



PRZEGLĄD PROCESÓW ZACHODZĄCYCH W SYSTEMACH HDR W KONTEKŚCIE MODELOWANIA NUMERYCZNEGO EFEKTÓW ICH PRACY

REVIEW OF PROCESSES TAKING PLACE IN HDR SYSTEMS IN THE CONTEXT OF NUMERICAL MODELLING OF THE RESULTS

MACIEJ MIECZNIK¹, LESZEK PAJĄK¹

Abstrakt. W artykule omówiono ideę wykorzystania systemów gorących suchych skał (HDR) do pozyskania energii cieplnej oraz produkcji energii elektrycznej. Zasygnalizowano wpływ warunków ich pracy na osiągane efekty w kontekście ich modelowania numerycznego. Większą uwagę poświęcono kryteriom oceny jakości pracy systemu HDR oraz zagadnieniu modelowania procesów szczelinowania i eksploatacji systemów HDR. Opisano wymagania, jakie według doświadczeń opisanych w literaturze są stawiane na etapie modelowania numerycznego.

Słowa kluczowe: gorące suche skały, HDR, stymulacja hydrauliczna, model numeryczny.

Abstract. The article discusses the idea of using hot dry rock systems (HDR) for the purpose of heat delivery and electricity production. Working conditions of such systems and their influence on system performance are mentioned. More attention is paid to criteria that describe the working performance of HDR. Fracturing and exploitation processes are also described. According to the experiences described in the cited literature, requirements that are placed for numerical simulators are also presented.

Key words: hot dry rocks, HDR, hydraulic stimulation, numerical model.

WPROWADZENIE

W poszukiwaniu źródeł energii geotermalnej o wysokiej temperaturze uwaga naukowców coraz częściej jest skierowana w stronę ośrodków skalnych uważanych dotychczas za nieużyteczne, ze względu na brak czynnika umożliwiającego pozyskiwanie energii cieplnej zakumulowanej w skałach. Ośrodki takie, pomimo korzystnej (często anomalnej) charakterystyki termicznej, charakteryzują się niską lub bardzo niską przepuszczalnością, która uniemożliwia komercyjne wykorzystanie zakumulowanych w nich zasobów energii. Od lat siedemdziesiątych XX wieku są prowadzone badania (Hayashi i in., 1999) mające na celu zwiększenie na-

turalnej przepuszczalności matrycy skalnej poprzez sztuczne utworzenie nowych spękań lub otwarcie istniejących szczelin, zwiększając w rezultacie w istotny sposób przepuszczalność złożeń. Stymulacja hydrauliczna ośrodka często polega na zatłoczeniu pod bardzo dużym ciśnieniem zimnej wody. W rezultacie dochodzi do powstania znaczących naprężeń oraz sił ścinających, przyczyniając się do tworzenia się nowych spękań oraz szczelin, będących drogą do migracji płynu złożowego. Efektem fizycznym, sprzyjającym zwiększeniu przepuszczalności ośrodka, jest zjawisko kontrakcji termicznej. Niekonwencjonalne systemy geotermalne, które

¹ Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, ul. Wybickiego 7, 31-261 Kraków; e-mail: miecznik@meeri.pl, pajak@meeri.pl

powstały w ten sposób, określa się anglojęzycznym terminem EGS (ang. *Enhanced Geothermal System*). W klasie tego typu systemów można wyróżnić między innymi:

- systemy HWR (ang. *Hot Wet Rock*), czyli ośrodki skalne zasobne w wodę, jednak o niewielkim naturalnym zasilaniu, uniemożliwiającym efektywne komercyjne wykorzystanie;
- systemy gorących suchych skał, znanych pod nazwą systemów HDR (ang. *Hot Dry Rock*).

Pierwsze programy pilotażowe zmierzające do wykorzystania systemów HDR uruchomiono w latach osiemdziesiątych XX wieku w Fenton Hill (Nowy Meksyk, USA) oraz w Rosemanowes (Kornwalia, Wielka Brytania). W związku z rozwojem prac nad nowymi typami systemów geotermal-

nych zrodziła się potrzeba powstania programów komputerowych, które byłyby w stanie symulować procesy zachodzące podczas stymulacji hydraulicznej ośrodka oraz sam proces eksploatacji tak powstałego złoża. Programy te powinny równocześnie uwzględniać procesy mechaniki skał, transportu masy i energii oraz zjawiska fizykochemiczne zachodzące w złożu. Osobnym problemem, a zarazem kluczowym w dalszym ulepszaniu symulatorów złożowych, jest dokładność odwzorowania złoża przez reprezentujące go bloki obliczeniowe. Głównym celem tego etapu procesu modelowania jest znalezienie kompromisu pomiędzy możliwie wiernym odwzorowaniem geometrii ośrodka szczelinowego a stabilnością i czasem wykonywania obliczeń.

CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA PRACĘ SYSTEMU HDR

Powodzenie eksploatacji prowadzonej w systemie HDR zależy w głównej mierze od następujących czynników (Willis-Richards, Wallroth, 1995; Butler i in., 2004):

- historii zmian temperatury w otworze produkcyjnym;
- ilości płynu złożowego, który migruje poza obszar eksploatacji;
- energii zużywanej przez pompy obiegowe pokonujące opory przepływu przez złożo.

Na podstawie powyższych kryteriów za kluczowe w ocenie pracy złoża można uznać następujące parametry (Willis-Richards, Wallroth, 1995):

- depresja ciśnienia w okolicy otworów produkcyjnych;
- spadek ciśnienia w złożu;
- objętość aktywnej termicznie części złoża;
- charakter przepływu płynu złożowego w stymulowanej części złoża;
- utrata płynu złożowego poza obszar eksploatacji.

Butler i in. (2004) przedstawili w swojej pracy m.in. wpływ geometrii otworów na pracę systemu HDR w kon-

tekście oceny długotrwałego efektu ekonomicznego. Przetestowali trzy możliwe konfiguracje otworów:

- 4 otwory produkcyjne z umieszczonym centralnie otworem chłonnym;
- 2 otwory produkcyjne z umieszczonym w jednej linii, centralnie, otworem chłonnym;
- dublet otworów.

Autorzy powyższej pracy doszli do wielu interesujących wniosków, spośród których najważniejsze to:

1. Właściwym kryterium oceny pracy złoża nie jest spadek temperatury w otworze produkcyjnym, ale charakter krzywej $E(t)$, czyli produkcja energii netto oraz współczynnik odzysku energii ze złoża.
2. Zwiększenie przepuszczalności złoża musi iść w parze ze zwiększeniem powierzchni wymiany ciepła szczelina–matryca (zagęszczenie szczelin), w przeciwnym wypadku dochodzi do szybkiego wychłodzenia złoża.
3. Energia pozyskiwana netto ze złoża zależy od objętości stymulowanej hydraulicznie części złoża, nie zależy natomiast od konfiguracji otworów.

MODEL NUMERYCZNY

Modelowanie systemów HDR jest bardzo złożone, ze względu na potrzebę uwzględnienia procesów towarzyszących stymulacji hydraulicznej ośrodka, czyli wpływu wysokiego ciśnienia oraz niskiej temperatury zatłaczanej wody na matrycę skalną, co w przypadku konwencjonalnych systemów hydrotermalnych nie jest lub bardzo rzadko bywa przedmiotem modelowania. Pożądane cechy, jakimi powinien charakteryzować się symulator złożowy w przypadku zagadnień modelowania systemów HDR, są następujące (Bower, Zvoloski, 1997; Sanyal i in., 2000; Karvounis, Jenny, 2011):

- jednoznacznie, w sposób dyskretny określona geometria szczelin, możliwość tworzenia gridów o wysokim stopniu nieregularności;
- uwzględnienie szerokości szczeliny w funkcji wywołanych naprężeń i sił ścinających;
- uwzględnienie zależności pomiędzy szerokością szczeliny i przewodnością hydrauliczną;
- uwzględnianie tworzenia się nowych szczelin w trakcie procesu eksploatacji;
- uwzględnianie przepływów zarówno laminarnych, jak i turbulentnych;

- uwzględnienie efektów termoelastycznych oraz tunelowania (ang. *channeling*);
- przepływy wielofazowe;
- uwzględnienie interakcji chemicznych woda–skała.

Alternatywną formą do jawnej dyskretyzacji szczelin jest metoda reprezentacji szczelin i spękań w formie ciągłej (Pruess i in., 1999), która polega na uporządkowanym przebiegu szczelin na granicy kontaktu z blokami matrycy skalnej. Metoda ta pozwala znacznie zaoszczędzić czas przeznaczony na obliczenia. Jak wskazują Karvounis i Jenny (2011), dominujący wpływ na pracę systemu HDR mają duże szczeliny. Autorzy ci sugerują zastosowanie hierarchicznej struktury w modelu złoża, przedstawiając wiodące szczeliny w postaci dyskretnej, natomiast pomniejsze szczeliny i spękania w for-

mie ciągłej. Adaptacja tej metody nie wymaga stosowania rozbudowanych symulatorów, równocześnie symulujących procesy geomechaniczne i transportu energii i masy. Niestety jej wykorzystanie wymaga przyjęcia większej liczby istotnych założeń upraszczających proces.

W przypadku braku możliwości symulacji przebiegu powstałych szczelin należy rozpatrzyć możliwie jak najwięcej wariantów, które uwzględniają: konfigurację i odległość pomiędzy otworami; objętość i geometrię stymulowanej strefy oraz ujednoczoną przepuszczalność strefy złożowej powstałej po zabiegu stymulacji (przepuszczalność matrycy skalnej jest zazwyczaj znana) i na ich podstawie dokonać podstawowej oceny projektu/pracy złoża.

PODSUMOWANIE

W artykule omówiono koncepcję systemów gorących suchych skał. Szczególną uwagę skierowano na procesy zachodzące w ośrodku skalnym podczas stymulacji hydraulicznej oraz ich reprezentacji w modelu numerycznym. W artykule zestawiono główne kryteria oceny pracy systemu HDR oraz wyzwania jakie są stawiane symulatorom złożowym używanym do kompleksowego modelowania procesów eksploatacji energii z takich systemów. Ze wzglę-

du na warunki hydrotermalne panujące w Polsce, m.in. wysokie zasolenie wysokotemperaturowych wód oraz związane z tym problemy – m.in. z korozją oraz utylizacją (Bujakowski i in., 2010), zdaniem autorów należy zwrócić większą uwagę na potencjał energetyczny, jaki wiąże się z wykorzystaniem systemów gorących suchych skał w Polsce, m.in. poprzez tworzenie nowych uregulowań prawnych do rozwoju geotermii (Kępińska, Tomaszewska, 2010).

LITERATURA

- BOWER M.K., ZYVOLOSKI G., 1997 — A numerical model for thermo-hydro-mechanical coupling in fractured rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **34**, 8: 1201–1211.
- BUJAKOWSKI W., HOŁOJUCH G., TOMASZEWSKA B., 2010 — Zbiornik triasowy jako potencjalne źródło wód geotermalnych na przykładzie otworu wiertniczego Kompina-2. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **439**, 1: 71–76.
- BUTLER J.S., SANYAL K.S., ROBERTSON-TAIT A., 2004 — A numerical simulation study of the performance of enhanced geothermal systems. Proc. Twenty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. 26.01–28.01.2004, Stanford.
- HAYASHIK., WILLIS-RICHARDS J., HOPKIRK J.R., NIIBORI Y., 1999 — Numerical models of HDR geothermal reservoirs – a review of current thinking and progress. *Geothermics*, **28**: 507–518.
- KARVOUNIS D., JENNY P., 2011 — Modeling of flow and transport in enhanced geothermal systems. Proc. Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. 31.01–2.02.2011, Stanford.
- KĘPIŃSKA B., TOMASZEWSKA B., 2010 — Główne bariery rozwoju wykorzystania energii geotermalnej w Polsce. Propozycje zmian. *Prz. Geol.*, **58**, 7: 594–598.
- PRUESS K., OLDENBURG C., MORIDIS G., 1999 — TOUGH2 User's Guide, Version 2.0. Lawrence Berkley National Laboratory, University of California, Berkeley.
- SANYAL K.S., BUTLER J.S., SWENSON D., HARDEMAN B., 2000 — Review of the state-of-the-art of numerical simulation of enhanced geothermal systems. Proc. World Geothermal Congress. 28.05–10.06.2000, Kyushu-Tohoku.
- WILLIS-RICHARDS J., WALLROTH T., 1995 — Approaches to the modeling of HDR reservoirs: a review. *Geothermics*, **24**, 3: 307–332.

SUMMARY

Based on widely used nomenclature in the paper: EGS (Enhanced Geothermal System), HWR (Hot Wet Rock) and HDR (Hot Dry Rock) systems are defined. Attention was paid to two ways for numerical modeling such systems:

- more complex way includes coupled numerical modelling of heat and mass flow and mechanical behavior of rocks;
- simplified way is focused on modeling of heat and mass flow with the fractured zone geometry assumed.

The choice of method is usually a compromise between speed, quality (numerical oscillations) and the accuracy of calculations. According to experience described in the literature, success with exploitation of HDR systems depends on:

- thermal history in the vicinity of production well;
- the amount of reservoir fluid, which migrates out of the operation area;
- amount of energy used by circulation pump, which depends on hydraulic resistivity of a reservoir.

Based on these criteria, the following parameters can be considered as crucial (Willis-Richards, Wallroth, 1995):

- pressure depression near to a production well,
- pressure drop in a reservoir,
- the volume of the thermally active part of a reservoir,
- the nature of reservoir fluid flow in the stimulated part of a reservoir,
- loss of working fluid.