hydraulicznych obliczonym na modelu oraz zgodności pomiędzy dopływami pomierzonymi i symulowanymi, świadczy o poprawności przeprowadzonej kalibracji i wery-

fikacji. Stanowi to gwarancję wiarygodności wyników uzyskanych na dalszym etapie badań, obejmującym prognozę hydrogeologiczną.

Przedstawienie prognozy hydrogeologicznej jest wynikiem zasadniczej fazy obliczeń symulacyjnych, w której model demonstruje swoją przewagę nad innymi sposobami rozwiązywania skomplikowanych zadań związanych z przepływem wód podziemnych. Sprawdzone pod względem zasadności i wiarygodności model numeryczny, po wprowadzeniu nowych lub zmodyfikowaniu istniejących warunków brzegowych rozwiązania, powinien wskazać skutki, jakie w środowisku wód podziemnych spowodują zmiany wynikające z realizacji założeń projektowych rozpatrywanego przedsięwzięcia.

Wynikiem rozwiązania na modelu numerycznym są liczby charakteryzujące położenie zwierciadła wody w centrach bloków obliczeniowych oraz przepływy filtracyjne pomiędzy nimi. Ocena przepływów filtracyjnych w obrębie modelowanej struktury hydrogeologicznej (lub jej części) wymaga przedstawienia szczegółowego bilansu wodnego. Charak-

teryście ilościowej, wskazującej na wielkości zasilania i drenażu, powinien być poddany każdy kompleks wodonośny lub wydzielona warstwa.

Podstawowym graficznym sposobem prezentacji rezultatów obliczeń symulacyjnych są mapy prognozowanego (także odtworzonego) położenia zwierciadła wód podziemnych. Wizualizacja pola filtracji, wykonana dla wszystkich zrealizowanych wariantów obliczeń symulacyjnych, jest istotnym czynnikiem umożliwiającym dokonanie kompleksowej oceny przewidywanych skutków zamierzonej ingerencji w środowisko wodno-gruntowe. Badania symulacyjne umożliwiają również obliczenie wielkości zmian położenia zwierciadła wód podziemnych (depresji), wywołanych oddziaływaniem urządzeń i budowli hydrotechnicznych (studni i ujęć wód podziemnych, rowów i drenów, zapór wodnych i stopni piętrzących, górniczych systemów odwadniających i in.).

Zrealizowano w ramach badań własnych prowadzonych w Katedrze Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej AGH (umowa 10.10.140.462).

## LITERATURA

- ANDERSON M.P., WOESSNER W.W., 1991 – Applied groundwater modelling: simulation of flow and advective transport. Academic Press, San Diego, New York, Boston, London, Sydney, Tokyo, Toronto.
- EMSELLEM Y., 1975 – Budowa modeli matematycznych w hydrogeologii. Wyd. Zjedn. Przeds. Hydrogeol. – Przeds. Hydrogeol. w Poznaniu, Poznań.
- FLISOWSKI J., WIECZYSTY A., 1979 – Analogowe dyskretne modelowanie ujęć wody podziemnej. Wyd. Geol., Warszawa.
- KULMA R., ZDECHLIK R., 2009 – Modelowanie procesów filtracji. Wyd. AGH, Kraków.
- MARCINIAK M., PRZYBYŁEK J., HERZIG J., SZCZEPAŃSKA J., 1999 – Badania współczynnika filtracji utworów półprzepuszczalnych. Wyd. Sorus, Poznań – Kraków.
- SPITZ K., MORENO J., 1996 – A practical guide to groundwater and solute transport modelling. John Wiley & Sons, Inc., New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.
- SZCZEPAŃSKI A., 1977 – Dynamika wód podziemnych. Skrypt uczelniany AGH nr 577. Wyd. Geol., Warszawa.
- SZYMANO J., 1980 – Koncepcje systemu wodonośnego i metod jego modelowania. Wyd. Geol., Warszawa.

## SUMMARY

This paper presents main principles of groundwater flow modelling, which is the basic method of solving complicated hydrogeological problems. Wide interests of numerical modelling started in the 1980s as a result of easier access to personal computers and calculation programs adjusted to PC capabilities. The main advantages of numerical modelling are speed, accuracy and reliability of calculations. Groundwater modelling requires first of all understanding flow processes and phenomena, and appropriate approach as well as, based on connecting geological knowledge with computer hardware and software capabilities. Important attributes of groundwater modelling are possibilities for predictions and graphical presentation of the results. Nowadays, functionality of different groundwater simulation programs is similar. So called preprocessors are used to prepare or edit data, processors are used for simulation calculations, and post-proces-

sors allows visualizing the results of predictions. As a main calculation FDM processor shall be deemed the MODFLOW program (modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model), developed by USGS. This program simulates steady state or transient flow in an irregularly shaped groundwater system, with aquifer layers under confined, unconfined or mixed conditions. Hydraulic conductivities or transmissivities for any layer may differ spatially. Flow from external stresses (such as flow to wells, drains, recharge, flow through river beds, and others) can be simulated as boundary conditions. After preparing all data, a calibration process is needed to estimate unknown conditions and uncertainty in input data. To visualize predictions, efficient programs are available, which enables presenting results as a water budget, contour maps of hydraulic heads or drawdowns, pathlines, flow-velocities etc.