



## EFEKT TERMICZNY W OTWORACH GEOTERMALNYCH – WYKORZYSTANIE JĘZYKA PYTHON DO AUTOMATYZACJI OBLICZEŃ

Maciej MIECZNIK<sup>1</sup>, Karol PIERZCHAŁA<sup>1</sup>, Beata KĘPIŃSKA<sup>1</sup>, Leszek PAJAŁK<sup>1</sup>, Bogusław BIELEC<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN; miecznik@min-pan.krakow.pl*

**Słowa kluczowe:** efekt termiczny, wygrzewanie otworu, otwory geotermalne, kalibracja, projekt GeoModel

### Wstęp

Interpretacja testów otworowych, bądź wieloletnich obserwacji z monitoringu parametrów głowicowych, jest niezwykle cennym narzędziem w prawidłowej ocenie zasobów geotermalnych. Pomimo korzystania z tych samych zależności opisujących hydraulikę przepływu wód geotermalnych jak w przypadku wód zwykłych lub ropy naftowej, to istotnym czynnikiem, który wprowadza pewną korektę do interpretacji otrzymanych wyników, jest wpływ temperatury na gęstość wody. Duże wahania temperatury wody lub solanki podczas pompowania otworu w znaczący sposób zaburzają odczyt rejestrowanych danych – poziom zwierciadła dynamicznego lub ciśnienia głowicowego. Częstokroć, wobec braku obserwacji oczekiwanych kształtów krzywych depresji lub odbudowy zwierciadła, uniemożliwia to poprawną interpretację testów hydrodynamicznych. Koniecznością wtedy jest wykorzystanie tylko części danych, które charakteryzują się odpowiednią jakością, co niestety przekłada się na mniejszą wiarygodność otrzymanej w rezultacie obliczeń przewodności hydraulicznej.

### Cel badań

Rozwiązaniem większości z wymienionych we Wstępie problemów jest zastosowanie korekty efektu termicznego, dzięki czemu zastosowanie klasycznych równań dynamiki płynów z przemysłu naftowego / hydrogeologii jest w pełni uzasadnione. Niniejszy abstrakt przedstawia narzędzie opracowane w języku programowania Python o nazwie THERMALIFT CALC, który usprawnia obliczenia i generuje odpowiednio przefiltrowane dane oraz wykresy, które mogą zostać wykorzystane w dalszej interpretacji. W rezultacie otrzymuje się taki poziom zwierciadła dynamicznego lub ciśnienia głowicowego, który umożliwia poprawne oszacowanie przewodności hydraulicznej zbiornika geotermalnego. Omawiane narzędzie zostało opracowane w ramach projektu „*Optymalne zarządzanie niskotemperaturowymi zbiornikami geotermalnymi – polsko-islandzka współpraca w zakresie modelowania złóż*”, akronim GeoModel.

### Materiały i metody

Efekt termicznego wygrzewania otworu geotermalnego w trakcie eksploatacji jest zjawiskiem znanym (Kawecki 1995, Bielec i Miecznik 2012, Miecznik 2017), choć niestety dość często zaniebywanym. Wskutek rozszerzalności cieplnej wody wraz ze wzrostem temperatury, obserwuje się wyższy poziom zwierciadła lub wyższą wartość ciśnienia głowicowego niż w przypadku, gdyby efekt ten nie zachodził. Obserwuje się zatem mniejszą depresję niż w sytuacji gdy ten efekt nie zachodzi, a mimo to, do interpretacji testów hydrodynamicznych stosuje się równania dla wód zwykłych. W rezultacie interpretacji tak zaburzonego odczytu, otrzymuje się wyższą przewodność hydrauliczną zbiornika niż jest w rzeczywistości. W skrajnych przypadkach może to prowadzić do nadmiernej eksploatacji zasobów, a zwłaszcza znaczącego spadku ciśnienia złożowego.

Na figurze 1 zaprezentowano rozkład temperatury w otworze w warunkach statycznych oraz w trakcie pompowania. W warunkach statycznych, rozkład temperatury w otworze jest tożsamy z rozkładem temperatury w górotworze. Oznacza to, że słup wody w otworze stojącym może charakteryzować się dużą zmiennością gęstości. W trakcie pompowania następuje stopniowe wygrzewanie otworu. Temperatura na głowicy jest tym bardziej zbliżona do temperatury dennej im dłużej trwa wydobycie lub im wyższy jest strumień eksploatowanego płynu. Różnica gęstości słupa wody w pompowanym otworze jest niewielka.

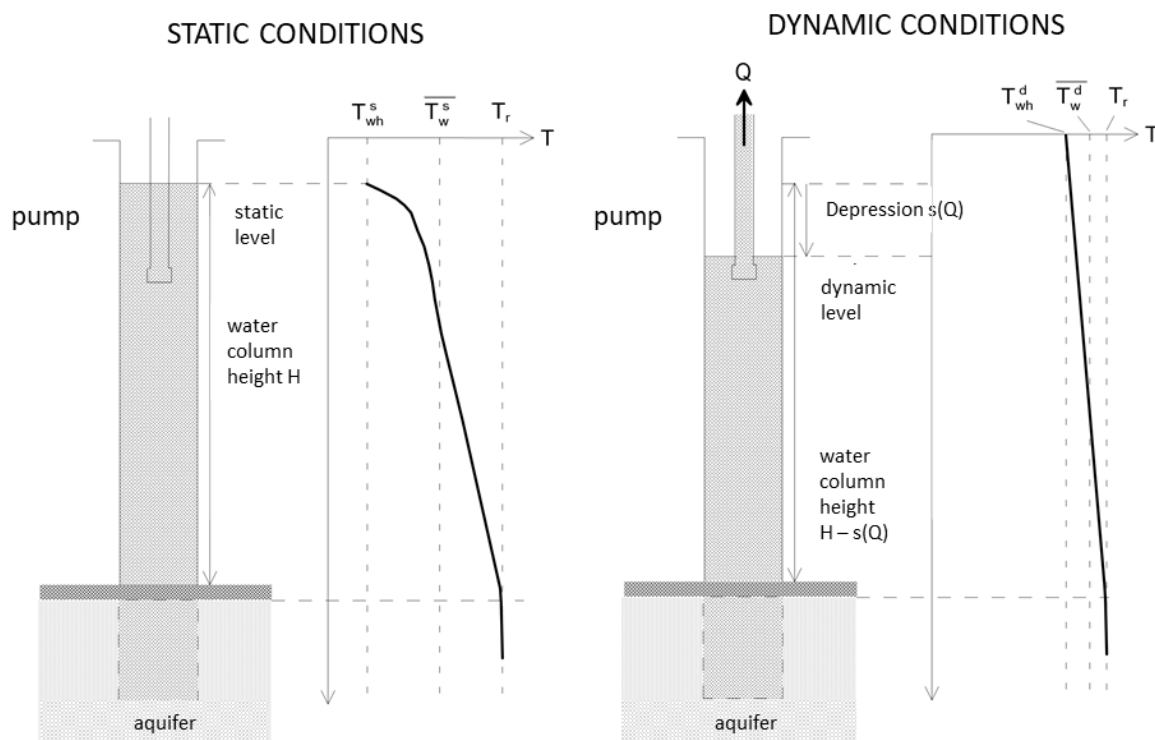


Fig. 1. Schemat pokazujący rozkład temperatury w otworze w warunkach statycznych oraz dynamicznych (Miecznik, 2017)

Wyprowadzenie zależności matematycznych prowadzących do równania na tzw. ciśnienie głowicowe zredukowane, zostało przedstawione w cytowanej literaturze. Jego ostateczna postać jest następująca:

$$p_{wh}^{red} = p_{wh,0} - s(\overline{T_w^s}) \cdot \rho_w(\overline{T_w^s}) \cdot g = p_{wh} - \left[ 1 - \frac{\rho_w(\overline{T_w^d})}{\rho_w(\overline{T_w^s})} \right] \cdot \rho_w(\overline{T_w^s}) \cdot L \cdot g$$

gdzie:

- $p_{wh,0}$  – ciśnienie głowicowe otworu w warunkach statycznych
- $p_{wh}$  – ciśnienie głowicowe otworu w warunkach dynamicznych
- $s(\overline{T_w^s})$  – depresja w otworze, tj. różnica pomiędzy poziomem zwierciadła wody w warunkach statycznych i dynamicznych
- $\rho_w(\overline{T_w^s})$  – gęstość wody dla średniej temperatury wody w warunkach statycznych
- $\rho_w(\overline{T_w^d})$  – gęstość wody dla średniej temperatury wody w warunkach dynamicznych
- $L$  – długość otworu
- $g$  – przyspieszenie ziemskie (grawitacyjne)

Tym samym, rzeczywista depresja z pominięciem wpływu efektu wygrzewania otworu, znając jedynie statyczne i chwilowe ciśnienie głowicowe oraz oszacowaną średnią temperaturę słupa wody w warunkach statycznych i dynamicznych, wynosi (wyrażona w metrach słupa wody):

$$s(\overline{T_w^s}) = \frac{p_{wh,0} - p_{wh}}{\rho_w(\overline{T_w^s}) g} + \left[ 1 - \frac{\rho_w(\overline{T_w^d})}{\rho_w(\overline{T_w^s})} \right] \cdot L$$

Jak można zauważyć, efekt termicznego wygrzewania otworu jest tym bardziej istotny, im głębszy jest otwór oraz im większa jest różnica temperatur pomiędzy dnem a głowicą otworu. Dla takich otworów szczególnie istotne jest wykonanie korekty wyników pompowania ze względu na wygrzewanie otworu.

W celu automatyzacji obliczeń opracowano skrypt THERMALIFT CALC, który umożliwia obliczenie zarówno rzeczywistej wartości depresji w otworze, jak i ciśnienie głowicowe zredukowane. Skrypt umożliwia analizę testów hydrodynamicznych oraz długoletniej historii eksploatacji zarówno dla wód zwykłych, jak i silnie zasolonych. Zasolenie może być podawane jako stężenie procentowe ( $\text{kg}_{\text{NaCl}}/\text{kg}$  płynu), jak i w



wartościach bezwzględnych, tj.  $g_{NaCl}/dm^3$  płynu. Ponadto generowane są odpowiednie wykresy, a wyniki można wyeksportować do formatów txt, xlsx lub csv.

## Rezultaty

Efekt zastosowania omawianego narzędzia został zaprezentowany na przykładzie jednego z otworów na Niżu Polskim, dla którego zostało wykonane 3-stopniowe pompowanie wraz z odbudową zwierciadła po pierwszym i trzecim stopniu (Fig. 2).

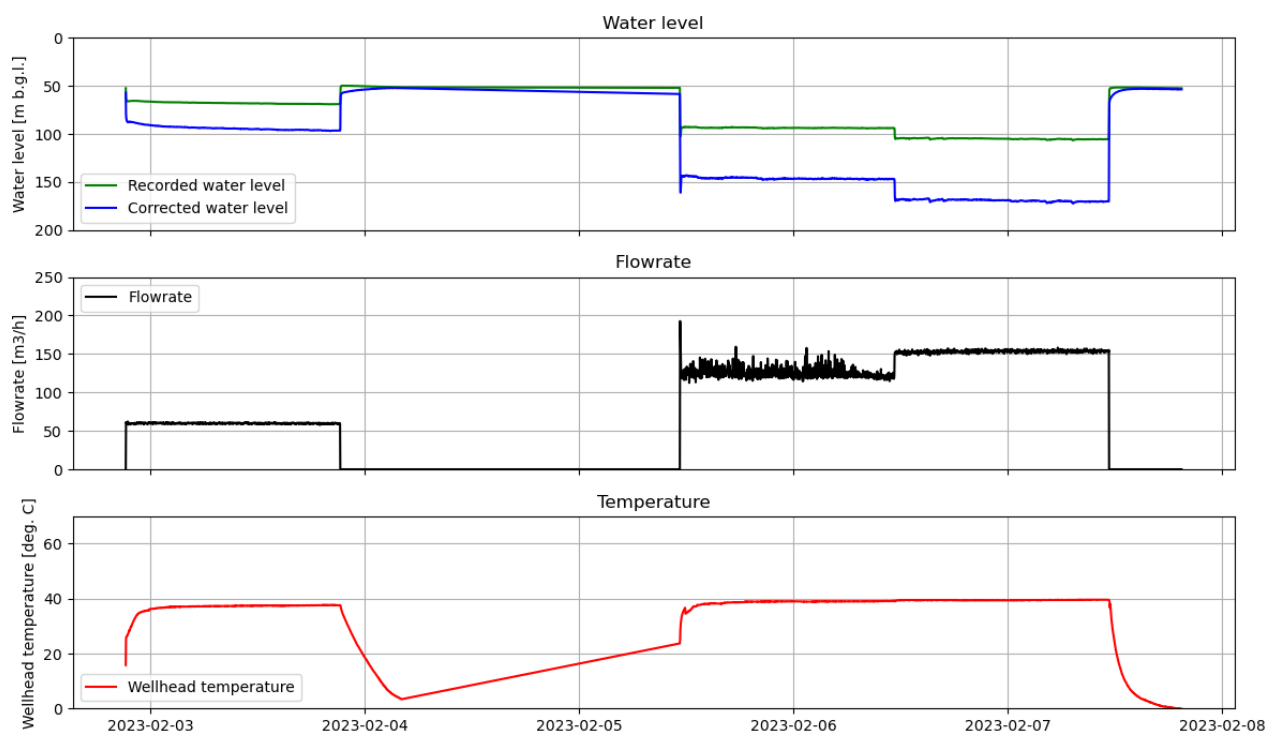


Fig. 2. Efekt zastosowania skryptu THERMALIFT CALC dla testu hydrodynamicznego wykonanego w jednym z otworów na Niżu Polskim

Kolorem zielonym na górnym wykresie zaznaczono zarejestrowany poziom lustra wody w trakcie testu. Charakter krzywych zarówno podczas pompowania, jak i odbudowy zwierciadła, odbiega od oczekiwanego. Po zastosowaniu opracowanego narzędzia, bardziej wyraźnie zaznacza się zależność pomiędzy wzrostem wydajności pompowania a spadkiem poziomu zwierciadła wody w otworze. W trakcie odbudowy zwierciadła widać natomiast bardziej wyraźnie stopniowy dopływ coraz większych mas wody do otworu (krzywa niebieska).

Narzędzie THERMALIFT CALC jest obecnie w fazie rozwoju. Jego pierwszą wersję będzie można pobrać całkowicie za darmo ze strony projektu GeoModel ([www.geomodel.pl](http://www.geomodel.pl)) prawdopodobnie pod koniec 2023 roku.

Abstrakt podaje niektóre wyniki prac realizowanych w ramach projektu „Optymalne zarządzanie niskotemperaturowymi zbiornikami geotermalnymi – polsko-islandzka współpraca w zakresie modelowania złóż”, akronim GeoModel, finansowanego ze środków Funduszu Współpracy Dwustronnej Mechanizmu Finansowego Europejskiego Obszaru Gospodarczego i Norweskiego Mechanizmu Finansowego 2014-2021 w ramach Programu Środowisko, Energia i Zmiany klimatu, umowa nr 2/UoD/FWD/MKiS/2022.

## Literatura

- Kawecki M., 1995. Correction for temperature effect in the recovery of a pumped well. *Ground Water*, 33(6): 917–926
- Bielec B., Miecznik M., 2012. Efekt termiczny w obliczeniach przewodności hydraulicznej w otworach ujmujących wodę termalną. *Technika Poszukiwań Geologicznych, Geotermia, Zrównoważony Rozwój*, 51(2): 45–54.
- Miecznik M., 2017. Model zrównoważonej eksploatacji zbiornika wód geotermalnych w centralnej części Podhala do produkcji energii cieplnej i elektrycznej. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.