

## Przegląd oprogramowania do numerycznego modelowania procesów środowiskowych w systemach geotermalnych

Robert Zdechlik<sup>1</sup>, Barbara Tomaszewska<sup>2</sup>, Marta Dendys<sup>1</sup>, Leszek Pająk<sup>3</sup>

**A review of applications for numerical modelling of environmental processes in geothermal systems.** *Prz. Geol.*, 63: 1150–1154.

*Abstract.* Numerical modelling is widely spread tool used to estimating of the thermal water resources in geothermal systems. Researchers use this tool for the water thermal formation recognition and for simulations of environmental processes occurring in geothermal systems during the operating, given the available technical conditions. A choice of appropriate modelling method is determined by specification of research problems. For solving particular problems there was used software dedicated to hydrogeological modelling, with their separate codes/modules. There are comprehensive applications for modelling only geothermal issues, but there is also possibility adapting software and applications from another geological branches. TOUGH simulator (based on the finite difference method – FDM) is dedicated specially to geothermal issues. PHREEQC and related applications are apply for study of chemical composition of the thermal water. For simulating water circulation in geothermal systems and mass/heat transport issues there are used software applications like MODFLOW and SEAWAT (FDM), and FEFLOW or Aqua3D (based on finite element method – FEM). Development of numerical modelling in geothermic is nowadays related with using new algorithms, improving of data editing and processing, cooperation with GIS and creation possibilities for using conceptual modelling.

**Keywords:** geothermal system, geothermic, numerical modelling, TOUGH, MODFLOW, FEFLOW

Do prawidłowej oceny możliwości zasobowych systemów geotermalnych jest niezbędne wykorzystanie szeroko rozumianego modelowania numerycznego. Dotyczy to wstępnego etapu poszukiwania korzystnej lokalizacji, poprzez działania projektowo- optymalizacyjne, do etapu rzeczywistej eksploatacji złoża. Metody modelowania numerycznego dają możliwość rozwikłania problemów trudnych do rozwiązania w sposób analityczny, bądź takich, w których trzeba wykonywać długotrwałe badania terenowe i/lub laboratoryjne. Poszczególne etapy badawcze, w których wykorzystuje się obliczenia modelowe, wymagają uprzedniego przeprowadzenia szczegółowej analizy dostępnych informacji geologicznych i na tej podstawie przyjęcia odpowiedniego modelu koncepcyjnego funkcjonowania rozwiązywanego zagadnienia. Pozwala to na skonstruowanie modelu numerycznego przebiegu analizowanego procesu. Po prawidłowym wykalibrowaniu model może być wykorzystany do realizacji obliczeń prognostycznych, obrazujących reakcję systemu rzeczywistego na zadane wymuszenie. Daje to możliwość oceny wpływu zmian w konfiguracji (np. zmiana harmonogramu eksploatacji lub wykonanie nowych otworów) na funkcjonowanie rozpatrywanego systemu geotermalnego, co w konsekwencji pozwala na optymalizację gospodarowania zasobami wód i energii.

Rodzaj rozpatrywanego problemu determinuje wybór odpowiedniego narzędzia obliczeniowego. Zagadnienia środowiskowe rozpatrywane w geotermii, możliwe do rozwiązania za pomocą metod modelowych, można sprowadzić do trzech grup: określanie składu chemicznego wód geotermalnych, ocena warunków krążenia i zasobów ilościowych wód podziemnych oraz zmienność przestrzenna i czasowa (transport) masy i energii cieplnej. Do rozwiązania poszczególnych problemów jest wykorzystywane spe-

cialistyczne oprogramowanie, funkcjonujące jako odrębne programy (moduły) albo jako kompleksowe pakiety programowe, przeznaczone do rozwiązywania zagadnień *stricte* geotermalnych, bądź też adaptowane z nauk pokrewnych. Artykuł podejmuje próbę usystematyzowanego przedstawienia oprogramowania przeznaczonego do modelowania numerycznego stosowanego w rozwiązywaniu zagadnień badawczych związanych z eksploatacją systemów geotermalnych w ujęciu środowiskowym.

### PROGNOZOWANIE SKŁADU CHEMICZNEGO WÓD GEOTERMALNYCH

Programy PHREEQC i im pokrewne w zagadnieniach geotermalnych są używane przede wszystkim w badaniach chemizmu wód oraz procesów chemicznych związanych z technologią eksploatacji złóż. Do obliczania równowagi termodynamicznej są wykorzystywane ogólnodostępne programy: PHREEQC ([http://www.brr.cr.usgs.gov/projects/GWC\\_coupled/phreeqc/index.html](http://www.brr.cr.usgs.gov/projects/GWC_coupled/phreeqc/index.html) – stan na 03.09.2015 r.), SEAWAT, HYDROTHERM oraz WATEQ4F. Natomiast program PHREEQCI jest w pełni funkcjonalną wersją programu PHREEQC wzbogaconą o graficzny interfejs użytkownika, zdecydowanie ułatwiająca wprowadzanie i edycję danych.

W procesie modelowania hydrogeochemicznego program PHREEQC ma możliwość zastosowania różnych baz danych termodynamicznych. Domyślna baza danych *phreeqc.dat* nie jest dostosowana do wód o dużym zasoleniu np. w otworach występujących na Niżu Polskim – Pyrzyce (Kania, 2003) oraz Gostynin GT-1 (Tomaszewska, 2008; Bujakowski, 2010). Ten problem można rozwiązać stosując inne bazy: *pitzer.dat* (dostosowanie do wód o wysokiej

<sup>1</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; robert.zdechlik@agh.edu.pl; marta.dendys@agh.edu.pl.

<sup>2</sup> Zakład Odnawialnych Źródeł Energii i Badań Środowiskowych, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN w Krakowie, ul. Wybickiego 7, 31-261 Kraków; b.tomaszewska@meeri.pl.

<sup>3</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; pajakl@agh.edu.pl.

mineralizacji) oraz wateq4f.dat i llnl.dat (szeroki zakres uwzględnianych minerałów). Program można wykorzystywać m.in. do modelowania równowagi termodynamicznej układu woda–skały złożowe oraz do prognozowania *scalingu* – procesu wytrącania minerałów wtórnych w instalacji ujmującej wody geotermalne (Kania, 2003; Tomaszewska, 2008; Bujakowski, 2010; Kępińska & Bujakowski, 2011; Tomaszewska & Pająk, 2012; Kleszcz & Tomaszewska, 2013). Przykładami zastosowania programu PHREEQCI są rozpoznanie i charakterystyka wód oraz ocena stanu równowagi chemicznej w ujęciu Busko C-1, w którym występują wody termalne i lecznicze (Gała, 2011). Wykorzystując omawiany program, określono procesy kształtujące skład chemiczny wód oraz ich pochodzenie.

### **OPROGRAMOWANIE SPECJALISTYCZNE DO ROZWIĄZYWANIA PROBLEMÓW INŻYNIERII ZŁOŻOWEJ WÓD GEOTERMALNYCH**

W inżynierii złożowej przy pomocy modeli numerycznych są prognozowane temperatura lub zmienność cech systemu geotermalnego, np. wydajność ujęcia, w długim okresie (kilkadziesiąt lat). Ma to znaczenie do oceny tzw. czasu przebiecia frontu chłodnego, przy zatłaczaniu wykorzystanych wód do górotworu (Dendys i in., 2014). Istotna jest również możliwość prognozowania zmian ciśnienia wody wraz ze zmianami wydajności.

Do numerycznego modelowania skojarzonego przepływu wody oraz transportu masy i ciepła w ośrodkach porowatych i szczelinowych, dla płynów wielofazowych i wieloskładnikowych, jest przeznaczony pakiet programów symulacyjnych TOUGH – Transport Of Unsaturated Groundwater and Heat (Pruess i in., 1999). Może on być wykorzystywany w modelowaniu pracy systemów geotermalnych (Ganguly & Kumar, 2012; Lei & Zhu, 2013; Arnaldsson i in., 2014; Finsterle i in., 2014), projektowaniu i eksploatacji składowisk odpadów radioaktywnych (Rechard i in., 2014), modelowaniu systemów HDR – Hot Dry Rocks i EGS – Enhanced Geothermal System (Borgia i in., 2012; Zeng i in., 2014) oraz w modelowaniu procesu geologicznej sekwestracji dwutlenku węgla (Audigane i in., 2011).

Pakiet programów symulacyjnych TOUGH, rozwijany od lat 80. XX w. przez Lawrence Berkeley National Laboratory, Earth Sciences Division (<http://esd.lbl.gov/research/projects/tough> – stan na 03.09.2015 r.), jest oparty na metodzie różnic skończonych (FDM, ang. *finite difference method*). Składa się z szeregu symulatorów do rozwiązywania różnych zagadnień środowiskowych, m.in. w geotermii, składowaniu odpadów nuklearnych, podziemnym przechowywaniu ropy i gazu, geologicznej sekwestracji dwutlenku węgla oraz innych procesów zachodzących w utworach przepuszczalnych. Podstawowym symulatorem jest program TOUGH2, przeznaczony do modelowania przepływu wielofazowego płynów i ciepła w utworach porowych i szczelinowych. Uzupełniający program TOUGHREACT pozwala dodatkowo na numeryczne modelowanie reakcji chemicznych w układzie ciecz–skała w ośrodkach porowych oraz szczelinowych (Xu i in., 2006). Odgrywa to istotną rolę w prognozowaniu przepuszczalności ośrodka skalnego w długim okresie. Do zmniejszenia przestrzeni porowej, co powoduje pogorszenie przepuszczalności warstwy złożowej, może dochodzić w wyniku wytrącania osadów wtórnych, głównie w strefie okalającej strefę czyn-

ną otworu chłonnego (Kępińska & Bujakowski, 2011), bądź w trakcie eksploatacji wysoko zmineralizowanych wód termalnych (Tomaszewska, 2008). Jednym z istotniejszych modułów jest EWASG, który pozwala modelować wpływ cieczy o wysokiej zawartości NaCl, czyli uwzględniać wpływ zasolenia wody na gęstość, lepkość oraz entalpię wody geotermalnej.

Modele symulacyjne rodziny TOUGH w najnowszych wersjach są zaimplementowane w pakiet PetraSim Version 2015 (<https://www.rockware.com/product/overview.php?id=148> – stan na 03.09.2015 r.) firmy RockWare. Pakiet ten, wykorzystując środowisko graficzne, służy do przygotowania modeli, ich korekt/edycji, a także wizualizacji otrzymanych rezultatów obliczeń.

Geotermalne modelowanie numeryczne z wykorzystaniem modułu EWASG przeprowadzono m.in. dla rejonu Skierniewic (Battistelli & Nagy, 2000; Kępińska & Bujakowski, 2011). Natomiast TOUGH2 zastosowano w obliczeniach przeprowadzonych w ramach przygotowania „Atlasu wykorzystania wód termalnych do skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepłej w układach binarnych w Polsce” (Bujakowski & Tomaszewska, 2014), w którym dla wytypowanych 10 stref opracowano lokalne modele termiki górotworu oraz modele pracy złoża w długim, 50-letnim okresie, pozwalające określić wielkość produkcji energii przy zachowaniu odnawialności naturalnych zasobów energii geotermalnej.

Do symulacji procesów zachodzących w systemach geotermalnych są stosowane również symulatory TETRAD Reservoir Simulation (Shook, 1992), STAR (Pritchett, 1995), SHEMAT (Clauser, 2003) i inne.

### **OPROGRAMOWANIE DO ROZWIĄZYWANIA PROBLEMÓW GEOTERMALNYCH ADAPTOWANE Z INŻYNIERII ZŁOŻ WĘGLOWODORÓW**

W służbie geotermii zastosowanie znajdują również, wykorzystywane głównie w inżynierii złożowej ropy i gazu, symulatory ECLIPSE (<http://www.software.slb.com/products/foundation/Pages/eclipse.aspx> – stan na 03.09.2015 r.). Są one przeznaczone do rozwiązywania zagadnień związanych z dynamiką różnego rodzaju geologicznych systemów złożowych cieczy i gazów. Użycie symulatora ECLIPSE do optymalizacji pracy dubletu geotermalnego, na przykładzie otworów zlokalizowanych w strukturze Wiśniowej koło Strzyżowa, zaprezentowali Machowski i in. (2013). Stworzono trójwymiarowy model hydrodynamiczny, a do symulacji wykorzystano moduły TEMP – transport ciepła, THCONR – przewodność cieplna skał i płynów, SPECHEAT – pojemność cieplna płynów, oraz SPECROCK – pojemność cieplna skał.

### **ADAPTOWANE OPROGRAMOWANIE HYDROGEOLOGICZNE DO OCENY WARUNKÓW KRĄŻENIA WÓD ORAZ TRANSPORTU MASY I CIEPŁA**

Do rozwiązywania zagadnień środowiskowych i symulacji pracy systemów geotermalnych lub konkretnych ujęć jest wykorzystywane również oprogramowanie stosowane w hydrogeologii. Jest ono pomocne w precyzyjnej schematyzacji warunków hydrogeologicznych, pozwala na

uwzględnienie złożoności zachodzących procesów. Oprogramowanie hydrogeologiczne jest używane zarówno do prognoz hydrodynamicznych (krążenie wód), jak i skojarzonych z nimi obliczeń symulacyjnych transportu masy i/lub ciepła. W zależności od rozpatrywanego przypadku są tworzone modele regionalnych bądź lokalnych systemów geotermalnych, symulujące warunki konkretnych złóż i ujęć, jak również przepływ w strefie poszczególnych elementów ujęcia, np. w strefie filtra.

### Metoda różnic skończonych

Podstawowym narzędziem stosowanym do symulacji przepływu wód podziemnych, wykorzystującym metodę różnic skończonych (FDM), jest program MODFLOW. W swojej pierwotnej postaci kod programu został opublikowany w 1984 r. przez U.S. Geological Survey, jako oprogramowanie typu *open source*. Jego modularna struktura pozwala na integrację z dodatkowymi programami bądź modułami przeznaczonymi do rozwiązywania pokrewnych zagadnień (<http://water.usgs.gov/ogw/modflow/> – stan na 03.09.2015 r.). Kolejne wersje rozwojowe programu zostały zweryfikowane przez licznych użytkowników, dzięki czemu MODFLOW jest uznawany za światowego lidera w dziedzinie programów do obliczeń symulacyjnych filtracji wód podziemnych metodą różnic skończonych i z powodzeniem nadal stosowany (Zdechlik & Kulma, 2009). Obecnie podstawową wersją symulatora jest MODFLOW-2005 (tzw. wersja *core*), na bazie której są rozwijane wersje specjalistyczne dla zaawansowanych obliczeń przepływu wód podziemnych (MODFLOW-NWT, MODFLOW-USG, MODFLOW-LGR). Do symulacji transportu masy, na podstawie wyliczonego metodą różnic skończonych (zwykle programem MODFLOW) układu hydrodynamicznego, jest wykorzystywany program MT3DMS. Pierwotną wersję programu (MT3D) zaprezentowano w 1990 r. jako *public domain code*. Obecnie program MT3DMS jest dostępny w wersji 5.3, opublikowanej przez University of Alabama w 2010 r. (<http://hydro.geo.ua.edu/mt3d/> – stan na 03.09.2015 r.). MT3DMS umożliwia symulowanie transportu wieloskładnikowego i w porównaniu do wersji pierwotnej ma zaimplementowane dodatkowe procedury obliczeniowe. Cechuje się również modularną strukturą, co daje możliwość symulowania wielu czynników wpływających na przebieg procesu migracji (m.in. adwekcji, dyspersji, dyfuzji lub podstawowych reakcji chemicznych). Wykorzystanie programu MT3DMS do modelowania transportu ciepła bazuje na założeniu, że zmiany w gęstości i lepkości wody powodowane zmianami temperatury są pomijalne (Zheng, 2010), do obliczeń przyjmuje się stałą gęstość i lepkość wody.

W sytuacji gdy występują większe zmiany temperatury, wpływające znacząco na gęstość i lepkość wody (Ma & Zheng, 2010), lepsze odwzorowanie uzyska się stosując do obliczeń program SEAWAT (Langevin, 2009), umożliwiający określenie zmienności gęstości i lepkości cieczy złożowej podczas transportu ciepła. Program ma budowę modułową i zachowuje kompatybilność z innymi programami rodziny MODFLOW (np. do obliczania bilansów, generowania linii prądu, wspomaganie kalibracji, itd.). Jest to program typu *public domain* (<http://water.usgs.gov/ogw/seawat/> – stan na 03.09.2015 r.), rozpowszechniany bezpłatnie przez U.S. Geological Survey, obecnie w wydaniu SEAWAT Version 4. Od strony programowej jest oparty na

równaniach stosowanych w programach MODFLOW i MT3DMS, umożliwiając symulację przepływu w przestrzeni trójwymiarowej wód podziemnych o zmiennej gęstości (Langevin i in., 2008). SEAWAT nie został stworzony do symulowania bezpośrednio transportu ciepła (podobnie jak MT3DMS), dlatego temperatura i jej zmienność jest symulowana jako jeden ze składników, przyjmując odpowiednie parametry transportu. W efekcie SEAWAT umożliwia symulowanie przepływu wód podziemnych o zmiennej gęstości w połączeniu z wieloskładnikowym transportem substancji rozpuszczonych i ciepła (<http://water.usgs.gov/ogw/seawat/summaryv4.html> – stan na 03.09.2015 r.).

Bezpośrednie wykorzystanie wymienionych symulatorów w realnej działalności aplikacyjnej jest wysoce utrudnione. Są one pozbawione funkcjonalności graficznego wprowadzania danych i wizualizacji wyników, a ich zasadniczym celem jest prowadzenie procesu obliczeniowego (tzw. silnik obliczeniowy – *engine*). Do przygotowania danych i przedstawiania wyników można zastosować inne programy kategorii *public domain* lub *open source*. W praktycznym zastosowaniu jest wykorzystywane komercyjne oprogramowanie do modelowania hydrogeologicznego, o dużo większej funkcjonalności, w którym omawiane symulatory są zaimplementowane. Niepodważalnymi zaletami zunifikowanych środowisk oprogramowania do modelowania hydrogeologicznego są rozbudowane możliwości tworzenia modeli, transformacji i wprowadzania danych oraz analizy uzyskanych rezultatów, niejednokrotnie z możliwością wykorzystania zalet środowiska GIS i tzw. modelowania conceptualnego. Do najważniejszych pakietów komercyjnych wykorzystujących metodę różnic skończonych, współpracujących z omówionymi symulatorami, można zaliczyć (w najnowszych wersjach):

- Visual MODFLOW Flex 2015 (Waterloo Hydrogeologic, <http://www.novamatrixgm.com/groundwater-modeling-software/visual-modflow-flex> – stan na 03.09.2015 r.); program SEAWAT funkcjonuje jedynie z poziomu udostępnianej równorzędnie platformy Visual MODFLOW Classic Interface (wersja z klasycznym interfejsem użytkownika, pozbawiona możliwości operowania modelami koncepcyjnymi);

- Processing Modflow 8 (Simcore Software, [www.simcore.com](http://www.simcore.com) – stan na 03.09.2015 r.);

- GMS 10 – Groundwater Modeling System (Aquaveo, <http://www.aquaveo.com/software/gms-groundwater-modeling-system-introduction> – stan na 03.09.2015 r.).

Przykład wykorzystania oprogramowania z rodziny MODFLOW w badaniach systemów geotermalnych prezentują w swojej pracy Szczepański i Szklarczyk (2006). W celu oceny zasobów odnawialnych dolnojurajskiego zbiornika w rejonie piłskim oraz zasobów eksploatacyjnych projektowanych ujęć przygotowano model dla symulatora MODFLOW. Z modelu regionalnego wyodrębniono model lokalny, na którym zrealizowano obliczenia prognostyczne transportu ciepła, wykorzystując program MT3D. Rezultaty obliczeń przedstawiają przemieszczanie się frontu wód schłodzonych w górotworze w obrębie dipola geotermalnego, w funkcji czasu. Przykłady zastosowania modelowania numerycznego do oceny krążenia wód podziemnych zaprezentowali m.in. Dendys (2013) – z wykorzystaniem programu Visual MODFLOW oraz Kania i in. (2010) – na podstawie zaawansowanego modelowania conceptualnego z wykorzystaniem pakietu GMS w połączeniu ze środowiskiem GIS.

## Metoda elementów skończonych

Do modelowania środowiskowych zagadnień geotermalnych jest wykorzystywane również oprogramowanie oparte na metodzie elementów skończonych (FEM, ang. *finite element method*). Do tej grupy zalicza się program FEFLOW (najnowsza wersja 6.2), rozwijany obecnie przez firmę DHI (<http://www.mikepoweredbydhi.com/products/feflow#> – stan na 03.09.2015 r.). Jest to zunifikowany pakiet programowy, zawierający funkcjonalność graficznego *pre-* i *postprocessingu*, przeznaczony do rozwiązywania zagadnień związanych z przepływem wód, transportem substancji rozpuszczonych oraz ciepła. Pakiet ten umożliwia modelowanie przepływów wód geotermalnych z uwzględnieniem wpływu zmian gęstości i lepkości, a także jednocześnie modelowanie transportu ciepła i masy.

Należy mieć na uwadze zupełnie inną specyfikę pracy z programami opartymi na metodach elementów skończonych, w odniesieniu do tzw. klasycznych modeli hydrogeologicznych. Symulatory FEM bazują na nieregularnych siatkach trójkątnych, zatem tworzenie struktury modelu i przypisywanie danych do poszczególnych węzłów odbywa się zasadniczo z wykorzystaniem procedur zautomatyzowanych. W praktyce ogranicza to swobodę manualnego korygowania przypisywanych wartości. Istnieje możliwość tworzenia modeli dla symulatorów FEM oraz wizualizacji rezultatów tychże obliczeń, z wykorzystaniem zalet środowiska programowego GMS (modelowanie koncepcyjne, integracja z GIS). Zastosowanie metody elementów skończonych w zagadnieniach geotermalnych zaprezentowali m.in. García-Gil i in. (2015), Bridger & Allen (2014), a także liczni inni autorzy (<http://www.theacademybydhi.com/research-and-publications/scientific-publications> – stan na 03.09.2015 r.).

Metodę elementów skończonych wykorzystuje również program Aqua3D, rozwijany od 30 lat przez Vatnaskil Consulting Engineers, Reykjavik (<http://www.vatnaskil.is/softwaredevelopment/aqua3d-.html> – stan na 03.09.2015 r.). Jest to wszechstronny program symulacyjny przeznaczony do rozwiązywania zagadnień związanych z trójwymiarowym przepływem wód podziemnych i transportem masy, w którym model transportu jest w pełni zintegrowany z modelem przepływu. Praktyczne zastosowanie programu Aqua w polskich realiach przedstawił Kapuściński (2011), na przykładzie obliczeń symulacyjnych dla ujęcia wód termalnych w Pyrzycach. Na podstawie dwóch modeli (hydrodynamicznego modelu filtracji oraz dyspersyjnego modelu przepływu ciepła) analizowano płaski strumień wód podziemnych. Zasadniczym celem badań było ustalenie prognozy eksploatacyjnej ujęcia: trwałości temperatur, stopnia współdziałania otworów eksploatacyjnych i chłonnych, granic obszaru zasobowego oraz terenu górniczego.

## PODSUMOWANIE

Modelowanie numeryczne jest powszechnie stosowanym i zarazem najdokładniejszym narzędziem wykorzystywanym w rozwiązywaniu zadań i problemów badawczych związanych z systemami geotermalnymi, od etapu poszukiwań do etapu eksploatacji złoża. Prawdopodobnie wykalibrowany model pozwala na wielokryterialne symulowanie funkcjonowania środowiska geotermalnego, w odpowiedzi na zakładane wymuszenia, związane z konkretnymi rozwiązaniami eksploatacyjnymi, umożliwiając ich optymalizację.

Programy obliczeniowe stosowane w środowiskowych zagadnieniach geotermalnych, zarówno symulatory, jak i oprogramowanie zarządzające modelowaniem, są rozwijane od parudziesięciu lat, co pozwala weryfikować wiarygodność przeprowadzonych prognoz. Rozwój symulatorów następuje w kierunku wprowadzania nowych algorytmów (procedur i metod) obliczeniowych (np. NWT, LGR, USG z rodziny MODFLOW i TVD w MT3DMS). Umożliwia to rozwiązywanie zagadnień dotychczas trudno rozwiązywalnych (np. celem minimalizacji oscylacji numerycznych). Kompleksowe pakiety programowe do symulacji numerycznych zmiernają natomiast w kierunku usprawnienia procesu wprowadzania bądź edytowania danych, a także wizualizacji wyników obliczeń. Odbywa się to poprzez rozwój graficznego interfejsu użytkownika, unifikację ze środowiskiem GIS oraz implementację tzw. modelowania konceptualnego. Przegląd programów wykorzystywanych do modelowania numerycznych procesów środowiskowych w systemach geotermalnych może być pomocny przy wyborze właściwej metody badawczej i odpowiedniego oprogramowania. Tym niemniej warto mieć na uwadze ciągłą ewolucję programów, dzięki której następuje przyspieszenie procesu obliczeniowego (np. optymalizacja procedur obliczeniowych, rekompilacja symulatorów umożliwiająca wykorzystanie zalet środowisk 64-bitowych) lub możliwe staje się rozwiązanie zagadnień dotychczas problematycznych.

Prace badawcze realizowano m.in. w ramach badań statutowych Katedry Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej AGH w Krakowie (11.11.140.026) oraz Projektu Nr 245079, finansowanego ze środków NCBiR (Decyzja Nr DZP/PBS3/2397/2014 na lata 2014–2017).

## LITERATURA

- ARNALDSSON A., BERTHET J.-C., KJARAN S. & SIGURDSSON S. 2014 – Numerical scheme to simulate flow through an isotropic rocks in TOUGH2. *Computers & Geosciences*, 65: 37–45.
- AUDIGANE P., CHIABERGE CH., MATHURIN F., LIONS J. & PICOT-COLBEAUX G. 2011 – A work flow for handling heterogeneous 3D model with the TOUGH2 family of codes: Applications to numerical modelling of CO<sub>2</sub> geological storage. *Computers & Geosciences*, 37: 610–620.
- BATTISTELLI A. & NAGY S. 2000 – Reservoir engineering assessment of low-temperature geothermal resources in the Skierniewice municipality (Poland). *Geothermics*, Vol. 29, 6.
- BORGIA A., PRUESS K., KNEAFSEY T. J., OLDENBURG C.M. & PAN L. 2012 – Numerical simulation of salt precipitation in the fractures of a CO<sub>2</sub>-enhanced geothermal system. *Geothermics*, 44: 13–22.
- BRIDGER D.W. & ALLEN D.M. 2014 – Influence of geologic layering on heat transport and storage in an aquifer thermal energy storage system. *Hydrogeol. J.*, 22: 233–250.
- BUJAKOWSKI F. 2010 – Modelowanie równowagi termodynamicznych wód z horyzontu dolnojurańskiego ujętych w odwiercie geotermalnym Gostynin GT-1. *Prz. Nauk. – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 3 (49): 63–74.
- BUJAKOWSKI W. & TOMASZEWSKA B. (red.) 2014 – Atlas wykorzystania wód termalnych do skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepłej w układach binarnych w Polsce. Wyd. Jak, Kraków.
- CLAUSER CH. (red.) 2003 – Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers: SHEMAT and Processing SHEMAT. Springer Berlin Heidelberg.
- DENDYS M. 2013 – Ocena możliwości zwiększenia wydajności ujęć brzegowych na przykładzie zlewni potoku Rybnika w Sękowej koło Gorlic. *Prz. Geol.*, 61 (11/2): 712–720.
- DENDYS M., TOMASZEWSKA B. & PAJĄK L. 2014 – Modelowanie numeryczne jako narzędzie wspomagające badania systemów geotermalnych. [W:] Krawiec A. & Jamorska I. (red.) *Modele matematyczne w hydrogeologii*: 199–206. Wyd. Nauk. UMK, Toruń.

- FINSTERLE S., SONNENTHAL E. L. & SPYCHER N. 2014 – Advances in subsurface modeling using the TOUGH suite of Simulator. *Computers & Geosciences*, 65: 2–12.
- GAŁA I. 2011 – Wstępne rozpoznanie i charakterystyka siarczkowych wód termalnych w otworze Busko C-1. *Technika Poszukiwań Geologicznych, Geotermia, Zrównoważony Rozwój*, 1/2: 339–348.
- GANGULY S. & KUMAR M.S.M. 2012 – Geothermal Reservoirs – A rief Review. *J. Geol. Soc. of India*, 79: 589–602.
- GARCÍA-GIL A., VÁZQUEZ-SUÑE E., ALCARAZ M.M., JUAN A.S., SÁNCHEZ-NAVARRO J.Á., MONTLEÓ M., RODRÍGUEZ G. & LAO J. 2015 – GIS-supported mapping of low-temperature geothermal potential taking groundwater flow into account. *Renewable Energy*, 77: 268–278.
- KANIA J. 2003 – Geochemical interpretation of thermal fluids from low-temperature wells in Stykkishólmur, W-Iceland and Pyrzyce, NW-Poland. Reports of the United nations University Geothermal Training Programme. Iceland.
- KANIA J., WITCZAK S., OSZCZYPKO N., OSZCZYPKO-CLOWES M., JÓZEFKO I. & BIELEC B. 2010 – Complex flow system model of the Muszyna region (Beskid Sądecki range, Polish Outer Carpathians). *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 441: 63–72.
- KAPUŚCIŃSKI J. 2011 – Modele transportu ciepła. [W:] Dąbrowski S., Kapuściński J., Nowicki K., Przybyłek J. & Szczepański A. *Metodyka modelowania matematycznego w badaniach i obliczeniach hydrogeologicznych*: 333–349. Bogucki Wyd. Nauk., Poznań.
- KĘPIŃSKA B. & BUJAKOWSKI W. (red.) 2011 – Wytoczne projektowe poprawy chłonności skał zbiornikowych w związku z zatłaczaniem wód termalnych w polskich zakładach geotermalnych. Wyd. Patria, Kraków.
- KLESZCZ A. & TOMASZEWSKA B. 2013 – Prognozowanie scalingu na przykładzie wód ujmowanych otworem Bańska PGP-1. *Technika Poszukiwań Geologicznych, Geotermia, Zrównoważony Rozwój*, 1: 115–122.
- LANGEVIN C.D. 2009 – SEAWAT: A Computer Program for Simulation of Variable-Density Groundwater Flow and Multi-Species Solute and Heat Transport: U.S. Geological Survey Fact Sheet: 2009–3047.
- LANGEVIN C.D., THORNE D.T., JR. DAUSMAN A.M., SUKOP M.C. & GUO WEIXING 2008 – SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi Species Solute and Heat Transport: U.S. Geological Survey Techniques and Methods Book 6, Chapter A22.
- LEI H. & ZHU J. 2013 – Numerical modeling of exploitation and reinjection of the Guantao geothermal reservoir in Tanggu District, Tianjin, China. *Geothermics*, 48: 60–68.
- MA R. & ZHENG C. 2010 – Effects of density and viscosity in modeling heat as a groundwater tracer, *Ground Water*, doi: 10.1111/j.1745-6584.2009.00660.x.
- MACHOWSKI W., MACHOWSKI G. & BIAŁECKA K. 2013 – Ocena możliwości pracy dubletu geotermalnego na strukturze Wiśniowej koło Strzyżowa, jako wyniki modelowań dynamicznych. *Technika Poszukiwań Geologicznych, Geotermia, Zrównoważony Rozwój*, 23: 95–108.
- PRITCHETT J.W. 1995 – STAR: A geothermal reservoir simulation system. Proc. World Geothermal Congress, Florence, 18–31 May 1995, 2959–2963.
- PRUESS K., OLDENBURG C. & MORIDIS G. 1999 – TOUGH2 user's guide, ver. 2.0. Report LBNL-43134, Lawrence Berkeley National Laboratory Berkeley, California.
- RECHARD R.P., WILSON M.L. & SEVOUGIAN S.D. 2014 – Progression of performance assessment modeling for the Yucca Mountain disposal system for spent nuclear fuel and high-level radioactive waste. *Reliability Engineering and System Safety*, 122: 96–123.
- SHOOK M. 1992 – TETRAD Reservoir Simulation. Proceedings "Geothermal Energy and the Utility Market – The Opportunities and Challenges for Expanding Geothermal Energy in a Competitive Supply Market. March 24–26, 1992, San Francisco, CA.
- SZCZEPAŃSKI A. & SZKLARCZYK T. 2006 – Modelowanie matematyczne w ocenie zasobów wód geotermalnych. *Geologos*, 10: 253–261.
- TOMASZEWSKA B. 2008 – Prognozowanie kolmatacji instalacji geotermalnych metodą modelowania geochemicznego. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 24 (2/3): 401–407.
- TOMASZEWSKA B. & PAJĄK L. 2012 – Dynamics of clogging processes in injection wells used to pump highly mineralized thermal waters into the sandstone structures lying under the Polish Lowland. *Archives of Environmental Protection*, 38/3: 103–117.
- XU T., SONNENTHAL E.L., SPYCHER N. & PRUESS K. 2006 – TOUGHREACT: a simulation program for non-isothermal multiphase reactive geochemical transport in variably saturated geologic media. *Computers & Geosciences*, 32.
- ZDECHLIK R. & KULMA R. 2009 – Kilka uwag o modelowaniu filtracji wód podziemnych. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 436: 569–574.
- ZENG Y.-CH., WU N.-Y., SU Z. & HU J. 2014 – Numerical simulation of electricity generation potential from fractured granite reservoir through a single horizontal well at Yangbajing geothermal field. *Energy*, 65: 472–487.
- ZHENG C. 2010 – MT3DMS v5.3 Supplemental User's Guide. Department of Geological Sciences, The University of Alabama.