Ćwiczenie 2

Interpretacja Testu Reakcji Termicznej

Zawartość

Wstęp	1
Opis badania	1
Interpretacja wyników	2
Literatura	

Wstęp

Pierwsze urządzenia do Testów Reakcji Termicznej (TRT) powstały w Szwecji (Uniwersytecie Technologicznym w Lulea) (Gehlin 2002) oraz Stanach Zjednoczonych (Uniwersytet w Oklahomie) w roku 1995 (Śliwa i in. 2016).

Za pomocą Testu Reakcji Termicznej możliwe jest poznanie parametrów cieplnych przewiercanych skał. Jest to zagadnienie szczególnie ważne, aby móc prawidłowo zaprojektować konstrukcje, liczbę oraz rozmieszczenie otworowych wymienników ciepła. Test Reakcji Termicznej jest metodą na określenie oceny faktycznych właściwości cieplnych górotworu w badanym miejscu (Śliwa i in. 2016, Gonet i Śliwa 2010).

Test reakcji termicznej wymienników otworowych polega na pomiarze zmian temperatury nośnika ciepła podczas jego cyrkulacji w obiegu zamkniętym z dostarczeniem lub odbieraniem energii cieplnej o stałej mocy grzewczej. Należy w układzie powierzchniowym zapewnić brak wpływu warunków atmosferycznych na pomiary temperatur (Gonet i in. 2011).

Obecnie jedno z urządzeń do Testu Reakcji Termicznej znajduje się na wyposażeniu Laboratorium Geoenergetyki Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH w Krakowie.

Opis badania

Wykonanie Testu Reakcji Termicznej możliwe jest na uprzednio odpowiednio wykonanym i przygotowanym otworowym wymienniku ciepła. Pierwszym etapem instalacji urządzenia jest prawidłowe podłączenie rurek otworowego wymiennika ciepła z modułem zaworów. Za pomocą rurek wymiennika otworowego połączonych z zaworami możliwe jest wymuszenie obiegu medium roboczego. Najczęściej medium roboczym jest woda lub roztwór glikolu. Medium to krąży wewnątrz wymiennika dzięki pracy pompy cyrkulacyjnej. Urządzenie do TRT zasilane jest elektrycznie, co poprzez użycie grzałki umożliwia podgrzanie czynnika płynnego. Wykonywano także badania z chłodzeniem nośnika ciepła, co bardziej odpowiada najczęstszej rzeczywistej pracy wymienników otworowych. Jednak próby te wykazały trudności z utrzymaniem stałej mocy chłodniczej podczas testu (Śliwa i in. 2016).

Za początek badania uważa się punkt, gdy na grzałce ustawi się stała moc grzewcza. W czasie grzania następuje rejestracja takich danych takich jak temperatura zasilania i powrotu czynnika roboczego oraz przepływ chwilowy, a także temperatura atmosferyczna (zewnętrzna).Wartości te są zapisywane w pamięci komputera współpracującego z urządzeniem. Warunkiem otrzymania poprawnych wyników oraz umożliwienie poprawnej ich interpretacji jest odpowiednio długi czas przeprowadzenia testu. Czas ten powinien umożliwić doprowadzić do zmian temperaturowych nie tylko w obrębie materiału wypełniającego otwór, ale także otaczających górotworu. Sugerowany czas trwania TRT wynosi 100 godzin (Złotkowski i in. 2011). Po wykonaniu badania kolejnym krokiem jest interpretacja jego wyników.

Interpretacja wyników

Rozkład temperatury T w funkcji czasu t i promienia odległości od osi otworu r przy stałej mocy cieplnej opisano w następującym równaniu:

$$T(r,t) = T_0 + \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \cong T_0 + \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left[\ln\left(\frac{4\alpha \cdot t}{r^2}\right) - \gamma \right]$$
(1)

gdzie:

 T_o średnia temperatura dla profilu, K,

q starty ciepła na jednostkę głębokości, W·m⁻¹,

 γ stała Euler'a, $\gamma = 0.5772156$.

Straty ciepła lub przyrosty ciepła na jednostkę głębokości są opisane następująco:

$$q = \frac{Q}{H} \tag{2}$$

gdzie:

Q moc grzewcza, W,

H głębokość otworowego wymiennika ciepła, m.

Dyfuzyjność cieplna skał, m²·s⁻¹, określona jest równaniem:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c_V} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \tag{3}$$

gdzie:

 λ przewodność cieplna skał, W·m⁻¹·K⁻¹,

 c_V ciepło właściwe skał, J·m⁻³·K⁻¹,

c ciepło właściwe, J·kg⁻¹·K⁻¹,

 ρ gęstość skał, kg·m⁻³.

Oraz podstawiając:

$$u = \frac{r^2}{4\alpha \cdot t} \tag{4}$$

gdzie:

r promień odwiertu, m,

t czas, s.

Czas testu i czas przyjęty jako początek interpretacji powyższej funkcji w systemie półlogarytmicznym jest ważny w każdym TRT. Błąd obliczeniowy wynosi 2,5%, gdy czas jest dłuższy lub równy $20r^2/\alpha$ oraz 10% gdy t $\geq 5r^2/\alpha$. W wielu interpretacjach określa się temperaturę nośnika ciepła na wlocie i wylocie z wymiennika w funkcji czasu trwania testu. Efektywną przewodność cieplną można obliczyć na podstawie poniższego równania (Gonet and Śliwa 2008, Gonet i in. 2012):

$$\lambda_{eff} = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot k} \tag{5}$$

gdzie:

Q średnia moc cieplna, W,

H głębokość otworowego wymiennika ciepła, m,

k współczynnik nachylenia (prostych) linii trendów, reprezentujący wykres temperatury nośnika ciepła od logarytmu naturalnego czasu fazy grzania TRT.

Istnieje również druga metoda obliczania efektywnej przewodności cieplnej. W oparciu o tę metodę należy obliczyć średnią moc grzewczą, która jest średnią arytmetyczną mocy chwilowych (Gonet i in. 2011):

$$Q = \frac{\sum_{l}^{n} Q_{ch}}{n} \tag{6}$$

gdzie:

 Q_{ch} moce chwilowe (tymczasowe), W,

n liczba rekordów odnotowanych w fazie grzewczej testu.
 Chwilowa moc grzewcza obliczana jest na podstawie wzoru:

$$Q_{ch} = \dot{V} \cdot c \cdot \rho \cdot \Delta T \tag{7}$$

gdzie:

 \dot{V} strumień objętości nośnika ciepła, m³·s⁻¹,

c ciepło właściwe nośnika ciepła, dla wody: $c = 4182 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,

 ΔT różnica pomiędzy temperaturą zasilania i temperaturą powrotu, K,

 ρ gęstość wody, kg·m⁻³.

Obliczenia uwzględniają również zależność gęstości wody od temperatury. Gęstość obliczono na podstawie wzoru empirycznego (Gonet i in. 2011):

$$\rho_f(T) = 999,90132 + 5,0822326 \cdot 10^{-2} \cdot T + 7,5834305 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 4,4321419 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 1,544289 \cdot 10^{-7} \cdot T^4$$
(8)

Współczynnik k oblicza się ze wzoru (Śliwa i in. 2016):

$$k = \frac{n\sum xy - (\sum x)(\sum y)}{n\sum x^2 - (\sum x)^2}$$
(9)

gdzie:

x logarytm naturalny czasu (czas w sekundach liczony od momentu włączenia grzałek do chwili ich wyłączenia (od t = 1 s)),

y temperatura nośnika ciepła.

Współczynnik k oblicza się oddzielnie dla temperatury zasilania, temperatury powrotu i średniej temperatury. Średnia temperatura jest definiowana za pomocą następującego wzoru:

$$T_{sr} = \frac{T_z + T_p}{2} \tag{10}$$

gdzie:

 T_z temperatura zasilana, K,

 T_p temperatura powrotu, K.

Efektywny współczynnik przewodności cieplnej skał można obliczyć za pomocą wzoru (Gonet i in. 2011):

$$\lambda_{eff} = \frac{\frac{q}{4 \cdot \pi} \left[\ln \frac{t_2}{t_1} + \frac{r_o^2(t_1 - t_2)}{4 \cdot \alpha \cdot t_1 \cdot t_2} \right]}{T(t_2) - T(t_1)}$$
(11)

gdzie:

- t_1 czas początkowy, s,
- t_2 czas końcowy, s,
- q straty ciepła na jednostkę głębokości, W·m⁻¹,
- *r*_o promień odwiertu, m,
- α współczynnik przewodności temperaturowej skały,m²·s⁻¹,
- $T(t_1)$ średnia temperatura nośnika ciepła w czasie t_1 ,
- $T(t_2)$ średnia temperatura nośnika ciepła w czasie t_2 .

Czasy t₁ i t₂ odnoszą się do początku i końca zakresu, dla którego obliczany jest współczynnik λ_{ef} (Gonet i Śliwa 2008, Gonet i in. 2012).

Temperatury $T(t_1)$ i $T(t_2)$ są określane za pomocą następujących danych: x = ln(t) oraz $y=T_{sr}$. Dla danego przedziału czasowego wyznaczany jest współczynnik nachylenia k oraz punkt przecięcia linii z osią Y (punkt b). Przecięcie jest punktem, w którym linia regresji, prowadząca przez znane wartości x i y, przecina oś Y (Gonet i Śliwa 2008, Gonet i in. 2012).

Poniższy wzór opisuje punkt b:

$$b = \overline{y} - k \cdot \overline{x} \tag{12}$$

gdzie:

 \overline{y} średnia arytmetyczna średniej temperatury w danym przedziale czasowym,

- x średnia arytmetyczna z ln(t) w danym przedziale czasu,
- *k* współczynnik nachylenia.

Następnie tworzy się następujący wzór (Śliwa i in. 2016):

$$T_{av(reg)} = k \cdot x + b \tag{13}$$

gdzie:

 $T_{\text{sr(reg)}}$ temperatura z funkcji regresji liniowej ($T(t_1)$ lub $T(t_2)$), x = ln(t_1) lub ln(t_2).

Dzięki takiemu podejściu unika się ewentualnych zaburzeń rejestracji temperatury podczas TRT przy granicach badanego czasu trwania (t_1 i t_2) w równaniu 7 (Gonet i Śliwa 2008, Gonet i in. 2012).

Kolejnym ważnym parametrem otworowego wymiennika ciepła jest jego oporność termiczna. Aby obliczyć oporność cieplną R_b wymiennika otworowego, należy znać wymiary otworu wiertniczego (średnica *d*) oraz właściwości cieplne skał (przewodność cieplna λ , ciepło właściwe oraz gęstość skały ρ). Dzięki profilowaniu otrzymuje się średnią temperaturę T_o . Następnie, w oparciu o przebieg TRT przy stałej mocy Q, temperaturę zasilania i temperaturę powrotu, a także czas trwania testu t. Tylko przy tych warunkach można zdefiniować oporność cieplną otworu wiertniczego za pomocą wzoru (Gonet i in. 2011):

$$R_{q} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \left[\ln \frac{4 \cdot \alpha \cdot t}{r_{o}^{2}} + \frac{r_{0}^{2}}{4 \cdot \alpha \cdot t} - \gamma \right]$$
(14)

W praktyce $\frac{r_o^2}{4 \cdot \alpha \cdot t}$ jest pomijane, stąd też wzór przyjmuje następującą postać::

$$R_{q} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \left[\ln \frac{4 \cdot \alpha \cdot t}{r_{o}^{2}} - \gamma \right]$$
(15)

Opór cieplny otworowego wymiennika ciepła określa się za pomocą wzoru::

$$R_{b} = \frac{1}{q}(T_{av} - T_{0}) - \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \left[\ln \frac{4 \cdot \alpha \cdot t}{r_{o}^{2}} + \frac{r_{0}^{2}}{4 \cdot \alpha \cdot t} - \gamma \right]$$
(16)

po uwzględnieniu poprzedniej uwagi wzór przyjmuje postać:

$$R_{b} = \frac{1}{q}(T_{av} - T_{0}) - \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \left[\ln \frac{4 \cdot \alpha \cdot t}{r_{o}^{2}} - \gamma \right] = \frac{1}{q}(T_{av} - T_{0}) - R_{q}$$
(17)

gdzie:

q strata ciepła na jednostkę głębokości, W·m⁻¹,

- $T_{\acute{s}r}$ średnia temperatura nośnika ciepła, °C,
- T_0 średnia temperatura profilu, °C,

- λ przewodnictwo cieplne górotworu, W·m⁻¹·K⁻¹,
- t czas, s,
- α dyfuzyjność cieplna górotworu, m²·s⁻¹,
- *r*_o promień otworu wiertniczego, m,
- γ Stała Eulera, $\gamma = 0,5772156$.

Niejednokrotnie pomimo, że przebieg testu reakcji termicznej jest prawie podręcznikowy (idealny), to pojawiają się rozbieżności w wartościach przewodności termicznej oraz oporności cieplnej wymiennika otworowego. Wynikają one z przyjęcia różnych przedziałów danych poddanych analizie. W wielu przypadkach obserwuje się zmienność wartości przewodności termicznej skał od czasu wykonywania TRT (rys. 1, 2 oraz 3).



Rys. 1. Przykładowa zależność efektywnego współczynnika przewodności cieplnej skał od czasu trwania testu reakcji termicznej



Rys. 2. Przykładowa zależność efektywnego współczynnika przewodności cieplnej skał od czasu trwania testu reakcji termicznej



Rys. 3. Przykładowa zależność efektywnego współczynnika przewodności cieplnej skał od czasu trwania testu reakcji termicznej

Na rysunku 1 zależność jest rosnąca z czasem, na rysunku 2 malejąca, a na rysunku 3 oscyluje wokół pewnej wartości.

Literatura

- 1. Gehlin S., Thermal Response Test, Method Development and Evaluation, Doctoral Thesis, Lulea University of Technology, 2002
- Gonet A., Śliwa T., Ekonomiczna analiza możliwiści wykorzystania niskotemperaturowej energii geotermlanej w Busku Zdroju., Wody siarczkowe w rejonie Busku Zdroju. Hydrotechnika Sp. z o.o. Kielce, 2010
- Gonet A., Śliwa T., Stryczek S., Sapińska-Śliwa A., Jaszczur M., Pająk L., Złotkowski A., Metodyka identyfikacji potencjału cieplnego górotworu wraz z technologią wykonywania i eksploatacji otworowych wymienników ciepła, Wydawnictwa AGH, Kraków 2011
- Gonet A., Śliwa T., Thermal response test on the example of borehole heat exchangers in Ecological Park of Education and Amusement "OSSA", Transport & Logistics = Doprava a Logistika – Dokument elektroniczny, Czasopismo elektroniczne, 2008
- 5. Gonet A., Śliwa T., Złotkowski A., Sapińska-Śliwa A., Macuda J., The analysis of expansion thermal response test (TRT) for borehole heat exchangers (BHE), Geothermal reservoir engineering, thirty-seventh workshop 2012, Stanford, California, proceedings, Stanford University, Stanford Geothermal Program, workshop report, 2012
- 6. Śliwa T., Sapińska-Śliwa A., Knez D., Bieda A., Kowalski T., Złotkowski A., Borehole heat exchangers: production and storage of heat in the rock mass, Laboratory of Geoenergetics Book Series vol.2, Kraków 2016
- Złotkowski A., Śliwa T., Gonet A., Otworowe wymienniki ciepła w instalacji grzewczoklimatyzacyjnej Ekologicznego Parku Edukacji i Rozrywki OSSA, Borehole heat exchangers field for heating-airconditioning installation in Spa Hotel OSSA, Wiertnictwo, Nafta, Gaz (Drilling, Oil, Gas), ISSN 0860-1860, t. 28 z. 1–2, pp. 475–482, 2011