



Modelowanie wód podziemnych na terenach górniczych z wykorzystaniem oprogramowania FEFLOW

Sławomir Sitek¹



FEFLOW groundwater modelling of mine sites. *Prz. Geol.*, 65: 1451–1459.

Abstract. Development of groundwater flow, and solute and heat transport models for underground and open-pit mining areas is a challenging and very complex issue. Despite the fact, models play an increasingly common role in mine water management. The aim of the paper is to present and illustrate theoretical aspects and practical strategies facilitating groundwater model set-up for mine sites by means of FEFLOW software. FEFLOW solved governing equations based on finite elements methods, which enables users to create models with very flexible meshing strategies including time-varying geometries. Unstructured and structured mesh generators allow creating very complex geological settings and with complex geometrical designs, as found for example in mine dewatering (open-cast geometry, inclined dewatering wells, inclined faults), or underground structures (pipes, tunnels, shafts etc.).

In order to obtain reliable results and reduce uncertainty in provided forecast for mine sites, groundwater models often should be developed for transient condition and involve unsaturated flow and transport, fracture flow, density effects, chemical reactions, or time-varying behaviour of boundary conditions and material properties (such as conductivity or porosity). FEFLOW enables groundwater modeller set-up these all physical processes and via plug-ins extended functionality by integrated FEFLOW models with other models: geochemical (PHREEQC), watershed (MIKE 11, Hydro River) or develop user own plug-ins. Considering the above, FEFLOW seems to be appropriate software for accurate and reliable models development for mine sites, and an interesting alternative for more widely used MODFLOW models in Poland.

Keywords: groundwater modelling, mine sites, FEFLOW, finite elements

W hydrogeologii górniczej coraz większą rolę odgrywają wyliczenia wielkości dopływów wód podziemnych i ich prognozy, określone na podstawie numerycznych modeli przepływu wód. Są one wykorzystywane na wszystkich etapach działalności górniczej – od planowania i dokumentowania udostępnienia złoża poprzez eksploatację aż do likwidacji kopalni (Szczepański, 2010). Badania modelowe umożliwiają lepsze zrozumienie i precyzyjniejsze określenie wpływu eksploatacji górniczej na środowisko wodne. Służą zarówno do rozwiązywania problemów wynikających z przekształceń ilościowych, np. do określania zasięgu leja depresji, szacowania dopływu wód do wyrobisk, optymalizacji odwadniania studniami głębinowymi, jak i jakościowych, dotyczących np. wymywania zanieczyszczeń ze zwałowisk górniczych.

Budowa modelu numerycznego i prognozowanie zmian krążenia wód podziemnych na kolejnych etapach rozwoju kopalni są uzależnione od kilku kroków. Pierwszym z nich jest dostęp do materiałów archiwalnych (danych wejściowych). Na podstawie analizy tych danych są charakteryzowane elementy hydrostrukturalne i hydrodynamiczne systemu wodonośnego, w którym znajduje się kopalnia. Drugi krok obejmuje skonstruowanie modelu konceptualnego, który – w zależności od celu badań i interpretacji informacji o systemie wodonośnym – umożliwia opisowe określenie, jak dany obszar badań zostanie odwzorowany w modelu numerycznym. Trzeci krok to wybór odpowiedniego oprogramowania, które posłuży do budowy, kalibracji i weryfikacji modelu numerycznego, a następnie do wykonywania symulacji prognostycznych.

CEL PRACY

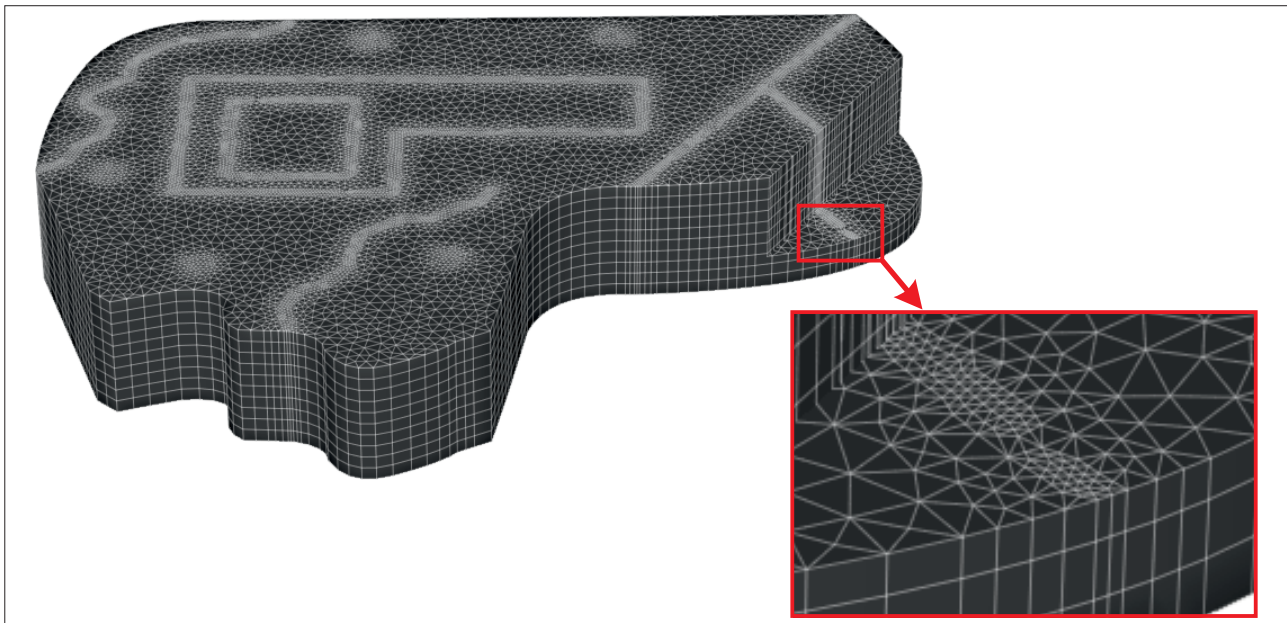
Modele numeryczne tworzone w Polsce, w tym te opisujące warunki hydrogeologiczne na terenach górniczych, najczęściej bazują na kodzie obliczeniowym MODFLOW (McDonald, Harbaugh, 1988). Do rozwiązywania równań przepływu wód podziemnych stosuje się w nim metodę różnic skończonych.

Celem artykułu jest natomiast przedstawienie i zilustrowanie aspektów teoretycznych oraz praktycznych strategii ułatwiających modelowanie wód podziemnych na terenach górnictwa odkrywkowego i podziemnego za pomocą oprogramowania FEFLOW, w którym równania matematyczne są rozwiązywane z wykorzystaniem metody elementów skończonych (Diersch, 2014). Poznanie wybranych, specyficznych możliwości i funkcji programu FEFLOW może być także wykorzystane w modelowaniu innych zagadnień, np. dotyczących symulowania procesów związanych z przepływem wód podziemnych, transportem masy i ciepła.

DYSKRETYZACJA OBSZARU

Każdy model numeryczny wymaga dyskretyzacji obszaru badań. Jest to proces polegający na zamianie ośrodka ciągłego na zbiór podobszarów, zwanych blokami lub elementami obliczeniowymi, w celu umożliwienia zastosowania do obliczenia równania filtracji wód podziemnych metody różnic skończonych lub elementów skończonych. Program FEFLOW (Diersch, 2014) bazuje

¹ Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski, ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec; slawomir.s.sitek@us.edu.pl.



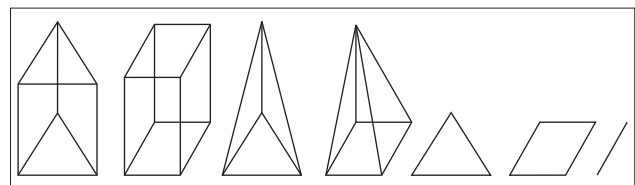
Ryc. 1. Przykład dyskretyzacji modelowanego obszaru metodą elementów skończonych
Fig. 1. Example of discretization model area by means of finite element method

na metodzie elementów skończonych, co daje sposobność do tworzenia bardzo dokładnej siatki dyskretyzacyjnej. Podział modelu na trójkątne bloki obliczeniowe (od wersji 7.0 programu obok elementów trójkątnych mogą współwystępować także elementy czworokątne i sześciokątne) umożliwia precyzyjne i wierne odwzorowanie skomplikowanych elementów struktury modelowanego systemu wodonośnego, takich jak np. przebieg uskoku, rzek, granic odkrywek, sztolni itp. (ryc. 1).

Istotnym aspektem tworzenia siatki dyskretyzacyjnej w programie FEFLOW jest możliwość dodatkowego zagęszczania elementów siatki wokół wybranych obszarów modelu – i to na każdym etapie jego budowy – w celu dostosowania liczby węzłów siatki do oczekiwanej dokładności rozwiązania równania przepływu wód podziemnych, transportu masy lub też ciepła, np. dokładniejszego wykreślenia zasięgu leja depresji w rejonie czynnej studni (ryc. 1).

Dotychczasowe rozwiązania, do wersji programu FEFLOW 6.2 włącznie, charakteryzują się pełną elastycznością siatki w wymiarze 2D i bardzo łatwą budową modeli 3D – z pewnym jednak ograniczeniem, wynikającym z automatycznego przenoszenia lokalnie zagęszczonej siatki dyskretyzacyjnej z jednej warstwy do wyżej- i niżejleżących warstw modelu (ryc. 1).

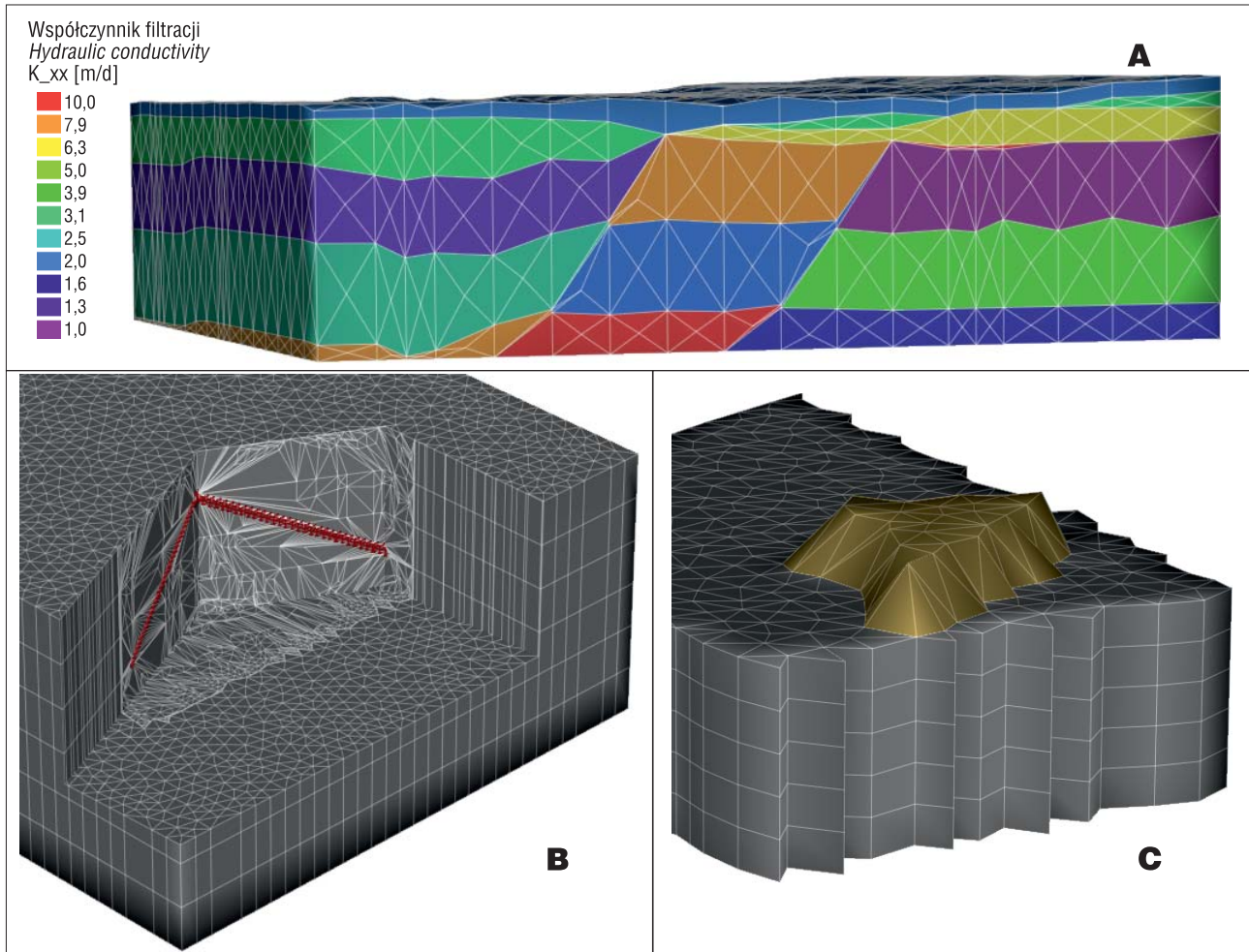
Jednak od wersji programu FEFLOW 7.0 możliwości generowania siatki dyskretyzacyjnej modelu uległy daleko idącym zmianom. Zastosowanie nowego generatora siatek TeTGen – *A Quality Tetrahedral Mesh Generator and a 3D Delaunay Triangulator* (Si, 2013, 2015) znacznie rozszerzyło bibliotekę elementów, z których może być zbudowana siatka modelu (ryc. 2). Wykorzystanie do tego celu między innymi elementów czworosiecznych umożliwiło zupełnie nowy poziom precyzji w odwzorowaniu skomplikowanego ośrodka geologicznego. Nowy generator siatek uwalnia także od konieczności budowy modeli trójwymiarowych jako wzajemnie na siebie nałożonych warstw (ryc. 3). Rozwiązanie to sprzyja znacznie lepszej możliwości odwzorowania geometrii układu geologicznego modelo-



Ryc. 2. Biblioteka elementów w FEFLOW 7
Fig. 2. Library elements in FEFLOW 7

wanych struktur. TeTGen jest szczególnie przydatny do odwzorowania warstw i struktur nieciągłych, np. wyklinowujących się warstw, wychodni starszego podłoża, soczewek, powierzchni uskoku, w tym uskoku listrycznych (ryc. 3A). W związku z nowym podejściem do dyskretyzacji obszaru badań i możliwością budowy skomplikowanych, trójwymiarowych struktur hydrogeologicznych, zastosowanie nowego generatora siatek może być szczególnie przydatne w górnictwie. Na terenach górniczych budowa górotworu jest najczęściej dobrze rozpoznana, co pozwala wyodrębnić w modelu nawet drobne struktury, istotne na dalszym etapie obliczeń przepływu wód podziemnych czy transportu zanieczyszczeń. Wykorzystanie nowego generatora siatki może być także przydatne do odwzorowania charakterystycznych elementów infrastruktury górniczej, takich jak sztolnie, szyby, chodniki, studnie kierunkowe (ryc. 3B), wyrobiska, hałdy górnicze itp. (ryc. 3C).

Budowa struktury modelu hydrogeologicznego z wykorzystaniem elastycznej siatki umożliwia import wybranych struktur geologicznych z gotowych, trójwymiarowych modeli geologiczno-strukturalnych. Funkcja importu modeli geologicznych 3D do FEFLOW jest obecnie dostosowana do wybranych programów służących do odwzorowania trójwymiarowej, głębokiej budowy geologicznej. Są to programy: 1) 3D GeoModeller (*.gmod), 2) goCad (*.ml i *.ts), 3) Leapfrog Mesh Files (*.lfm) oraz 4) MineSight (*.dxf). Możliwość zaimportowania trójwymiarowej struktury do modelu przepływu wód podziemnych jest rozwiązaniem innowacyjnym, wypełniającym lukę w pełnej



Ryc. 3. Przykłady zastosowania nowego generatora siatek TetGen w FEFLOW 7
Fig. 3. Examples of application new mesh generation TetGen in FEFLOW 7

integracji trójwymiarowych modeli głębokiej budowy geologicznej z trójwymiarowymi modelami przepływu wód. Oczywiście nadal można wybrać opcję budowy poszczególnych warstw modelu poprzez import plików ze środowiska GIS, CAD czy plików ASCII.

Nowa metoda budowy przestrzennej bryły modelu może znacząco poprawić wiarygodność i dokładność odwzorowania głębokich struktur geologicznych. Duża liczba wydzieleni litologicznych, odwzorowanie skomplikowanej sieci uskoku czy innych istotnych elementów działalności człowieka, np. sztolni, szybów itp., mogą jednak prowadzić do znacznego zwiększenia skomplikowania siatki dyskretyzacyjnej, co może się przełożyć na trudniejszą, interaktywną pracę w programie. Dlatego też FEFLOW umożliwia tworzenie modeli hybrydowych. Łączą one stare algorytmy siatek generujących całe warstwy modelu z lokalnie występującą, nową, elastyczną, czworosienną siatką w miejscach, gdzie tradycyjny sposób budowania struktury modelu jest nieefektywny (ryc. 3B i 3C).

AKTYWACJA I DEZAKTYWACJA ELEMENTÓW SIATKI

Roboty górnicze, szczególnie wykonywane na potrzeby górnictwa odkrywkowego, w dynamiczny sposób przyczyniają się do przekształcania znacznych powierzchni

terenu i zmiany geometrii warstw geologicznych. Odkrywkowe udostępnianie złoża powoduje nagromadzenie skały płonnej, która jest zwałowana w postaci hałd w pobliżu kopalni lub na obszarze dna odkrywki, w którym zakończono już eksploatację złoża. W celu wiarygodnego przedstawiania wpływu postępu prac górniczych na przepływ wód podziemnych i symulowania odwodnienia w rejonie odkrywki, należy podejmować próby budowy modeli, przyjmując warunki nieustalone. Modele te umożliwiają między innymi odwzorowanie zmieniającej się w czasie geometrii modelowanej struktury, poprzez dezaktywację lub aktywację wybranych elementów siatki modelu w odpowiednio zdefiniowanym okresie symulacji.

Wszystkie elementy, z których są zbudowane warstwy modelu w programie FEFLOW, są domyślnie aktywne. Program umożliwia także budowę modeli, w których poszczególne elementy siatki, tworzące warstwy modelu, mogą być czasowo lub przez cały okres symulacji dezaktywowane (ryc. 4). Dzięki zastosowaniu tej funkcji za pomocą jednego modelu można odwzorować trzy sytuacje:

- stan przed rozpoczęciem działalności kopalni (elementy odwzorowujące hałdę skały płonnej są nieaktywne);
- okres początkowej działalności kopalni, w którym jest zdejmowany nadkład (dezaktywacja elementów) i deponowany obok odkrywki (aktywacja pierwszego poziomu składowanej skały płonnej);

- etap dalszego rozwoju kopalni, w którym następuje pogłębienie odkrywki (dezaktywacja elementów w drugiej warstwie w obszarze odkrywki) oraz składowanie większej ilości skały płonnej (aktywacja wyższej części hałdy).

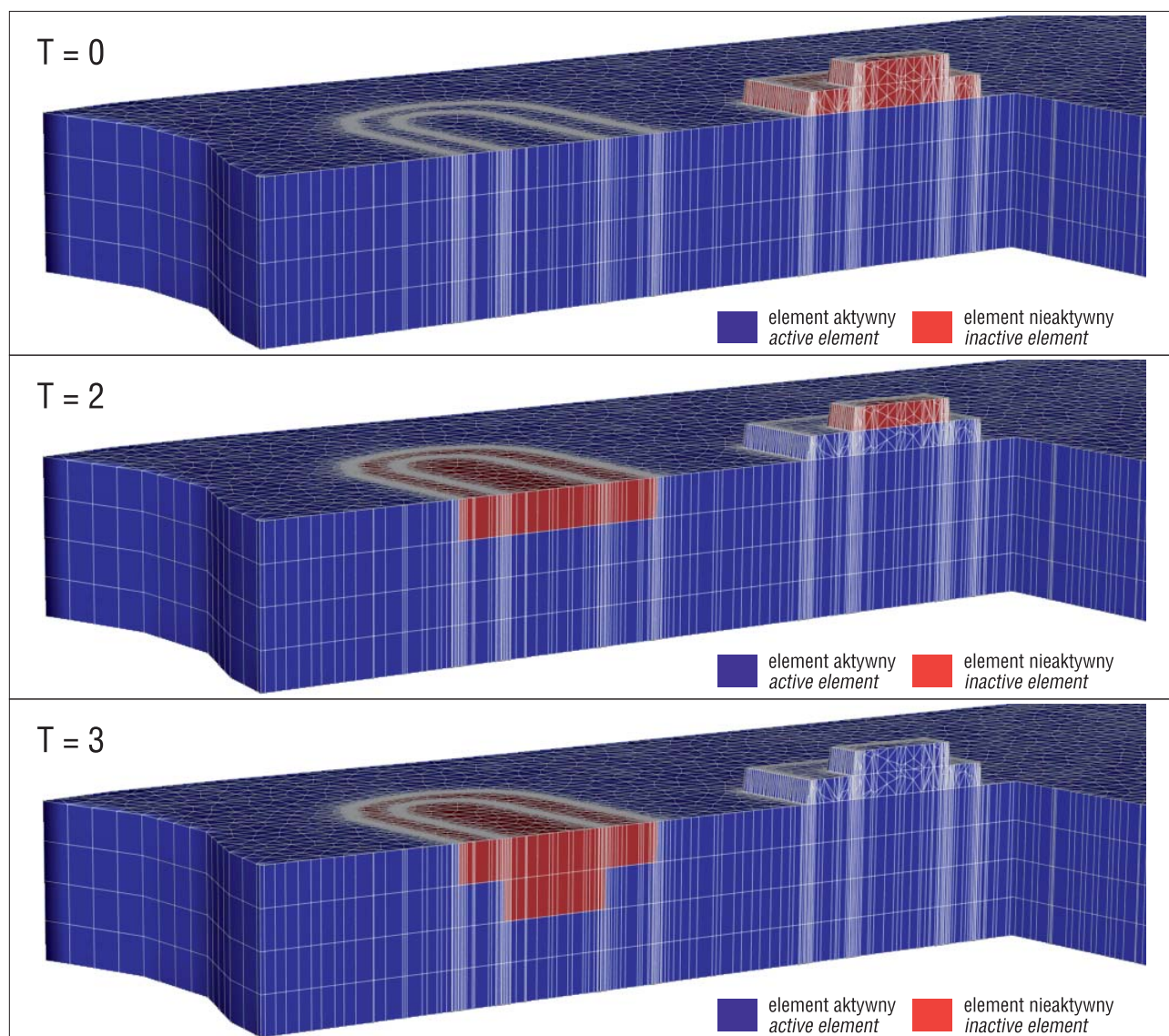
Dodatkowym atutem modeli 3D, które zostały utworzone z wykorzystaniem opcji dezaktywacji elementów, jest automatyczne przydzielenie właściwej infiltracji efektywnej do odpowiednich warstw. Jeśli elementy najwyżej leżącej warstwy są dezaktywowane, parametr odpowiedzialny za odwzorowanie infiltracji efektywnej jest automatycznie stosowany wobec pierwszych napotkanych aktywnych elementów. Opcja ta gwarantuje użytkownikowi programu, że zasilanie z opadów jest poprawnie przydzielane do odpowiednich miejsc w strukturze modelu.

ODWZOROWANIE UPRZYWILEJOWANYCH DRÓG PRZEPIYU

Modele przepływu wód podziemnych w skałach litych są często budowane jako ekwiwalent ośrodka porowego, gdzie wydzielona objętość bloków lub elementów oblicze-

niowych powinna nawiązywać do reprezentatywnej objętości elementarnej (*representative elementary volume – REV*). Wyznaczenie REV polega na określeniu objętości, w której parametry hydrogeologiczne charakteryzujące przepływ wód podziemnych cechują się mniej więcej stałą wartością (Bear, 1972; Eaton, 2006; Staško, Wcisło, 2006). Jednak w ośrodkach o podwójnej lub potrójnej porowatości (krasowo-szczelinowo-porowej) wyznaczenie REV może być bardzo kłopotliwe lub wręcz niemożliwe (Berkowitz, 2002). Wówczas przydatnym rozwiązaniem może być użycie oferowanej przez FEFLOW funkcji elementów dyskretnych (*discrete feature*). Za ich pomocą możliwe jest wydzielenie z całego modelu tych struktur, które stanowią uprzywilejowane drogi przepływu. Stosowane są wówczas dwa różne continua: jedno dla ośrodka porowego, a drugie dla elementów odzwierciedlających zwiększoną przepuszczalność hydrauliczną skał. Mogą to być np. powierzchnie uskokowe, sieć spękań lub kanały krasowe (Diersch, 2009).

Elementem dyskretnym może być dowolny geometryczny element, którego wymiar przestrzenny jest o jeden wymiar mniejszy od struktury całego modelu, w którym



Ryc. 4. Wykorzystanie opcji dezaktywacji elementów w celu odwzorowania postępu robót górniczych
Fig. 4. Use of elements deactivation options in modelling mining progress

zostanie wbudowany. Tak więc modele 3D mogą mieć elementy dyskretne 2D i 1D, a modele 2D elementy dyskretne 1D. Elementy dyskretne mogą być odwzorowane w modelu wzdłuż krawędzi elementu siatki (1D), na powierzchni ścian elementów (2D) lub mogą połączyć dwa dowolnie oddalone od siebie węzły w siatce modelu.

Elementy dyskretne z powodzeniem są wykorzystywane do odwzorowania naturalnych, uprzywilejowanych dróg przepływu, np. w strefach uskokowych, kanałach krasowych czy w strefach występowania szczelin i spekań, ale mogą być także bardzo przydatne do odwzorowania przepływu wód na terenach górniczych, m.in. sieciami sztolni, szybów, drenów, tuneli itp. (Sitek, 2014). W obliczeniach przepływu wód wobec każdego elementu dyskretnego można zastosować jedno z trzech praw: Darcy'ego, Hagena-Poiseuille'a lub Manninga-Stricklera (Diersch, 2009). Każdy pojedynczy element dyskretny lub grupę elementów odzwierciedlającą uprzywilejowany przepływ można odwzorować za pomocą odpowiedniego prawa i mieć odrębnie zdefiniowane parametry charakteryzujące przepływ. Elementy dyskretne mogą być także wykorzystywane do modelowania transportu masy i ciepła.

W każdym z symulowanych procesów elementy dyskretne mogą być wbudowane w model zarówno w strefie

ZARZĄDZANIE WARUNKAMI GRANICZNYMI

Na każdym etapie robót górniczych, od przygotowań do eksploatacji złoża aż po prace rekultywacyjne po zakończeniu wydobywania, tereny górnicze należą do obszarów, w których krążenie wód podziemnych ulega bardzo dynamicznym zmianom. Próba modelowania zmian przepływu wód podziemnych w tak intensywnie zmieniających się warunkach jest bardzo trudnym wyzwaniem i coraz częściej wymaga odejścia od stosowania prostszych w budowie i kalibracji modeli warunków ustalonych na rzecz modeli warunków nieustalonych.

Dużym wyzwaniem w modelowaniu warunków nieustalonych jest konieczność inteligentnego aktywowania, wyłączania lub modyfikowania warunków brzegowych modelu, w celu ich adaptacji do warunków krążenia wód podziemnych, dynamicznie zmieniających się w zależności od symulowanej sytuacji w danym czasie. W tym celu w FEFLOW można skorzystać z dwóch funkcji. Jedną z nich jest ograniczenie stosowalności warunku granicznego (funkcja *boundary constrain*) za pomocą warunku granicznego innego rodzaju, gdy w trakcie wykonywanej symulacji założenie zdefiniowane przez użytkownika zostanie spełnione (tab. 1). Przykładem zastosowania tej opcji programu do odwzorowania warunków w obszarze górniczym

Tab. 1. Ograniczenia stosowalności warunków brzegowych w modelu przepływu
Table 1. Constraints on flow boundary conditions

Nazwa warunku granicznego w programie <i>Name of boundary condition in software</i>	Ograniczenie warunku brzegowego za pomocą <i>Constraint boundary condition by means of</i>	Opcje ograniczenia <i>Constraint options</i>
Hydraulic-head BC warunek I rodzaju <i>1st kind – Dirichlet boundary condition</i>	natężenia przepływu <i>flow rate</i>	min./max. natężenie przepływu [m ³ /d] <i>min./max. flow rate [m³/d]</i>
Fluid-flux BC warunek II rodzaju <i>2nd kind – Neumann boundary condition</i>	wysokości hydraulicznej <i>hydraulic head</i>	min./max. wysokość hydrauliczna [m] <i>min./max. hydraulic head [m]</i>
Fluid transfer warunek III rodzaju <i>3rd kind – Cauchy boundary condition</i>	natężenia przepływu <i>flow rate</i> wysokości hydraulicznej <i>hydraulic head</i>	min./max. natężenie przepływu [m ³ /d] <i>min./max. flow rate [m³/d]</i> min./max. wysokość hydrauliczna [m] <i>min./max. hydraulic head [m]</i>
Well BC symulacja poboru lub zatłaczania wody w modelu 2D i 3D <i>simulation of water abstraction or infiltration in 2D and 3D model</i>	wysokości hydraulicznej <i>hydraulic head</i>	min./max. wysokość hydrauliczna [m] <i>min./max. hydraulic head [m]</i>
Multilayer well BC symulacja pracy studni na podstawie prawa Hagena-Poiseuille'a – tylko modele 3D <i>simulation of the work of the well based on the Hagen-Poiseuille law – only models 3D</i>	wysokości hydraulicznej <i>hydraulic head</i>	min./max. wysokość hydrauliczna [m] <i>min./max. hydraulic head [m]</i>

saturacji lub aeracji, jak i w strefie o zmiennym nasyceniu. W dwóch ostatnich przypadkach, wobec których jest stosowane równanie Richardsa, elementy dyskretne stają się domyślnie nieaktywne, jeśli ciśnienie we wszystkich węzłach należących do elementu dyskretnego spadnie poniżej zera. Mogą jednak zostać przez użytkownika aktywowane w różnych wariantach szczegółowo opisanych w instrukcji programu (Diersch, 2014; FEFLOW 7.0, 2015). W modelach uwzględniających strefę aeracji elementy dyskretne mogą być także użyte do symulowania drenażu wód reszkowych.

może być automatyczne zmniejszenie poboru wody przez studnię, gdy obniżenie zwierciadła wody w otworze osiągnie zakładany przez użytkownika poziom docelowy.

Specjalnym wariantem zmiany warunków granicznych jest użycie opcji przesączanie (*seepage face*). Warunek *seepage face* jest modyfikacją warunku I rodzaju, gdzie wysokość hydrauliczna jest równa wartości elewacji w węźle siatki ($h = z$ i $p = 0$ kPa) i jednocześnie przepływ jest ograniczony tylko do opcji wypływu wody z systemu. Zastosowanie tego warunku przez użytkownika jest bardzo łatwe, gdyż wiąże się tylko z selekcją węzłów siatki, w któ-

rych ma być stosowany ten warunek, a wartość ciśnienia równa zero oraz rzędna węzła są automatycznie przypisywane przez program. Opcja *seepage face* jest najczęściej stosowana do modelowania warunków na ścianach i krawędziach wyrobisk i budowli górniczych, takich jak sztolnie, szyby itp. Za pomocą tego warunku można szybko ocenić w przybliżeniu objętość wody potrzebną do odwodnienia górotworu i czas potrzebny do zdrenowania poziomu wodonośnego do określonej rzędnej. Dane te mogą być wykorzystane do symulacji następnego etapu, czyli projektowania i optymalizacji systemu odwadniania górotworu studniami.

Drugą możliwością okresowego ograniczenia stosowania warunków brzegowych daje funkcja modyfikująca wyjściowe wartości warunków brzegowych. Modyfikacja ta może obejmować aktywację warunków brzegowych, zmianę ich wartości lub ich wyłączenie w określonym kroku czasowym. Do symulowania tego procesu służy opcja programu nazywana funkcją modulacji. Funkcja ta znajduje zastosowanie przede wszystkim w modelowaniu warunków niestabilnych, w których warunki brzegowe, z przyczyn sezonowych lub w wyniku działalności człowieka, ulegają zmianom. Przykład zastosowania tej funkcji w obszarach górniczych, z jednoczesnym wykorzystaniem specjalnie zmodyfikowanego warunku I rodzaju (opcja *seepage face*), przydatnego do oszacowania objętości wód potrzebnych do wypompowania w celu osuszenia górotworu do projektowanej rzędnej, przedstawiono na rycinie 5.

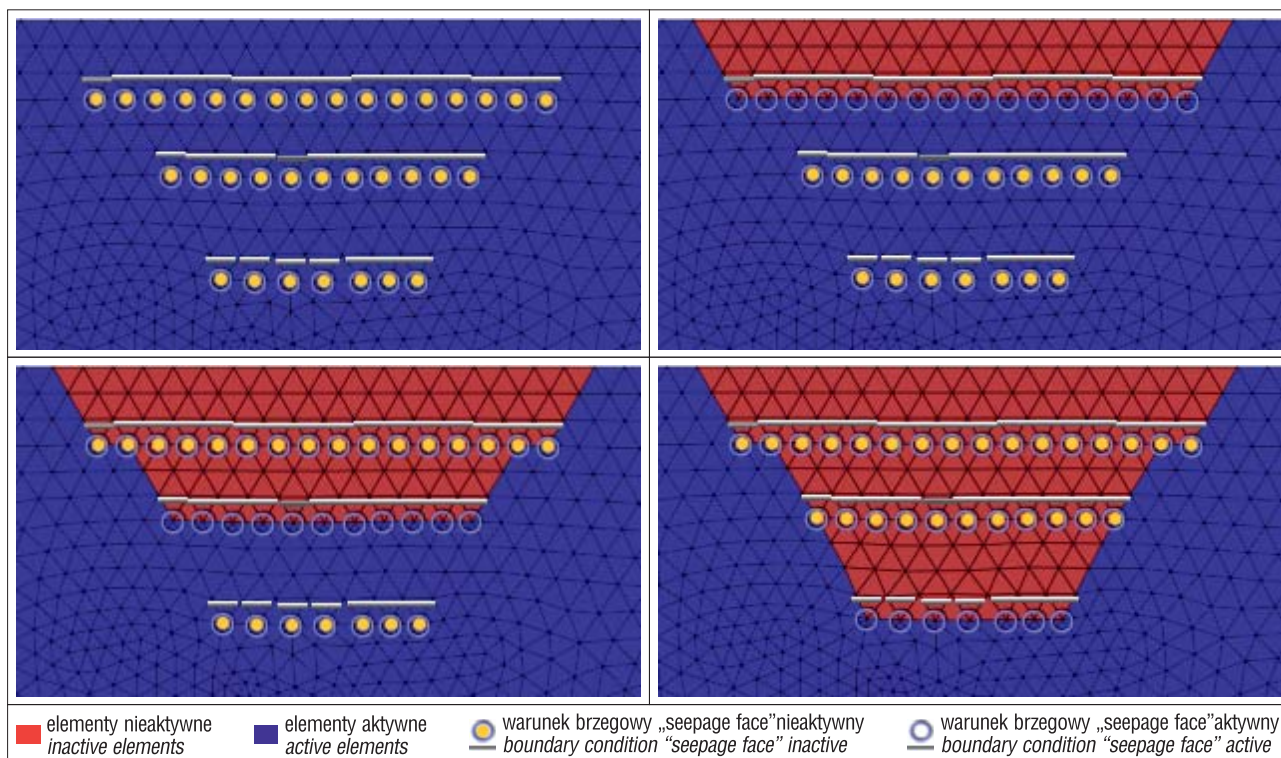
STREFA AERACJI

Program FEFLOW umożliwia rozwiązywanie zagadnień dotyczących przepływu wód, transportu masy i ciepła.

Procesy te mogą być symulowane na modelach 2D i 3D z uwzględnieniem anizotropowości odwzorowywanego systemu wodonośnego i obejmować strefę saturacji, a także strefę aeracji. Do tej pory w wielu modelach obszarów górniczych przepływ wód w strefie aeracji był pomijany, głównie z powodu trudności z oszacowaniem parametrów charakteryzujących przepływ w tej strefie oraz ze względu na konieczność zastosowania do obliczeń równania Richardsa. Rozwiązanie tego równania wiąże się ze znacznie większym wysiłkiem obliczeniowym, ze względu na nieliniowe zależności zachodzące w strefie aeracji między ciśnieniem kapilarnym a stopniem nasycenia warstwy wodą oraz pomiędzy nasyceniem strefy aeracji i jej współczynnikiem filtracji. Ponadto modelowanie warunków w strefie aeracji wymaga na ogół dodatkowej, bardzo szczegółowej dyskretyzacji obszaru. Jednak coraz większa moc obliczeniowa komputerów znacząco skraca czas symulacji.

W programie FEFLOW wybór danych niezbędnych do odwzorowania zależności przepływu wody przez strefę aeracji zależy od tego, jaki przyjęto model obliczeniowy. Do wyboru są dwie możliwości. Modele krzywych sklepanych (*spline models*) to relacje opisujące przepływ w strefie nienasyconej, tworzone na podstawie danych tabelarycznych, wprowadzonych przez użytkownika z wykorzystaniem technik interpolacyjnych. Drugi sposób opisania relacji przepływu przez strefę nienasyconą polega na zastosowaniu odpowiedniego modelu empirycznego. Są to modele: Van Genuchtena, zmodyfikowany Van Genuchtena, Hayerkampa, Brooks-Coreya, wykładniczy i liniowy.

Zastosowanie modeli odwzorowujących strefę aeracji może być szczególnie wartościowe wówczas, gdy celem badań jest np. określenie migracji zanieczyszczeń wymywanych z hałd albo określenie ilości wód penetrujących



Ryc. 5. Przykład aktywacji i dezaktywacji warunków brzegowych oraz wybranych elementów siatki modelu w odpowiednim kroku czasowym za pomocą funkcji modulacji

Fig. 5. Example of activation and deactivation of boundary conditions and selected elements of mesh at the appropriate time steps by means of “modulation function”

zwałowiska w zależności od wybranej techniki zagęszczania składowanych na nich osadów. Modele uwzględniające strefę nienasyconą dostarczają także informacji o tempie i ciśnieniu przesączania się wody przez skarpy, dlatego w połączeniu z modelowaniem geotechnicznym mogą się przyczynić do określenia ich stabilności. Modelowanie procesu przesączania się wody przez strefę aeracji jest także często wykorzystywane w projektowaniu konstrukcji podziemnych, takich jak szyby, tunele czy zbiorniki podziemne z przeznaczeniem do magazynowania gazu (Busière i in., 2003; Schätzl i in., 2008; Wienclaw, Koda, 2008).

WTYCZKI I INTEGRACJA FEFLOW Z INNYMI MODELAMI

FEFLOW jest jednym z niewielu programów, w którym za pomocą jednego interfejsu można odwzorować bardzo szeroki wachlarz zagadnień związanych z przepływem wód podziemnych, obejmujący możliwość modelowania trójwymiarowego w strefie aeracji i saturacji, odwzorowania przepływu wód o różnej gęstości, lepkości i temperaturze, w warunkach ustalonych i nieustalonych, w ośrodkach porowych lub o podwójnej porowatości (Diersch, 2014). Jednak mogą zaistnieć jednostkowe przypadki, w których niezbędne będzie rozszerzenie funkcjonalności programu o specyficzne potrzeby użytkownika. Przykładem takich potrzeb może być np. integracja modelu FEFLOW z modelami symulującymi przepływ w ciekach powierzchniowych, import danych z zewnętrznych źródeł zdefiniowanych przez użytkownika lub eksport danych do specyficznego formatu. W tym celu, poprzez otwarty interfejs programowania aplikacji (IFM API Index), dostępny na stronie <http://www.feflow.info/html/help/default.htm>, kontrolowany przez FEFLOW *Interface Manager* (IFM), można zaprogramować w języku C/C++ lub Python wtyczkę (*plug-ins*), która rozszerzy funkcje FEFLOW o dodatkowy moduł. Taki nowo utworzony przez użytkownika moduł, by zadziałał podczas wykonywania obliczeń, należy zaimportować do programu poprzez panel *Plug-ins*.

Przykładem wtyczki przydatnej do analizowania procesów w obszarach górniczych, jest wtyczka *IfmMIKE11* (Monninkhoff, 2014), za pomocą której można integrować z FEFLOW modele symulujące przepływ w ciekach powierzchniowych (MIKE 11 i MIKE HYDRO River). Uzyskana dzięki modułowi *IfmMIKE11* wymiana informacji, np. o wysokości zwierciadła wód w rzece czy rowach odwadniających oraz o odpływie wód podziemnych do tych cieków powierzchniowych, sprzyja dokładniejszemu odwzorowaniu rzeczywistych warunków w obu modelach. W efekcie zwiększa się także wiarygodność wykonywanych symulacji prognostycznych.

Kolejnym przykładem dodatkowego modułu, który może być przydatnym narzędziem do symulowania rekultywacji wyrobisk górniczych w kierunku wodnym, jest *PitLakeBC*, udostępniony wraz z kilkudziesięcioma innymi na stronach DHI (Wingle, Sinton, 2015). Dzięki tej wtyczce można uwzględnić w obliczeniach dodatkowe źródła i straty wody, związane np. z parowaniem z lustra wody zatapanej odkrywki, co pozwala precyzyjnie określić całkowity czas potrzebny do zalania wyrobiska, jak i tempo odbudowy zwierciadła wód w odkrywcę i warstwach wodonośnych wokół wyrobiska.

Natomiast wtyczka *PiChem* umożliwia połączenie funkcjonalności modelu FEFLOW, odwzorowującego przepływ i transport substancji chemicznych w wodach podziemnych, z programem PHREEQC, służącym do symulacji reakcji geochemicznych (Wissmeier, 2015; *PiChem*, 2016). Integracja tych dwóch programów może służyć między innymi do symulowania migracji zanieczyszczeń i reakcji chemicznych w obszarach górniczych, takich jak rozpuszczanie lub wytrącanie minerałów, czy określenia efektywności i ewentualnie optymalizacji różnych technik remediacji wód, związanych np. z drenażem kwaśnych wód kopalnianych.

DYSKUSJA

Modelowanie przepływu wód podziemnych lub także transportu masy czy ciepła na terenach górniczych zawsze jest dużym wyzwaniem. Trudności, które należy rozwiązać na etapie tworzenia modelu konceptualnego oraz podczas budowy modelu numerycznego, dotyczą między innymi sposobu odwzorowania bardzo dynamicznie zmieniających się warunków krążenia wód podziemnych, spowodowanych zmieniającym się w czasie i przestrzeni odwadnianiem kopalń. Ponadto często pojawia się problem skali, wynikający z chęci uzyskania dokładnych wyników w rejonie kopalni, jak również możliwości oceny wpływu działalności górniczej na system wodonośny w skali regionalnej. Kolejne komplikacje wynikają z nierównomiernego rozpoznania wglębnej budowy geologicznej, zmieniającej się w czasie geometrii struktury modelowanego systemu wodonośnego, a także dużych wahań miąższości strefy aeracji, powodowanych przez postępujące odwadnianie, prowadzone w celu udostępnienia złoża do eksploatacji. Jednak pomimo tych utrudnień literatura przedmiotu dostarcza wielu pozycji dokumentujących przydatność zastosowania modelowania numerycznego do rozwiązywania zagadnień wodnych na terenach górniczych zarówno w Polsce (Haładus i in., 2006; Derkowska-Sitarz, Fiszer, 2010; Szczepański, 2010; Niedbalska, 2013; Szczepiński, 2013), jak i na świecie (Rapantova i in., 2007; Dong i in., 2012; Luo i in., 2012; Alvarez i in., 2016; Andres i in., 2017; Zeng i in., 2017).

Na wiarygodność i precyzję wyników uzyskanych w toku modelowania numerycznego może wpłynąć wiele czynników. Do najważniejszych można zaliczyć dostęp do danych, które umożliwiają odpowiednie sparometryzowanie odwzorowywanych w modelu warunków hydrodynamicznych i hydrostrukturalnych systemu wodonośnego.

Obszary górnicze są na ogół bardzo dobrze rozpoznane, a wraz z postępem robót górniczych liczba informacji opisujących krążenie wód podziemnych modelowanego systemu wodonośnego wzrasta, co pozwala na konstruowanie coraz bardziej precyzyjnych modeli. W związku z tym bardzo istotnym elementem staje się dobór odpowiedniego oprogramowania, umożliwiającego płynną pracę z bardzo dużą liczbą danych, oraz racjonalny czas obliczeń. Nadmierne uproszczenie modeli, w których nie uwzględnia się wielowarstwowości i zróżnicowania warunków zasilania oraz krążenia wód, jest wg Dąbrowskiego i in. (2010) główną przyczyną małej wiarygodności prognoz opracowanych na podstawie badań modelowych.

Niewątpliwie do głównych zalet programu FEFLOW należy zaliczyć możliwość rozwiązywania równań opisujących przepływ wód podziemnych oraz transport

masy i ciepła za pomocą elementów skończonych (Diersch, 2014). Jest to zaawansowana metoda wyliczania równań różniczkowych, zdecydowanie bardziej uniwersalna od metody różnic skończonych. Metoda ta pozwala uzyskać rozwiązania równań odnoszących się do nawet bardzo skomplikowanych pod względem geometrii, wielowarstwowych systemów wodonośnych, co może być szczególnie istotne w rozpatrywaniu problemów na obszarach górniczych, w których na naturalne skomplikowanie ośrodka hydrogeologicznego nakładają się przekształcenia górotworu związane z prowadzoną eksploatacją.

Elastyczność siatki obliczeniowej w FEFLOW umożliwia wprowadzanie swobodnych zmian wielkości oczka siatki i wielokrotne jej zagęszczanie w obszarach istotnych dla dokładności rozwiązania modelowanego zagadnienia, np. w obszarze odkrywki, co redukuje znacznie czas obliczeń. Ponadto od wersji programu 7.0, dzięki nowemu generatorowi siatek TeTGen (Si, 2013, 2015), geometria warstw hydrogeologicznych, dowolnie nachylone powierzchnie uskokowe, wyklinowujące się warstwy wychodni starszego podłoża czy otwory kierunkowe mogą być odwzorowywane bez uproszczeń, co może istotnie wpłynąć na zwiększenie poprawności i wiarygodności wyników badań.

Nowym rozwiązaniem w FEFLOW jest także opcja importu struktury modelowanego systemu wodonośnego z trójwymiarowych modeli głębokiej budowy geologicznej, wykonanych w takim oprogramowaniu, jak np. goCad, GeoModeller czy MineSight. Jest to znaczący postęp w integracji numerycznych modeli hydrogeologicznych z modelami 3D głębokiej budowy geologicznej, gdyż dotychczas uzyskanie gotowych modeli 3D wymagało eksportu danych z programu w postaci map 2D lub zbioru punktów X, Y, Z i ich ponownej interpolacji w programie do modelowania przepływu (Sitek i in., 2009).

W przeciwieństwie do kodu MODFLOW, program FEFLOW umożliwia symulacje zagadnień charakteryzujących się znacznie większym stopniem skomplikowania, np. odwzorowanie przepływu wód w ośrodkach o podwójnej porowatości. Nowe funkcje programu okazały się przydatne m.in. do modelowania przepływu wód w zatopionej kopalni uranu w Czachach (Rapantova i in., 2007). Dostępna w programie opcja elementów dyskretnych pozwala na odwzorowanie dróg uprzywilejowanego przepływu na podstawie prawa Darcy'ego, prawa Manninga-Stricklera lub prawa Hagena-Poiseuille'a (Diersch, 2014). Przy czym prawo Hagena-Poiseuille'a jest często wykorzystywane nie tylko do odwzorowania przepływu wód podziemnych (Luo i in., 2012; Sitek, 2014), ale też przepływu i transportu ciepła (Renz i in., 2009; Andrés i in., 2017) w wyrobiskach górniczych, np. szybach, sztolniach itp.

FEFLOW ma także rozbudowane możliwości modelowania przepływu wód w strefie aeracji, przydatne w rozpatrywaniu krążenia wód w obszarach górniczych w całym systemie wodonośnym, jak i do rozwiązywania specyficznych, lokalnych problemów, np. związanych z przesączaniem przez skarpy, tamy czy budową obiektów podziemnych (Schätzl i in., 2008; Levenick i in., 2009; Nair i in., 2011; Sinton i in., 2015; Andrés i in., 2017).

Cechą wyróżniającą FEFLOW jest także opcja modelowania przepływu płynów o różnej gęstości i lepkości, sprawiająca, że program ten można stosować do oceny skomplikowanych przypadków związanych z zagrożeniem

wywołanym zasolonymi wodami podziemnymi, np. w zatopionej kopalni soli w rejonie miasta Stassfurt w Niemczech (Luo i in., 2012), czy prognozowania ewentualnego wpływu wdarcia się wody do nieczynnej kopalni soli, w której są składowane odpady radioaktywne, i możliwości przedostania się tej zasolonej i radioaktywnej wody do sąsiednich poziomów wodonośnych (Masset i in., 2015). W Polsce modelowanie przepływu i mieszania się wód o różnej gęstości może być przydatne do analizy procesów przebiegających w rejonie wydobywania solnego w Bełchatowie czy w kopalniach GZW, gdzie wody dopływające do wyrobisk charakteryzują się bardzo wysoką mineralizacją (Rózkowski, 2002).

Program FEFLOW może być także wykorzystywany do symulowania migracji zanieczyszczeń na terenach górniczych (Rapantova i in., 2007; Nair i in., 2011; Zeng i in., 2017), ponieważ standardowo jest przystosowany do analizowania procesów dyspersji, dyfuzji i sorpcji oraz reakcji rozpadu dowolnej ilości zanieczyszczeń, a w połączeniu z wtyczką PiChem może być stosowany do badania reakcji geochemicznych, obejmujących np. wymianę jonową czy wymywanie lub wytrącanie minerałów (PiChem, 2016). Uwzględnienie dodatkowych procesów geochemicznych podnosi wiarygodność symulacji prognostycznych i może być wykorzystywane w górnictwie, np. do prognozowania zmian jakości wód na różnych etapach rozwoju kopalń.

Po zakończeniu eksploatacji kopalń tereny górnicze, ze względu na dobre rozpoznanie warunków hydrogeologicznych i geotermicznych, coraz częściej są przeznaczane pod inwestycje geotermalne. Dzięki możliwości modelowania transportu ciepła FEFLOW jest z powodzeniem wykorzystywany do symulowania sprawności i opłacalności stosowania różnych instalacji geotermalnych, obejmujących zarówno systemy otwarte, jak i systemy zamknięte (Diersch, 2014). Wyniki oceny możliwości pozyskania energii geotermalnej z obszarów poeksploatacyjnych, uzyskane na podstawie symulacji wykonanych w FEFLOW, opisali m.in. Renz i in. (2009) czy Andrés i in. (2017).

Eksploatacja górnicza prowadzi do znaczących i długotrwałych przekształceń naturalnych stosunków wodnych. Zmiany te mogą być często nieodwracalne, dlatego tak ważne jest odpowiednie prognozowanie wpływu działalności kopalń na środowisko wodne za pomocą badań modelowych, zarówno pod względem ilościowym, jak i jakościowym, w celu minimalizacji szkód w tym środowisku, optymalizacji procesów związanych z odwodnieniem oraz minimalizacją zagrożeń wodnych. Wiarygodne odzwierciedlenie procesów zachodzących w systemach wodonośnych wymaga doboru odpowiednich narzędzi, umożliwiających szczegółowe odwzorowanie przebiegu wielu skomplikowanych procesów, łatwą integrację z innymi modelami numerycznymi oraz dostosowanie oprogramowania do indywidualnych potrzeb. Zdaniem autora, oprogramowanie FEFLOW spełnia wymienione wymagania, na co wskazują też publikacje dotyczące zastosowania tego programu w górnictwie podziemnym i odkrywkowym na różnych etapach działalności kopalń – od planowania aż po etap ich likwidacji (Jakubicki i in., 2002; Schätzl i in., 2008; Levenick i in., 2009; Renz i in., 2009; Dong i in., 2012; Luo i in., 2012; Masset i in., 2015; Sinton i in., 2015; Wingle, Sinton, 2015; Álvarez i in., 2016; Andrés i in., 2017; Zeng i in., 2017).

PODSUMOWANIE

Program FEFLOW szczególnie dobrze nadaje się do modelowania przebiegu procesów na terenach górniczych charakteryzujących się bardzo złożoną budową geologiczną i skomplikowanymi warunkami hydrogeologicznymi, wobec których jest wymagana większa precyzja odwzorowania warunków hydrogeologicznych. Z powodzeniem może on konkurować ze znacznie lepiej rozpoznaniem w Polsce oprogramowaniem bazującym na kodzie obliczeniowym MODFLOW. O szerokich możliwościach zastosowania tego programu decydują przede wszystkim: 1) duża elastyczność i precyzja w odwzorowaniu struktury geologicznej, w tym struktur nieciągłych, a także elementów technicznych, jak np. szyby, sztolnie, otwory kierunkowe itp.; 2) łatwa integracja modelu FEFLOW z innymi modelami za pomocą gotowych rozwiązań, jak np. z programami geochemicznymi PHREEQC lub z programami służącymi do budowy modeli hydrologicznych z grupy MIKE; 3) możliwość dostosowania programu do indywidualnych rozwiązań poprzez otwarty interfejs programowania; 4) opcja uwzględnienia w jednym modelu wielu skomplikowanych procesów, np. związanych z przepływem wód podziemnych w ośrodkach o podwójnej porowatości lub wód o różnej gęstości; 5) możliwość odwzorowania wszystkich modelowanych procesów: przepływu wód podziemnych, transportu masy oraz ciepła zarówno na modelach 2D, jak i 3D, z uwzględnieniem strefy saturacji, a także aeracji.

LITERATURA

- ÁLVAREZ R., ORDÓÑEZ A., DE MIGUEL E., LOREDO C. 2016 – Prediction of the flooding of a mining reservoir in NW Spain. *J. Environ. Manage.*, 184: 219–228.
- ANDRÉS C., ORDÓÑEZ A., ÁLVAREZ R. 2017 – Hydraulic and thermal modelling of an underground mining reservoir. *Mine Water Environ.*, 36: 24–33.
- BEAR J. 1972 – *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Am. Elsevier Publ. Co., New York.
- BERKOWITZ B. 2002 – Characterizing flow and transport in fractured geological media: A review. *Adv. Water Resources*, 25 (8–12): 861–884.
- BUSSIÈRE B., CHAPUIS R.P., AUBERTIN M. 2003 – Unsaturated flow modelling for exposed and covered tailings dams. *Conference material ICOLD*, June 2003.
- DĄBROWSKI S., KAPUŚCIŃSKI J., NOWICKI K., PRZYBYŁEK J., SZCZEPAŃSKI A. 2010 – *Metodyka modelowania matematycznego w badaniach i obliczeniach hydrogeologicznych*. Poradnik metodyczny. Min. Środ., Warszawa. https://www.mos.gov.pl/g2/big/2011_05/5c4-710160261e29afb356967872b3dcd.pdf.
- DERKOWSKA-SITARZ M., FISZER J. 2010 – Zastosowanie badań modelowych w rozpoznaniu warunków hydrogeologicznych dla obszaru LGOM. *Pr. Nauk. Inst. Gór. P.Wroc.*, 131 (38): 25–34.
- DIERSCH H.-J. G. 2009 – Discrete feature modeling of flow, mass and heat transport processes by using FEFLOW, [W:] FEFLOW, Finite Element Subsurface Flow, Transport Simulation System. *White Papers*, 1: 151–198.
- DIERSCH H.-J.G. 2014 – FEFLOW, Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. Springer, Heidelberg, Germany.
- DONG D., SUN W., XI S. 2012 – Optimization of mine drainage capacity using FEFLOW for the no. 14 coal seam of China's Linnancang Coal Mine. *Mine Water Environ.*, 31: 353–360.
- EATON T.T. 2006 – On the importance of geological heterogeneity for flow simulation. *Sedimentary Geol.*, 184: 187–201.
- FEFLOW 7.0. 2015 – User Guide. <https://www.mikepoweredbydhi.com/download/product-documentation>.
- HAŁADUS A., ZDECHLIK R., BUKOWSKI P., ŚWISTAK M. 2006 – Badania modelowe prognozowania procesu zatapiania na przykładzie ZG Janina. *Prz. Gór.*, 7 (8): 57–68.
- JAKUBICK A.T., JENK U., KAHNT R. 2002 – Modelling of mine flooding and consequences in the mine hydrogeological environment: flooding of the Koenigstein mine, Germany. *Environ. Geol.*, 42: 222–234.
- LEVENICK J.L., ZAWADZKI W., HAYNES A., MANRIQUE R. 2009 – Hydrogeological assessment of seepage through the Antamina tailings dam – Antamina copper/zinc mine, Peru, South America. *Water Institute of Southern Africa, International Mine Water Association: Proceedings, International Mine Water Conference: 730–737*.
- LUO J., DIERSCH H.-J.G., MONNINKHOFF L.M.M. 2012 – 3D modeling of saline groundwater flow and transport in a flooded salt mine in Stassfurt, Germany. *Mine Water Environ.*, 31: 104–111.
- MASSET O., POPPEI J., WISSMEIER L., WENDEROTH F. 2015 – Modeling of radionuclide transport in the overburden of a flooded salt mine. *FEFLOW 2015, Conf. Material*.
- MCDONALD M.G., HARBAUGH A.W. 1988 – MODFLOW, a modular three-dimensional finite difference ground-water flow model. *US Geol. Surv., open-file rep.*: 83–875.
- MONNINKHOFF B. 2014 – DHI-WASY Software IfmMIKE11 2.1 Coupling the groundwater model FEFLOW® and the surface water model MIKE11®, User Manual.
- NAIR R.N., SUNY F., CHOPRAM., PURANIK V.D. 2011 – Radiological impact assessment of the uranium tailings pond at Turamdih in India, [W:] Merkel B., Schipek M. (red.), *The new uranium mining boom. Challenge and Lessons learned*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg: 681–688.
- NIEDBALSKA K. 2013 – Ocena zmian warunków hydrogeologicznych podziemnych zakładów górniczych w GZW za pomocą modeli numerycznych. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 456: 425–430.
- PICHEM 2016 – A FEFLOW Plugin for Advanced Geochemical Reaction, User Guide, DHI, Denmark, <https://www.dhigroup.com/download/mike-by-dhi-tools/groundwaterandporousmediatools>.
- RAPANTOVAN., GRMELA A., VOJTEK D., HALIR J., MICHAŁEK B. 2007 – Ground water flow modelling applications in mining hydrogeology. *Mine Water Environ.*, 26: 264–270.
- RENZ A., RÚHAAK W., SCHÄTZL P., DIERSCH H.-J.G. 2009 – Numerical modeling of geothermal use of mine water: challenges and examples. *Mine Water Environ.*, 28: 2–14.
- RÓŻKOWSKI A. 2002 – Solanki Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 404: 191–214.
- SCHÄTZL P., CLAUSNITZER V., DIERSCH H.-J.G. 2008 – Groundwater modeling for mining and underground construction – challenges and Solutions, [W:] Rapantova N., Hrkal Z., *Mine Water and the Environment*, VSB – Technical University of Ostrava: 473–476.
- SI H. 2013 – A Quality Tetrahedral Mesh Generator and 3D Delaunay Triangulator. User manual version 1.5. *Tech. Rep. 13*. Weierstrass Institute for Applied Analysis and Stochastics (WIAS), <http://wias-berlin.de/software/tetgen/1.5/doc/manual/manual.pdf>.
- SI H. 2015 – TetGen, a Delaunay-Based Quality Tetrahedral Mesh Generator. *ACM Trans. on Mathematical Software*, 41 (2).
- SINTON P., WINGLE B., BARTLETT D. 2015 – FEFLOW model of copper mine, Arizona, USA. *FEFLOW 2015, conf. material*.
- SITEK S., KOWALCZYK A., MAŁOLEPSZY Z. 2009 – Szczegółowy model struktury 3D zbiornika GZWP Gliwice nr 330. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 436: 463–468.
- SITEK S. 2014 – Influence of natural factors and human activity on groundwater flow in Major Groundwater Basin (MGB) Gliwice, southern Poland. *Pr. dokt., Arch. KHGI Wyd. Nauk o Ziemi U.Śl.*
- STAŠKO S., WCISŁO M. 2006 – Ograniczenia metody różnic skończonych w dokumentowaniu zasobów oraz dróg przepływu w ośrodku szczelinowo-krasowym. *Geologos*, 10: 241–251.
- SZCZEPAŃSKI A. 2010 – Badania modelowe dla potrzeb projektowania i prowadzenia odwodnień budowlanych i kopalnianych, [W:] Dąbrowski S., Kapuściński J., Nowicki K., Przybyłek J., Szczepański A., *Metodyka modelowania matematycznego w badaniach i obliczeniach hydrogeologicznych: poradnik*. Wyd. Nauk. Bogucki, Poznań.
- SZCZEPIŃSKI J. 2013 – Modelowanie numeryczne w badaniach hydrogeologicznych dla oceny wpływu kopalń odkrywkowych na środowisko wodne. *Wyd. Geoinżynierii Górnictwa i Geologii PWroc.*
- WIENCLAW E., KODA E. 2008 – Wykorzystanie modelowania do rozbudowy systemu odwodnienia w odkrywkowej kopalni węgla brunatnego. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 431: 267–274.
- WINGLE W.L., SINTON P. 2015 – A Pit-Lake Module for FEFLOW. *Conf. mat.*, http://www.aquageo.com/publications/2015/FEFLOW_LakeModule.paper.4.pdf.
- WISSMEIER L. 2015 – Simulating flow and transport with advanced geochemical reactions – Recent developments using PHREEQC as reaction engine. *FEFLOW 2015, conf. mat.*
- ZENG B., ZHANG Z., YANG M. 2017 – Risk assessment of groundwater with multi-source pollution by a long-term monitoring programme for a large mining area [w druku]. *International Biodeterioration, Biodegradation*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.01.002>.

Praca wpłynęła do redakcji 19.06.2017 r.
 Akceptowano do druku 19.09.2017 r.