

Modelowanie matematyczne w procesie dokumentowania zasobów wód termalnych dla ciepłowni w Pyrzycach (woj. szczecińskie)

Jacek Kapuściński*

O opłacalności budowy ciepłowni geotermalnej decyduje wielkość zasobów energetycznych możliwa do odzyskania z wód termalnych. Zasoby te określane są przez 2 podstawowe parametry: wydajność potencjalną dubletu otworów (lub w szczególnym przypadku pojedynczego otworu) oraz temperaturę pobieranej wody. Przedsiębiorcę inwestującego w budowę ciepłowni geotermalnej interesuje ponadto czas żywotności złoża geotermalnego, a więc gwarancja zachowania temperatury, a także rozległość obszaru górniczego, na którym — zgodnie z prawem geologicznym i górniczym — może być prowadzona działalność wydobywcza.

Aby spełnić wyżej wymienione wymogi niezbędne jest wykonanie prognoz: hydrodynamicznej, która pozwala określić zasięg oddziaływania dubletu i zmiany ciśnień w zbiorniku oraz termicznej w celu określenia przebiegu zmian temperatury eksploatowanej warstwy. Do rozwiązania tych zadań dla ciepłowni geotermalnej w Pyrzycach posłużono się metodą modelowania matematycznego, opartej na numerycznym rozwiązaniu równania przepływu i równania transportu.

Schemat występowania i krążenia wód termalnych w zbiorniku liasowym wraz z zasadami schematyzacji modelowej zostały określone w oparciu o badania otworowe (próbne pompowania) opisane w artykule zamieszczonym w poprzednim numerze *Przeglądu Geologicznego* (nr 1/97 str. 110–114). W artykule tym zamieszczono także mapę dokumentacyjną z lokalizacją wykonanych otworów geotermalnych, na które składają się 2 dublety eksploatacyjno-zatłaczające: GT-1/GT-2 oraz GT-3/GT-4. Pomiary położenia zwierciadła wody wykonane w każdym z czterech otworów po ustaleniu się równowagi termicznej pozwoliły określić spadek hydrauliczny i kierunek przepływu wód. Niewielkie różnice rzędnych zwierciadła wody wskazują na północno-zachodni kierunek odpływu, co jest zgodne z ogólnym obrazem dynamiki tego zbiornika przedstawionym w *Atlasie wód geotermalnych Niżu Polskiego* (red. Górecki, 1990). W pracy tej Szczepański (1990) omówił schematy zasilania dwóch głównych zbiorników mezozoicznych na Niżu Polskim, tj. zbiornika dolnokredowego i dolnojurajskiego. Zasilanie o największym natężeniu ma miejsce w rejonach wschodni otworów mezozoicznych, a więc w peryferyjnych rejonach struktur synklinalnych. Mniej intensywne jest zasilanie poprzez półprzepuszczalne twory czwartorzędowe lub trzeciorzędowe zalegające na wschodniach kredowych, bądź jurajskich oraz poprzez okna hydrogeologiczne w podłożu czwartorzęd. W pograżonych głębiej partiach zbiorników zachodzi zasilanie poprzez przesączanie wody z poziomów nadległych. Ważnym elementem zasilania są też przepływy wzdłuż stref tektonicznych.

Bazę drenażową dla zbiornika dolnokredowego i dolnojurajskiego stanowią według Szczepańskiego (1990) współczesne ciekły powierzchniowe wraz z systemami pradolin. Elementem warunkującym drenaż są te same cechy strukturalno-tektoniczne, które umożliwiają zasilanie, lecz przy odwrotnie skierowanym gradiencie ciśnień. Oczywiście stopień rozpoznania obu zbiorników nie jest wystarczający do

precyzyjnego lokalizowania stref zasilania i drenażu. Niemniej jednak zaliczenie wód termalnych do współczesnego regionalnego systemu krążenia (a w przypadku zbiornika kredowego niekiedy nawet do układów lokalnych) jest elementem istotnym dla metodyki określania zasobów ujęć, bowiem wód tych nie możemy uznać za stagnujące.

W zastosowanym dla modelu Pyrzyc algorytmie obliczeniowym wykorzystano metodę elementów skończonych Galerkiną z trójkątną siecią dyskretyzacyjną o zmiennym kroku. Modelowano płaski strumień wód podziemnych w warunkach jednowarstwowego schematu obliczeniowego dla powierzchni zbiornika ok. 52 km². Wykonano 2 modele: hydrodynamiczny model filtracji oraz dyspersyjny model przepływu ciepła.

Model hydrodynamiczny realizowano w dwóch wariantach:

- a) model niestacjonarny — dla odtworzenia pompowań próbnych i kalibracji modelu,
- b) model stacjonarny — w celu przeprowadzenia długoterminowych prognoz warunków pracy ujęcia.

Model dyspersyjny został wykonany wyłącznie w warunkach transportu niestacjonarnego, przy założeniu ustalonego pola filtracji. Migracja ciepła na modelu dyspersyjnym odbywa się w obrębie pola hydrodynamicznego obliczonego dla prognozowanych wielkości poboru i zatłaczania wód. Niezbędne parametry wynikowe z modelu filtracji (spadki hydrauliczne, kierunki i prędkości przepływu wód) są pobierane do modelu przepływu ciepła jako dane wejściowe.

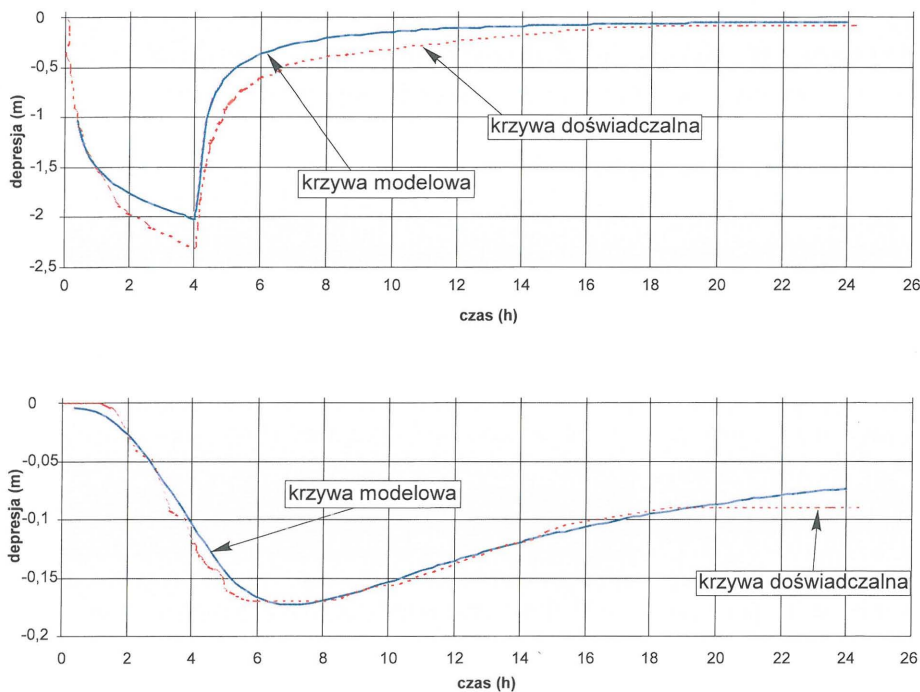
Identyfikacji modelu hydrodynamicznego dokonano poprzez odtworzenie przebiegu czasowego zmian ciśnień w zbiorniku wymuszonych pompowaniem kolejno otworów: GT-1 i GT-3. Jako kryterium dokładności tarowania modelu przyjęto niewielkie — rzędu kilkudziesięciu cm — różnice pomiędzy ciśnieniami zmierzonymi w poszczególnych punktach obserwacyjnych (otworach) a licznymi na modelu.

W wyniku wielu kolejnych symulacji ustalono właściwe dla obu testów parametry hydrodynamiczne warstwy. Podkreślić należy, że nie zmieniano obliczonego w wyniku interpretacji pompowań rozkładu przewodnictwa wodnego, a zmianom — w granicach wyznaczonych przez interpretację pompowań — podlegał głównie współczynnik zasobności sprężystej. Końcowy efekt zgodności obu krzywych: doświadczalnej i modelowej przy pompowaniu otworu GT-1 z wydajnością 221 m³/h pokazano na ryc. 1.

Osiągnięte wyniki identyfikacji modelu uznano za zadowalające do dalszych prac, tj. prognoz eksploatacyjnych określających ukształtowanie pola hydrodynamicznego oraz rozkład temperatur dla pracującego układu 2 dubletów studni. Wykonano wiele wielowariantowych symulacji, w wyniku których określono takie wielkości poboru (tab. 1), które odznaczają się:

- dopuszczalnym stopniem deformacji naturalnych warunków hydrodynamicznych (zarówno jeśli chodzi o depresję, jak i zasięg oddziaływania oraz rozległość obszaru dopływu/odpływu),
 - dopuszczalnym stopniem wychładzania zbiornika (przyjęto kryterium min. 25 lat trwałości temperatury w otworach eksploatacyjnych),
 - wiarygodnym bilansem krążenia wód przedstawionym na modelu (wzrost składników bilansu, jak np. dopływu brzegowego).
- Na mapie hydroizohips odpowiadającej przedstawionym w

*Przedsiębiorstwo Geologiczne w Warszawie POLGEOL, ul. Berezynska 39, 03-908 Warszawa



Ryc. 1. Krzywe identyfikacyjne modelu w warunkach eksploatacji otw. GT-1 z wydajnością 221 m³/h; a — krzywe dla otworu GT-3 zlokalizowanego 225 m od pompowanego, b — krzywe dla otworu GT-2 zlokalizowanego 1525 m od pompowanego

Tab. 1. Prognozowany wznios (+) i spadek ciśnienia (-) w otworach ujęcia Pyrzyce

Numer otworu	Wydajność pompowania/zatłaczania (m ³ /h)	Obliczona depresja w zbiorniku (dep. reg) (m)	Depresja* otworowa (m)	Depresja całkowita (3+4) (m)
GT-1	-170	-6,6	-15,6	-22,2
GT-2	+170	+4,0	+58,6	+62,6
GT-3	-170	-4,4	-28,6	-33,0
GT-4	+170	+4,1	+79,4	+83,5

* — parametr ten jest obliczany na podstawie wydajności jednostkowej otrzymanej z próbnych pompowań

tabeli 1 wydatkom (ryc. 2) zwraca uwagę znaczny zasięg obszaru spływu wody do ujęcia, co jest konsekwencją dominacji dopływu lateralnego nad zasilaniem pionowym. Należy podkreślić, że woda zużyta, która jest zatłaczana na powrót do warstwy wodonośnej nie powraca w całości do otworów eksploatacyjnych. Odpływa ona częściowo także w kierunku północno-zachodnim. Tak więc modelowany układ eksploatacyjno-zatłaczający nie stanowi zamkniętego systemu krążenia, a otwory eksploatacyjne wchodzące w skład dubletu są zasilane nie tylko poprzez powrót wody zatłoczonej, ale również poprzez dopływ lateralny, a więc czerpią wodę z zasobów dynamicznych zbiornika. Oczywiście woda powracająca do zbiornika wzbogaca na powrót jego zasoby, jednak powrót ten następuje w innym punkcie niż miał miejsce pobór i część wody zatłoczonej odpływa zgodnie z kierunkiem regionalnego przepływu, nie będąc na powrót wykorzystana przez otwory eksploatacyjne.

Z zależności tych wynika, że zasoby wód termalnych, nawet w dubletach eksploatacyjno-zatłaczających, są ograniczone możliwościami naturalnego zasilania eksploatowanych poziomów. W tym świetle wiedza o rzeczywistych zasobach wód termalnych możliwych do wykorzystania jest znikoma, na co zwrócili uwagę Marszcek i Płochniewski (1989). Jeśli wody podziemne potraktujemy jako medium niezbędne do odebrania ciepła geotermalnego od skał i doprowadzenia go na powierzchnię, to musimy tym samym przyznać, że również zasoby

energii geotermalnej są ograniczone. Podobny wniosek można wysnuć analizując zmiany temperatury w zbiorniku wód termalnych. Na skutek zatłaczania do zbiornika wód schłodzonych następuje stopniowe przesuwanie się frontu chłodnego od otworu zatłaczającego do eksploatacyjnego (Sauty i in., 1980; Ungemah, 1987). Czas dojścia frontu wód schłodzonych (tzw. czas przebicia) uwarunkowany jest głównie odległością obu otworów oraz prędkością przepływu. Czynnikiem opóźniającym jest tu kondukcyjny dopływ ciepła z dolnych partii skorupy ziemskiej. Pożądane jest wykonywanie szacunkowych obliczeń czasu przebicia frontu chłodnego na etapie projektowania inwestycji geotermalnej, gdyż można wówczas optymalizować wzajemne odległości otworów eksploatacyjnych i zatłaczających z uwzględnieniem wymaganej żywotności złoża oraz rachunku ekonomicznego związanego z budową powierzchniowej sieci ciepłowniczej (Górecki i in., 1990, 1993).

W przypadku ciepłowni w Pyrzycach obliczenia takie wykonano przed podjęciem decyzji o lokalizacji otworów chłodnych.

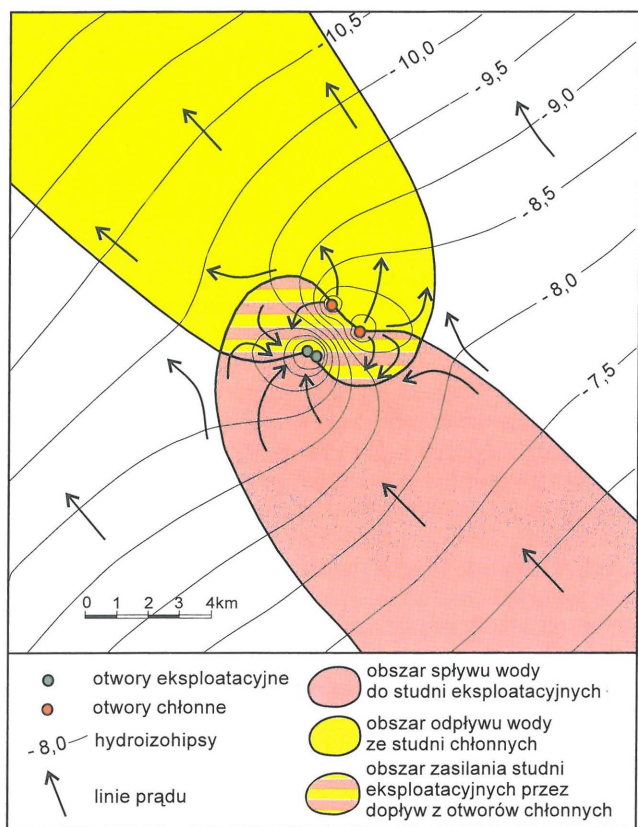
Po przedostaniu się wód schłodzonych do otworu eksploatacyjnego następuje wyczerpanie źródła ciepła geotermalnego w danym rejonie. Jak wykazał Ungemah (1987) czas niezbędny do przywrócenia złoża do stanu pierwotnego (temperatury początkowej) jest mierzony w tysiącach lat, a więc o odnawialności źródła energii cieplnej możemy mówić wyłącznie w skali

geologicznej, nie zaś w skali czasowej życia ludzkiego.

Uwarunkowania powyższe wskazują na zasadność dokumentowania zasobów wód termalnych wraz ze wskazaniem możliwości eksploatacyjnych całych struktur hydrogeologicznych (zbiorników), a więc przy uwzględnieniu zasobów dyspozycyjnych tychże struktur. Według Fridleifsson (1993) o odnawialności zasobów energii geotermalnej możemy mówić jedynie w przypadku zachowania równowagi hydrodynamicznej pomiędzy wielkością poboru wody, a zasilaniem zbiornika. Szacunki zasobów energii bazujące na objętości wody wolnej zawartej w skale (Sokołowski, 1993) mogą okazać się zawyżone, gdyż założona jest w nich nieograniczona praktycznie możliwość korzystania z zasobów wód (por. Ostaficzuk, 1996).

Wynikiem wykonanego dla ujęcia w Pyrzycach modelu transportu ciepła są prognozy kształtowania się temperatury wód w zbiorniku przy założeniu różnych wydajności układu eksploatacyjno-zatłaczającego. Dla przykładowej wydajności 200 m³/h obserwujemy trwałość temperatury w otworach eksploatacyjnych GT-1, GT-3 przez okres ok. 35 lat. Przy poborze 340 m³/h stopniowy spadek temperatury rozpoczyna się według prognozy po ok. 20 latach (ryc. 3).

Po wszechstronnym przeanalizowaniu wyników prognoz modelowych zdecydowano, że optymalna przy obecnym stopniu rozpoznania zbiornika wydajność ujęcia wynosi 340

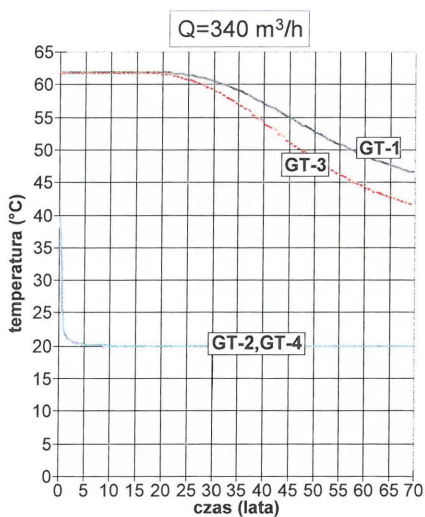
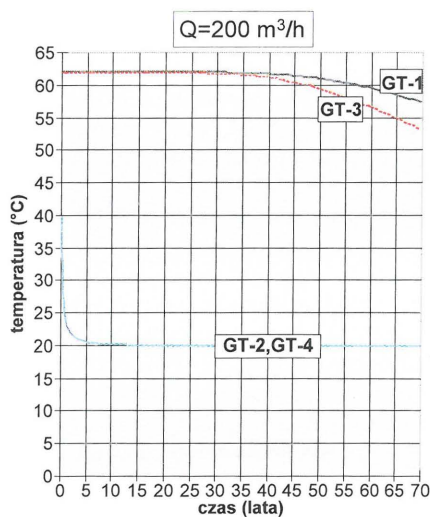


Ryc. 2. Prognozowa mapa hydroizohips zbiornika wód termalnych w Pyrzycach*

Wiarygodność prognoz uzyskanych dla zbiornika wód termalnych na podstawie badań modelowych nie jest z pewnością porównywalna z tą, którą osiąga się na obszarach dobrze rozpoznanych struktur hydrogeologicznych. Jednak alternatywne metody obliczeniowe — np. schematy analityczne, czy graficzne — zwiększają niedokładności nie pozwalając uwzględnić takich zjawisk i procesów jak: naturalny kierunek przepływu wód, niejednorodność i anizotropowość warstwy, zróżnicowane zasilanie, kontakty hydrauliczne z innymi poziomami itp. Nie należy również zapominać, że zgodnie z prawem geologicznym i górniczym dokumentator jest zobowiązany określić granice obszaru górniczego, którego kształt uzależniony jest od parametrów strumienia w warunkach prognozowanej eksploatacji.

Wydaje się więc, że w procesie badania i dokumentowania zasobów wód termalnych modelowanie matematyczne powinno być stosowane jako narzędzie umożliwiające prowadzenie obliczeń symulacyjnych pola filtracji i strumienia cieplnego. W celu uwiarygodnienia modelu powinno się dążyć do weryfikacji wykonanych prognoz na podstawie obserwacji hydrogeologicznych dokonywanych po uruchomieniu ujęcia.

Literatura



Ryc. 3. Prognoza kształtowania się temperatury w otworach ujęcia Pyrzyce dla wydajności $Q=200 \text{ m}^3/\text{h}$ i $Q=340 \text{ m}^3/\text{h}$

m^3/h . Ta wartość została przedstawiona do zatwierdzenia jako zasoby eksploatacyjne. W dokumentacji hydrogeologicznej zaplanowano prowadzenie systematycznych obserwacji ujęcia w trakcie pracy. Na podstawie wyników z tych obserwacji, można będzie w przyszłości znowelizować prognozy modelowe oraz uwiarygodnić wysokość zasobów. W ten sposób nastąpi weryfikacja modelu zalecana w toku prac modelowych (Kazimierski & Macioszczyk, 1996), a niemożliwa dotychczas do wykonania ze względu na zbyt ubogi zestaw danych wejściowych.

*Wartości izolacji przedstawionych na mapie są ujemne, ponieważ powierzchnia piezometryczna kształtuje się poniżej poziomu morza.

- FRIDLEIFSSON I.B. 1993 — Tech. Poszuk. Geol. Geosynopt. Geoter., 32: 1–16.
- GÓRECKI W. (red.) 1990 — Atlas wód geotermalnych Nizżu Polskiego. Inst. Surow. Energet. AGH, Kraków.
- GÓRECKI W., HAŁADUS A., SZKLARCZYK T. & UGOREC W. 1990 — Tech. Poszuk. Geol. Geosynopt. Geoter., 2: 23–28.
- GÓRECKI W., SZKLARCZYK T., KUŹNIAK T., ŁAPINKIEWICZ P., SOBOŃ J., PACZYŃSKI B., PŁOCHNIEWSKI Z., ADAMCZYK A. & HAŁADUS A. 1993 — Metodyka oceny zasobów energii i wód geotermalnych. GEOS—Kraków.
- KAZIMIERSKI B. & MACIOSZCZYK T. 1996 — [In:] Ustalanie dyspozycyjnych zasobów wód podziemnych, poradnik metodyczny. Wyd. MOŚNiL.
- MARSZCZEK T. & PŁOCHNIEWSKI Z. 1989 — Tech. Poszuk. Geol. Geosynopt. Geoter., 28: 43–47.
- OSTAFICZUK S. 1996 — Prz. Geol., 44: 249–254.
- SOKOŁOWSKI J. 1993 — Tech. Poszuk. Geol. Geosynopt. Geoter., 32: 67–80.
- SAUTY J.P., GRINGARTEN A.C., LANDEL P.A. & MENJOZ A. 1980 — [In:] Advances in European Geothermal Research. Strub. A.S. and Ungemach, (Eds): 706–719.
- SZCZEPAŃSKI A. 1990 — [In:] Atlasie wód geotermalnych Nizżu Polskiego, W. Górecki (red.). Inst. Surow. Energet. AGH, Kraków.
- UNGEMAH P. 1987 — Reservoir Engineering Assessment of a Low Entalpy Geothermal Field Pari Basin. Ender Okandan (ed.), Geothermal Reservoir Engineering, NATO ASI, Ser. E: Appl. Sc., 150, Kluwer Acad. Publ.: 1–332.