METODY POMIAROWE BADANIA WARUNKÓW PRACY PIONOWYCH SOND GRUNTOWYCH – TESTY TRT I DTRT

mgr inż. Michał WAJMAN
Wydz. Mechaniczny
Politechnika Gdańska
www.sondygruntowe.pl

I
THERMAL RESPONSE TEST (TRT)

Thermal Response Test (zwany w niektórych źródłach literaturowych również **Geothermal Response Test - GRT**) jest metodą pomiarową służącą do oceny faktycznych właściwości cieplnych gruntu występującego w badanym miejscu, a stąd i metodą do oszacowania rzeczywistych parametrów przyszłej instalacji pionowych sond gruntowych. W Polsce Thermal Response Test znany jest pod nazwą **Testu Odpowiedzi Termicznej**, ponieważ można w przybliżeniu powiedzieć, że przedmiotem badania jest uzyskanie informacji w jaki sposób grunt odpowie na próby dostarczania do niego ciepła.

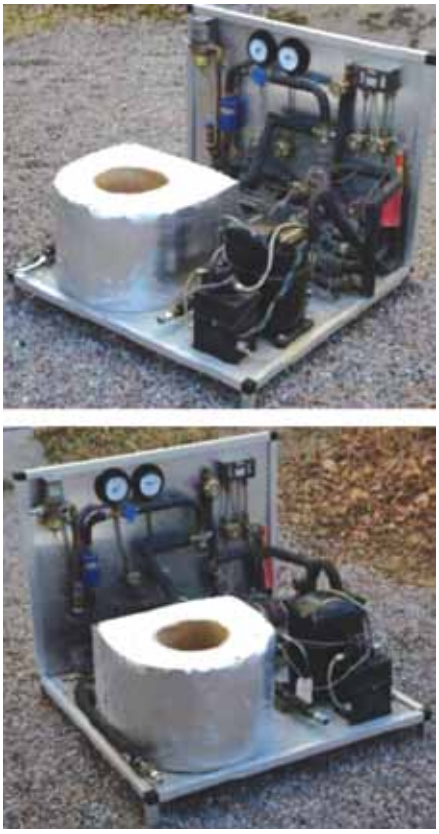
Zapewne już po przeczytaniu pierwszego akapitu czytelnik zastanawia się, po co w ogóle używać narzędzia takiego jak TRT. W końcu dostępne są liczne teorie, metody obliczeń, czy tabele, z których można uzyskać informacje o możliwej wydajności cieplnej 1 m odwiertu w zależności od rodzaju gruntu, czy też duże programy obliczeniowe, dostarczające wszystkie parametry konieczne dla projektanta systemu sond gruntowych. Wymienione materiały są faktycznie pomocnymi, należy jednak pamiętać, że przy ich wykorzystaniu konieczne są liczne uproszczenia, które w dużej mierze mają wpływ na otrzymywane wyniki. Jednym z najczęściej stosowanych założeń jest przyjęcie tego samego rodzaju gruntu dla całej głębokości instalacji, a co za tym idzie – tej samej wartości współczynnika przewodności cieplnej. W rzeczywistości, w miejscu wykonywanego odwiertu nie tylko struktura gruntu nigdy nie jest jednolita, sam jeden jego rodzaj może wykazywać znaczne różnice w zakresie przewodności cieplnej w zależności od obecnych w gruncie minerałów, jego porowatości, zawartości wody czy też anizotropii [5]. Natomiast drugim uproszczeniem jest pomijanie, bądź nieodpowiednie wartościowanie wpływu działalności wody gruntowej, której obecność jest w stanie w sposób znaczny zmienić prognozowane wyniki.

W przypadku projektowania większych systemów opartych na pionowych sondach gruntowych, konieczne jest dokładne oszacowanie wszystkich ważnych parametrów, co pozwala na precyzyjne wyznaczenie całkowitej długości sond, a tym samem znaczne oszczędności na etapie inwestycji. To właśnie jest główny powód, dlaczego Test Odpowiedzi Termicznej jest niezwykle popularną i szeroko stosowaną na całym świecie metodą pomiarową badania warunków pracy pionowych sond pionowych. Szacuje się, że przy instalacji ziemnej składającej się z 10 lub większej ilości pionowych kolektorów gruntowych, wykonanie testu TRT jest opłacalne i pozwala na znaczne zmniejszenie marginesu błędu przy wyznaczaniu wielkości całego systemu [9].

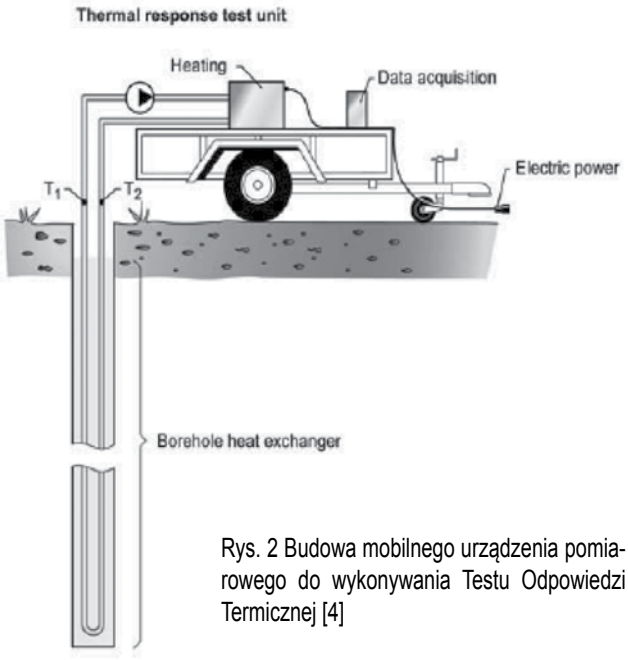
Krótka historia pierwszych testów TRT

Pierwsze urządzenie do badania odpowiedzi termicznej gruntu (rys. 1), które chłodziło płyn pośredniczący i przetwarzało informacje o jego temperaturze oraz zastosowanej mocy zostało wykonane przez dwóch studentów z politechniki w Sztokholmie (KTH Royal Institute of Technology) w 1983 roku. Osobą, która ów aparat opisała jest P. Mogensen, który jako pierwszy wskazał, że test może być również podstawą do obliczenia **oporu cieplnego sondy** R_{bh}[7].

Musiało jednak minąć ponad 10 lat, aby mobilne urządzenia pomiarowe do wykonywania testów zostały wprowadzone do użytku. Początkowo pojawiły się one praktycznie równocześnie w roku 1995 w Szwecji i USA, skąd bardzo szybko rozprzestrzeniły się na pozostałe kraje Ameryki Północnej i Europy. Amerykańska



Rys. 1 Pierwsze urządzenie do prowadzenia testu TRT [7]



Rys. 2 Budowa mobilnego urządzenia pomiarowego do wykonywania Testu Odpowiedzi Termicznej [4]

Rys. 3 Testowa platforma wiertnicza typu TED – widok ogólny [9]

wersja aparatury została opracowana na Oklahoma State University i opisana przez W.A. Austina, natomiast szwedzka wersja na Luleå Technical University, gdzie raport o powstaniu konstrukcji mobilnej opublikowali Eklöf i Gehlin. Oba urządzenia zostały zbudowane w oparciu o koncepcję P. Mogensena, przy czym idea chłodzenia płynu pośredniczącego zastąpiona została jego podgrzewaniem za pomocą grzałki elektrycznej. Sytuacja ta spowodowana była koniecznością możliwie najpoprawniejszego początkowego skalibrowania systemu oraz jak największego ograniczenia wpływu czynników zewnętrznych na otrzymywane wyniki pomiarów. Ustalono, że dużo łatwiej można sprostać powyższym wymaganiom w przypadku podgrzewania gruntu (za pomocą grzałki elektrycznej), niż w przypadku jego chłodzenia (przez użycie pompy ciepła). Dodatkowo, konstrukcja urządzenia mobilnego w przypadku użycia grzałki elektrycznej jest dużo prostsza, teoretycznie zaś wyniki otrzymywane dla wersji z grzałką i dla wersji z pompą ciepła powinny być takie same. Pamiętać jednak należy, że udowodniono zjawisko zmniejszenia współczynnika przewodności cieplnej skał przy wzroście temperatury. Przy małych jej zmianach (standardowo dla systemu grzewczego opartego na gruntowej pompie ciepła $\Delta T \approx 10\ K$) opisywany efekt nie powoduje powstania różnic w parametrach pracy sondy pilotażowej w porównaniu do systemu wymienników pionowych później wykonanego. W przypadku nienasyconych wodą, grubych warstw skał w strukturze gruntu, który ma zostać przewiercony, wykonanie Testu Odpowiedzi Termicznej za pomocą urządzenia wyposażonego w pompę ciepła wydaje się jak najbardziej uzasadnione [9].

1.1 Szwedzkie mobilne urządzenie do wykonywania Testów Odpowiedzi Termicznej typu TED

Szwedzkie urządzenie do wykonywania testu TRT z roku 1995 zostało nazwane, jako **TED**. Jego konstrukcja przedstawiona na rysunku 2, składa się z obudowanej (zadaszonej) przyczepy, elektrycznej grzałki oporowej o regulowanej mocy w zakresie od 3 do 12 kW, przyrządów pomiarowych i do rejestracji danych, 1,75 kW pompy cyrkulacyjnej oraz 85 litrowego zbiornika. Zbiornik początkowo używany jest jako pojemnik na płyn pośredniczący, wykorzystywany do zalania rur łączących. Po ich wypełnieniu pełni on funkcję oczyszczacza oraz naczynia wzbiorczego. Temperatura medium mierzona jest za pomocą termopar, umieszczonych na wlocie i wylocie z odwiertu. Oprzyrządowanie do rejestracji danych w pewnych, ustalonych wcześniej odstępach czasu, zbiera informacje o temperaturze płynu, temperaturze powietrza zewnętrznego, temperaturze powietrza wewnątrz przyczepy i zastosowanej mocy cieplnej [4].

W celu przeprowadzenia testu, platforma TED (rys. 3) ustawiana jest w jak najbliższej odległości od odwiertu testowego, następnie zaś podłączana do umiejscowionych w otworze i wypełnionych płynem pośredniczącym rur sondy pilotażowej. Rury łączące urządzenie pomiarowe i sondę są zalewane płynem z wcześniej wspomnianego zbiornika o pojemności 85l. Części aparatu pomiarowego oraz sondy, które mogą być narażone na działanie czynników zewnętrznych (niskiej temperatury, opadów atmosferycznych itp.), a tym samym na niedokładności pomiarowe, są szczelnie zaizolowywane. Podczas wykonywania pomiarów, w zbiorniku oczyszczającym gromadzą się pęcherzyki powietrza. Sam płyn pośredniczący podczas swojej cyrkulacji nie przepływa przez zbiornik, żadna też ilość dodatkowego płynu nie jest do systemu dodawana po rozpoczęciu testu. Niewielka natomiast jego ilość wpływa samoczynnie do zbiornika z wymiennika pionowego, co spowodowane jest rozszerzalnością cieplną stosowanego medium pod wpływem jego ogrzewania.

Szwedzkie urządzenie jest w stanie zmierzyć właściwości cieplne gruntu na głębokości od ok. 10 do 100 m [9]. Podczas jego dotychczasowego wykorzystania zaobserwowano silny wpływ naturalnej konwekcji wody gruntowej w otworze oraz jej lokalnego, adwekcyjnego przepływu na

działanie pionowej sondy gruntowej.

1.2 Amerykańskie mobilne urządzenie do wykonywania Testów Odpowiedzi Termicznej

Pierwsza amerykańska wersja urządzenia do wykonywania testów zbudowana w 1995 roku i wykorzystywana po dzień dzisiejszy pomimo wielu dalszych modyfikacji, została wykonana bardzo podobnie do swojego szwedzkiego odpowiednika. Zadaszona przyczepa kryła w swoim wnętrzu grzałkę, 45 galonowy zbiornik (o podobnej funkcji jak w przypadku wersji szwedzkiej), pompę cyrkulacyjną, zawory, regulator mocy typu SCR, dwa 7 kW generatory mocy (wynoszone z wnętrza przyczepy podczas prowadzenia testu), przyrządy pomiarowe i urządzenia do zbierania danych oraz niezbędne orurowanie wykonane ze stali nierdzewnej (rys. 4). Płynem pośredniczącym używanym do prowadzenia testów była w tym przypadku woda [2].

Amerykańska koncepcja urządzenia zakładała, że musi być ono w stanie operować w każdym miejscu, tzn. być kompletnie autonomiczne pod względem wykorzystywanego płynu i zużywanej energii elektrycznej. Było to uzasadnione tym, że lokalizacje, w których prowadzono testy często okazywały się miejscami nierozwiniętymi, gdzie niemożliwym było zaopatrzenie się w niezbędne „surowce".

W mobilnym urządzeniu OSU (Oklahoma State University) szczególną uwagę zwrócono na zapewnienie odpowiednich warunków pomiaru. Część rur łączących odwiert z urządzeniem oraz ściany obudowanej przyczepy zaizolowano cieplnie w sposób bardzo dokładny, zaś na dachu urządzenia zainstalowano klimatyzator Coleman Air Conditioner o wydajności chłodniczej 13 500 Btu/h. Zabezpieczenie przed wahaniem temperatury wewnątrz przyczepy jest jak najbardziej zasadne, ponieważ układ kompensacji zimnych końców termopar użytych do prowadzenia pomiarów jest bardzo wrażliwy, stąd stała temperatura powietrza wewnątrz urządzenia w sposób istotny wpływa na ograniczenie możliwych błędów pomiaru.

Jak już wspomniano wcześniej, „przyczepa pomiarowa" wykonana na OSU zapoczątkowała serię urządzeń, które były następnie w Stanach rozwijane na wiele różnych sposobów. Znane są np. komercyjne wersje platform pomiarowych wielkości skrzyń lotniczych, przystosowanych do tego typu transportu, czy też urządzenia średniej wielkości walizki.

1.3 Modele analityczne oszacowywania danych uzyskanych z testu TRT

Istnieją dwa modele analityczne służące do oszacowania danych otrzymanych z testu TRT - **źródłowy model liniowy** lub **model cylindryczny**. Oba wykorzystują analityczne rozwiązanie problemu wymiany ciepła pomiędzy pionową sondą gruntową, a otaczającym ją nieskończonym obszarem gruntu. Oba wymagają przyjęcia koniecznych założeń upraszczających, między innymi [4]:

- uproszczenia odnośnie geometrii odwiertu oraz rur sondy;
- strumień ciepła zmierzający do sondy pochodzi z nieskończenie dużego (niewyczerpalnego) źródła ciepła;
- strumień ciepła pochodzący od sondy jest przyjmowany przez nieskończenie duże (niewyczerpalne) źródło ciepła;
- wpływ strumienia ciepła wzdłuż osi sondy pionowej jest pominięty;
- w gruncie otaczającym sondę procesy cieplne zależą wyłącznie od odległości od osi odwiertu;
- jedno- lub dwuwymiarowy proces wymiany ciepła pomiędzy cyrkulującym płynem a ścianą odwiertu jest określony za pomocą **oporu cieplnego sondy** R_{bh}, charakteryzującego występujące spadki temperatury.

Rys. 4 Pierwsza amerykańskie urządzenie mobilne do przeprowadzania testów TRT – widok ogólny [9]

Modele analityczne charakteryzują się stosunkowo małym błędem oszacowania przewodności cieplnej gruntu w miejscu planowanej inwestycji. Jest oczywiste, że im dłuższy czas trwania Testu Odpowiedzi Termicznej, tym uzyskane wyniki są bardziej wiarygodne i charakteryzują się większą dokładnością, jednak koszt przeprowadzania pomiarów jest odpowiednio wyższy. Zalecanym czasem testu w wielu publikacjach jest okres 48 godzin, przy czym na pewno zbieranie danych nie powinno trwać krócej niż 30 godzin [9]. Dla czasu testu TRT trwającego powyżej 50 godzin, błąd wyznaczonej przewodności cieplnej za pomocą modeli analitycznych określa się na poziomie około ±5%.

- **Liniowy model źródłowy**

Liniowy model źródłowy jest najprostszym możliwym sposobem uzyskania konkretnych wyników z Testu Odpowiedzi Termicznej. W modelu tym, do obliczenia ilości ciepła jaka jest możliwa do „wyciągnięcia" z pionowej sondy gruntowej, wykorzystuje się równanie określające pole temperatury jako funkcję czasu i odległości (1):

$$T(r,t) = \frac{q}{4\pi \cdot \lambda_{gruntu}} \int_{\frac{r^2}{4at}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q}{4\pi \cdot \lambda_{gruntu}} E_1\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \quad (1)$$

gdzie:

q – ilość ciepła aplikowana do gruntu wyrażona w [W], λ_{gruntu} – przewodność cieplna gruntu wyrażona w [W/mK], r – promień odległości wokół modelu liniowego [m], α – dyfuzyjność cieplna gruntu [m²/s], t – czas trwania testu wyrażony w [s], E_1 – tzw. całka wykładnicza.

Powyższą całkę wykładniczą dla wartości parametru

$$\frac{\alpha t^2}{2} \geq 5$$

można zaproksymować za pomocą równania (2):

$$E_1\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) = \ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) - \gamma \qquad (2)$$

gdzie:
γ – stała Eulera γ=0,5772…

Temperatura płynu pośredniczącego jest określana przez przyjęcie założenia, że promień odległości wokół liniowego modelu źródłowego r jest równy promieniowi wykonanego odwiertu r_{bh} oraz, że strata ciepła pomiędzy cyrkulującym płynem a ścianą odwiertu spowodowana jest występowaniem oporu cieplnego zdefiniowanego jako opór cieplny sondy R_{bh}. Pamiętając, że temperatura płynu jest funkcją zależną od czasu, oblicza się ją na podstawie równania (3):

$$T_f(t) = \frac{q}{4\pi \cdot \lambda_{gruntu}}\left(\ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) - \gamma\right) + q \cdot R_{bh} + T_{gruntu} \qquad (3)$$

gdzie:
T_f – temperatura cyrkulującego płynu pośredniczącego wyrażona w [K], R_{bh} – opór cieplny pionowej sondy gruntowej wyrażony w [K m/W], T_{gruntu} – niezakłócona temperatura gruntu wyrażona w [K].

- **Cylindryczny model źródłowy**

Model cylindryczny jest właściwym, tzn. pełnym rozwinięciem modelu analitycznego. Traktuje się w nim pionową sondę gruntową jako nieskończony cylinder o stałym strumieniu ciepła. Rury sondy określane są zazwyczaj nie z osobna, lecz za pomocą równej im jednej średnicy [4]. Dla stałego strumienia ciepła model przyjmuje następującą postać:

$$T(r,t) = \frac{q}{\lambda_{gruntu}} \cdot G(z,p) \quad \begin{cases} z = \dfrac{\alpha t}{r^2} \\ p = \dfrac{r}{r_{gruntu}} \end{cases} \qquad (4)$$

gdzie:
r_{gruntu} – odległość osi pionowej odwiertu do punktu, w którym grunt charakteryzuje się niezmienioną wartością temperatury, wyrażona w [m].

Funkcja modelu $G(z,p)$ jest zgodna z definicją L.R. Ingersoll'a z roku 1954, tzn.:

$$G(z,p) = \frac{1}{\pi^2}\int_0^\infty f(\beta)d\beta \qquad (5)$$

Zależność $f(\beta)$ zdefiniowana jest jako:

$$f(\beta) = (e^{-\beta^2 z} - 1)\frac{[J_0(p\beta)Y_1(\beta) - Y_0(p\beta)J_1(\beta)]}{\beta^2[J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta)]} \qquad (5)$$

gdzie:
J_0, J_1, Y_0, Y_1 – funkcje Bessel'a pierwszego i drugiego rodzaju.

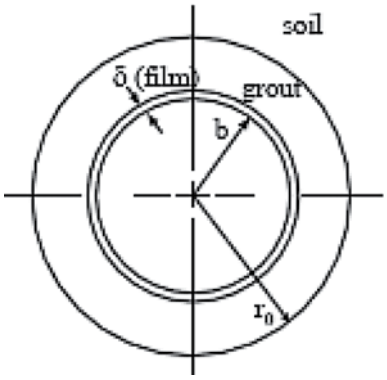
Efektywna przewodność i dyfuzyjność cieplna gruntu obliczane są przez odwrócenie procesu obliczeniowego zastosowanego do wyznaczenia niezbędnej głębokości pionowej sondy gruntowej. Na podstawie krótkookresowego testu TRT efektywna wartość oporu cieplnego gruntu jest porównywana do wartości wyznaczonej z liczby Fouriera z i cylindrycznego modelu źródłowego $G(z,p)$ przy założonych wartościach przewodności i dyfuzyjności. Proces porównywania trwa tak długo, aż otrzymane wielkości oporów cieplnych gruntu będą sobie równe.

1.4 Model numeryczny oszacowywania danych uzyskanych z testu TRT

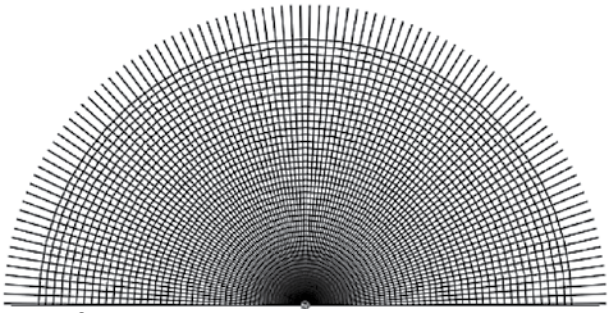
Model numeryczny jest dużo bardziej skomplikowanym i niewiele krótszym pod względem czasu trwania testu sposobem na wyznaczenie interesujących nas parametrów liczbowych, jednak pozwala na zwiększenie dokładności otrzymanych wyników przy jednoczesnym uzyskaniu kilku dodatkowych informacji. Większa dokładność jest tu zasługą możliwości przedstawienia w modelu numerycznym osobno gruntu otaczającego sondę oraz każdej części składowej pionowej sondy gruntowej (rur, wypełnienia).
W przeciągu ostatniego dwudziestolecia zostało zaproponowanych wiele różnych modeli numerycznych do wyznaczenia danych z testu TRT, spośród których wiele następnie ulepszono bądź opracowano ponownie. Wśród tych pierwszych można wyróżnić między innymi:

- jednowymiarowy model pionowej sondy gruntowej zdefiniowany za pomocą metody elementów skończonych (MES);
- dwuwymiarowy model pionowej sondy gruntowej zdefiniowany za pomocą metody objętości skończonych.

Model jednowymiarowy był oryginalnie pomysłem J.A. Shonder'a i J.V. Beck'a z roku 1999. Używa się go w połączeniu z metodą oszacowywania parametrów zaproponowaną przez tych



Rys. 5 Geometria modelu Shonder'a i Beck'a [10]



Rys. 6 Całkowita siatka obliczeniowa modelu Yavuzturk'a i Austin'a zdefiniowana metodą objętości skończonych [2]

samych autorów. Model (rys. 5) jest podobny do analitycznego modelu cylindrycznego, jeżeli chodzi o podejście względem rur wymiennika (przedstawionych tu również jako jedna bryła), natomiast różni się uwzględniając dodatkowo: zmienną w czasie moc grzewczą aplikowaną do płynu pośredniczącego przez grzałkę elektryczną, cienką warstwą o grubości δ pomagającą zdefiniować opór cieplny (na rys. 5 oznaczoną jako „film") i próbą symulacji materiału wypełniającego. Materiał wypełniający scharakteryzowany został tu za pomocą warstwy („grout"), która może odznaczać się inną przewodnością i pojemnością cieplną niż otaczający grunt.

Model dwuwymiarowy został jako pierwszy opracowany przez C. Yavuzturk'a i W.A. Austin'a około roku 1996. Autorzy modyfikując wcześniejszy program S.V. Pantakar'a z 1991 roku, zaproponowali model symulujący pojedynczą pionową sondę gruntową. Ich rozwiązanie charakteryzowało się między innymi szczegółową specyfikacją geometrii sondy i uwzględnieniem zmiennej w czasie mocy grzewczej aplikowanej do płynu przez przyporządkowanie do każdej z rur procentowej ilości mocy, jaka była do nich wprowadzana w zadanych odstępach czasu. Aktualna liczba objętości w modelu zależy od zdefiniowanej długości sondy i średnicy rur w niej zastosowanych. Typowo, siatka modelu numerycznego ma około *50(Θ)x100(r)* skończonych objętości kontrolnych i jest zakodowana tak, aby przestrzenie wewnątrz siatki stopniowo zwiększały wielkość objętości w kierunku *r*, gdy *r* wzrasta. Rysunek 6 przedstawia całkowitą wielkość siatki obliczeniowej programu, gdzie pionowa sonda gruntowa zaznaczona została kolorem czerwonym.

1.5 Przykładowe wyniki testu i koszty jego wykonania

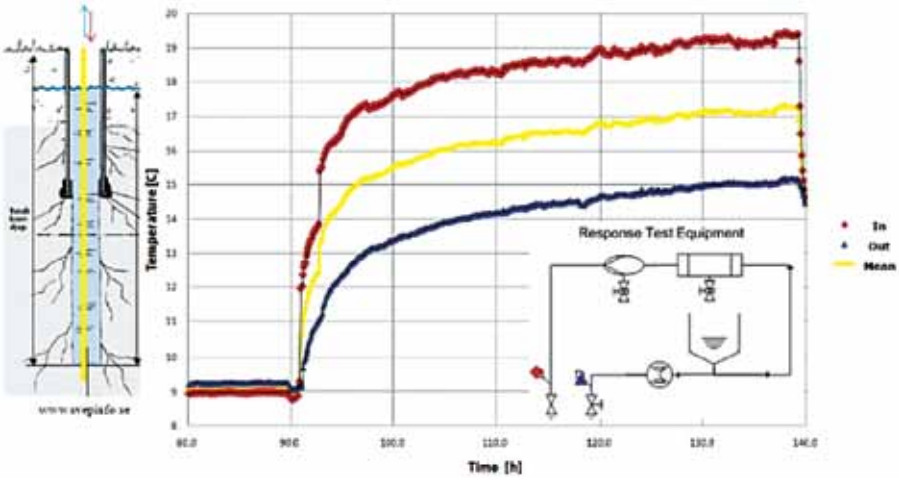
Przykładowy wynik testu został przedstawiony na rysunku 7, gdzie można wyróżnić dwa właściwe etapy jego przeprowadzenia. Po lewej stronie można zaobserwować etap tzw. wstępnej cyrkulacji, w którym do gruntu nie jest jeszcze aplikowana moc cieplna i płyn ogrzewa się od niego w sposób naturalny, bez obciążenia. Pozwala to na wyznaczenie średniej, niezakłóconej temperatury gruntu T_{gruntu} na danym obszarze. Po etapie wstępnym, naturalnie ma miejsce etap właściwy, w którym grzałka elektryczna ogrzewa płyn pośredniczący, następnie chłodzony przez grunt, co pozwala na wyznaczenie średniej temperatury płynu pośredniczącego T_f (oznaczonej na rys. 3 za pomocą koloru żółtego). Przez odnotowanie odpowiedzi termicznej gruntu na stosowane *q* w czasie *t*, gdzie odpowiedź ta wyrażona jest w zmianie temperatury T_f , jesteśmy w stanie za pomocą np. zależności (3) wyznaczyć przewodność cieplną λ_{gruntu} oraz całkowity opór cieplny sondy R_{bh}.

Jak już wcześniej wspomniano, koszt wykonania testu jest zależnością bezpośrednio związaną z czasem jego trwania. Przykładowo w USA (dane z roku 2001), za pierwsze 12 godzin trwania testu zapłacimy średnio 4500 USD, przy czym biorąc pod uwagę wcześniejszą informację odnośnie zalecanej długości jego trwania na poziomie 50 godzin, koszt ten wzrośnie do wysokości około 6800 USD. Z powyższych kwot 2000 USD, to orientacyjny koszt wywiercenia otworu, umiejscowienia w nim wymiennika pionowego i wypełnienie otworu materiałem wypełniającym. Wysokość stawki oferowanej przez firmy wykonujące pomiary testowe, różnić się będzie w zależności od kraju, w przytoczonym przykładzie wynosi ona około 48 USD/godz [3].

W tabeli 1 przedstawiono szacunkowe koszty wykonania Testu Odpowiedzi Termicznej w wybranych krajach Europy.

1.6 Wady i ograniczenia Testu Odpowiedzi Termicznej

Test TRT pomimo wielu swoich niezaprzeczalnych zalet, charakteryzuje się niestety również kilkoma wadami. Pierwsza z nich wynika z jego ograniczenia w możliwości dokonania pomiarów, jeżeli w wykonywanym otworze stwierdzone zostały zbyt duże przepływy wody gruntowej. Jak wiadomo, wyniki testu są sumą wszystkich oddziaływujących na płyn pośredniczący zjawisk, z któ-



Rys. 7 Przykładowe wyniki otrzymane z testu TRT przedstawione na wykresie zależności temperatury od czasu [1]

Tabela 1 Szacunkowe koszty wykonania Testu Odpowiedzi Termicznej w wybranych krajach Europy [3, 8]

Kraj	Koszt	Uwagi
Holandia	3000 EURO	Cena obejmuje wykonanie testu, analizę wyników i przygotowanie raportu (dane z 2001 r.)
Niemcy	2500 EURO	Cena obejmuje wykonanie testu, analizę wyników i przygotowanie raportu (dane z 2001 r.)
Norwegia	ok. 3800 EURO	Usługa oferowana jest wyłącznie na zasadzie kompleksowej (wykonanie 160 m odwiertu, umiejscowienie wymiennika, test, analiza wyników i wstępne oszacowanie koniecznej wielkości systemu). Cena rzeczywista za usługę kompleksową 10700 EURO (dane z 2001 r.)
Polska	ok. 20-40 tys. PLN	Dane z 2010 r.
Szwecja	2500 EURO	Cena obejmuje wykonanie testu, analizę wyników i przygotowanie raportu (dane z 2001 r.)

rych najważniejszymi są: wymiana ciepła pomiędzy płynem a otaczającym gruntem, zjawisko konwekcji wody gruntowej oraz jej adwekcyjna działalność. Jeżeli występują silne przepływy objętościowe wody w warstwach wodonośnych w wykonanym otworze, wówczas wyniki testu zostają zakłócone i nie mogą być stosowane do projektowania systemu opartego na sieci połączonych wymienników pionowych. W opisywanym tu przypadku znaczenie ma nie sama prędkość przepływu cząsteczek wody z jednego punktu do drugiego, ale tzw. prędkość Darcy'ego będąca miarą ilości wody przepływającej przez wybraną sekcję przekroju w danym czasie. Jest to więc parametr w rzeczywistości zależny nie od samej prędkości, ale również od porowatości otaczającego sondę gruntu [9]. Występowanie zbyt dużego przepływu wody można sprawdzić np. poprzez wykonanie oszacowania krokowego.

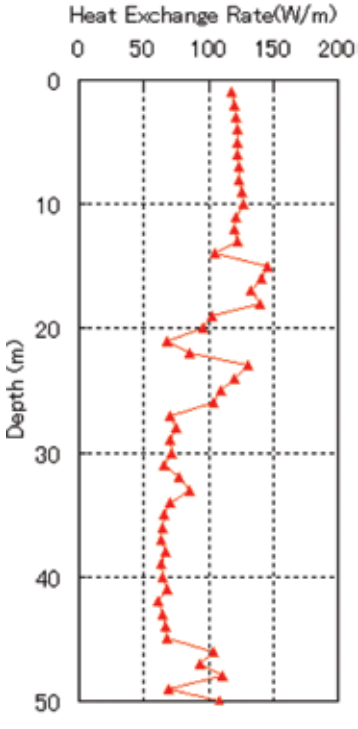
Kolejną wadą testu TRT jest fakt, że otrzymywane na jego podstawie wyniki przewodności cieplnej gruntu λ_{gruntu} oraz oporu cieplnego sondy R_{bh} są wartościami średnimi. O ile dla wykonania samego systemu dla celów grzewczych bądź chłodniczych nie ma to tak wielkiego znaczenia, to w przypadku prowadzonych badań informacje te są skromne i nie dające tak dużej ilości danych, jakie chciałoby się uzyskać. Wydaje się, że to właśnie było decydującym powodem, dla którego opracowano i wprowadzono do stosowania **Rozłożony Test Odpowiedzi Termicznej DTRT**.

2 DISTRIBUTED THERMAL RESPONSE TEST (DTRT)

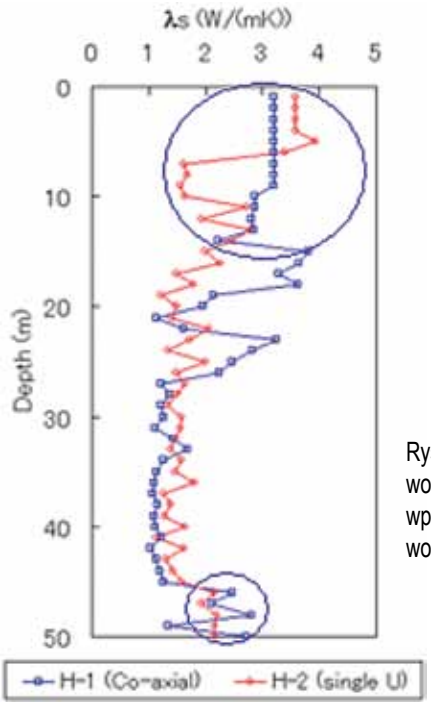
Test DTRT jest właściwie dodatkiem do Testu Odpowiedzi Termicznej, tzn. obydwa testy przeprowadza się w tym samym czasie, rzecz jasna na tym samym odwiercie. Ze względu na szczegółowe wyniki jakie można w nim uzyskać oraz skomplikowaną i drogą aparaturę, która nie została dotychczas zaproponowana w wersji mobilnej, test ten znajduje obecnie swoje zastosowanie tylko dla celów naukowych np. do badania zależności temperatur i przewodności cieplnej na różnych głębokościach gruntu, czy też do wyceny różnego rodzaju koncepcji konstrukcyjnych pionowych sond gruntowych.

2.1 Początki testu DTRT i jego koncepcja

Pierwszy test DTRT datowany jest na rok 2006, kiedy to H. Fujii, H. Okubo i R. Itoi zaproponowali posłużenie się termometrami w postaci włókien optycznych („optical fiber thermometers"). Wiedząc, że w miejscu planowej instalacji pionowych sond gruntowych (Kyushu University w Japonii) występuje znaczna różnorodność formacji, autorzy pomysłu dla dwóch różnych koncepcji konstrukcyjnych sond (typu „rura w rurze" i podwójnej U-rury) zainstalowali włókna optyczne wzdłuż ściany odwiertu (dla pierwszego typu sondy) i wewnątrz rur (dla drugiego) w celu sprawdzenia rozkładu temperatury oraz różnic współczynnika przewodności cieplnej na bieżącej długości



Rys. 8 Intensywność wymiany ciepła wyznaczona w pierwszym teście DTRT [6]

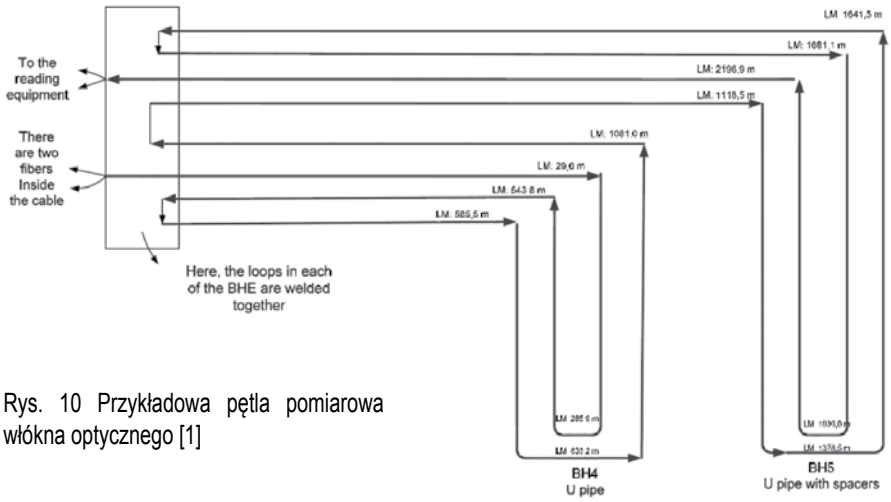


Rys. 9 Wahania przewodności cieplnej pod wpływem działalności wody gruntowej [6]

wymiennika podzielonej na 50 sekcji. Po przeprowadzeniu testów, okazało się, że zastosowanie włókien optycznych nie tylko pozwoliło na oszacowanie powyższych parametrów, a co za tym idzie, intensywności wymiany ciepła jaka ma miejsce w danej, wybranej części sondy (na rys. 8 oznaczonej jako „Heat Exchange Rate"), ale dzięki występującym znacznym wahaniom w przewodności cieplnej możliwe było bardzo precyzyjne określenie występowania adwekcyjnego przepływu wody gruntowej na danej głębokości (obszar jej działalności zaznaczony jest na rysunku 9 pętlami w kolorze niebieskim).

Gdy okazało się, że Rozłożony Test Reakcji Termicznej może okazać się narzędziem niezwykle przydatnym przy projektowaniu różnych konstrukcji wymienników pionowych i porównywaniu ich wyników, został on zaadoptowany w Szwecji, gdzie na KTH Royal Institute of Technology P. Mogensen, B. Palm i J. Acuña w ok. 2007 roku rozpoczęli próby jego przeprowadzania. Choć uzyskano już wiele zadowalających wyników i test DTRT jest tam już stosowany praktycznie jako standard, badania wciąż trwają, o czym świadczą najświeższe raporty J. Acuñy z 2011 roku.

Sama idea działania włókien optycznych i koncepcja **Distributed Temperature Sensing DTS** opiera się na fizycznym zjawisku optycznym tzn. tzw. „efekcie Ramana". Przez włókna aplikuje się pulsacyjne sygnały lasera świetlnego, które po powrocie ponownie się wykrywa (tzn. wykrywa się tylko nieliniową część światła odbitego o zmienionej częstotliwości względem światła pierwotnego). Temperatura w danym punkcie włókna zostaje oszacowywana przez analizę rozproszenia światła w widmie rozproszonym w danym okresie czasu, za pomocą wzoru (6):

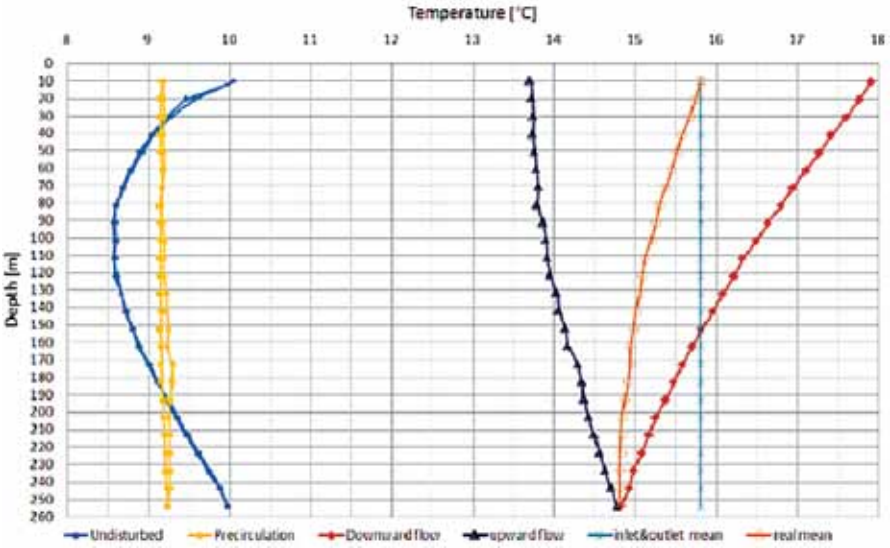


Rys. 10 Przykładowa pętla pomiarowa włókna optycznego [1]

$$T = \frac{\gamma_f}{\ln\left(\frac{C_A}{C_S}\right) - z \cdot \Delta\alpha - \ln\left(\frac{I_A}{I_S}\right)} \quad \textbf{(6)}$$

gdzie:

T – temperatura w danym punkcie włókna optycznego w [K], γ_f – stała obliczeniowa wyrażona w [K], C_A/C_S – stosunek intensywności współczynników dla pasm antystokesowskich i stokesowskich, z – odległość włókna od urządzenia pomiarowego wyrażona w [m], $\Delta\alpha$ – strata różnicowa na danej odległości wyrażona w [1/m], I_A/I_S – stosunek częstotliwości pasm rozproszonych w widmie rozproszonym.



Rys. 11 Przykładowy wynik testu DTRT [1]

Stała obliczeniowa γ_f w równaniu (6) jest wyznaczana za pomocą zależności:

$$\gamma_f = \frac{h \cdot \upsilon}{k} \quad (7)$$

gdzie:
h – stała Plancka (6,6260…10^{-34} J/s), υ – pasmo energetyczne fononu wyrażone w [s], *k* – stała Boltzmana (k=2,0836…10^{10} J/K) .

Precyzja pomiarów wykonanych metodą DTS wzrasta podobnie, jak w przypadku zwykłego testu TRT, tzn. im dłużej trwa test, tym wyniki bardziej odpowiadają rzeczywistości, przy czym można również dopatrzeć się tu wpływu wielkości badanej sekcji pomiarowej (tzn. średnicy i długości). Im wielkość sekcji jest większa, tym więcej fononów zostaje zaobserwowanych w jednostce czasu, a tym samym otrzymywane wyniki są dokładniejsze [1]. Rysunek 10 przedstawia przykładową pętlę pomiarową włókna optycznego dla dwóch pionowych sond gruntowych badanych na Royal Institute w Sztokholmie. W zaprezentowanym przykładzie można zauważyć, że włókno zostało tu umieszczone nie tylko przy ścianie odwiertu, tzn. tak, jak zostało to wykonane wcześniej w Japonii, ale również i wewnątrz rur z płynem pośredniczącym, co pozwala na dokładne określenie temperatury płynu, a tym samym na ocenę oporu cieplnego sondy R_{bh}.

2.2 Przykładowe wyniki testu i koszty jego wykonania

Przykładowy wynik Rozłożonego Testu Odpowiedzi Termicznej przedstawiony został na rysunku 11.

Na zaprezentowanym wykresie można zauważyć, że rzeczywista temperatura płynu pośredniczącego na różnych głębokościach i w różnych kierunkach różni się w sposób znaczny od średniej temperatury płynu otrzymywanej na podstawie konwencjonalnego testu TRT. Wspomniana średnia temperatura płynu przedstawiona jest kolorem jasnoniebieskim, zaś średnia rzeczywista (otrzymana w teście DTRT) kolorem pomarańczowym. Temperatura płynu pośredniczącego, gdy zmierza on w głąb ziemi oznaczona została tu kolorem czerwonym, natomiast temperatura tego medium, gdy wypływa ono z sondy – kolorem ciemnoniebieskim. W przybliżonym przykładzie można ponadto zaobserwować, że sama faza wstępnej cyrkulacji służąca w standardowym teście TRT wyznaczeniu niezakłóconej temperatury gruntu (krzywa w kolorze żółtym) nie daje tak dobrej informacji o tym, co dzieje się pod powierzchnią ziemi, jak właściwe zbadanie temperatury na poszczególnych głębokościach za pomocą włókna optycznego (krzywa w kolorze jasnoniebieskim).

Jak wcześniej wspomniano, test DTRT przeprowadza się równolegle z testem TRT, tak więc budowa urządzenia do wykonywania testu ulepszonego może być identyczna, jak w przypadku testu podstawowego, przy czym konieczne jest wyposażenie go w niezbędny sprzęt odczytujący pulsacje laserowe. Koszt wykonania Distributed Thermal Response Test teoretycznie nie powinien różnić się w sposób znaczny od kosztów zaprezentowanych w punkcie 1.6, jednak ze względu na bardzo drogą cenę sprzętu DTS do przetwarzania danych (około 50 tys. EURO) oraz skomplikowane wykonanie systemu pomiarowego, nie jest on dotychczas dostępny dla celów komercyjnych. W związku z tym obecnie test DTRT nie jest stosowany z mobilną wersją urządzenia do wykonywania testów TRT, tzn. jego wykonanie ma miejsce we wcześniej przygotowanych w tym celu placówkach.

Podsumowując, obecnie wciąż obowiązującą metodą oceny wydajności przyszłego systemu grzewczego/chłodniczego opartego na gruntowych sondach pionowych, dla celów komercyjnych pozostaje nadal mobilny Test Odpowiedzi Termicznej. Natomiast dla celów naukowych, ulepszona wersja tego testu wykorzystująca technologię DTS jest najnowocześniejszym sposobem badania efektywności konstrukcji wymienników pionowych, wpływu parametrów i temperatur gruntu oraz wody na pracę sond.

BIBLIOGRAFIA

[1] Acuña, J. (2010). *Improvements of U-pipe Borehole Heat Exchanger*. Licentiate Thesis in Energy Technology. Stockholm: KTH, Sweden;

[2] Austin, W.A. (1995). *Development of an In Situ System for Measuring Ground Thermal Properties.* Bachelor of Science. Stillwater, Oklahoma: Oklahoma State University, USA;

[3] Gehlin, S. Spitler, J. D. (2001). *Thermal Response Test for BTES Applications. State of the Art 2001.*

[4] Gehlin, S. (2002). *Thermal Response Test. Method Development and Evaluation.* Doctoral Thesis. Luleå Institute of Technology. Luleå, Sweden;

[5] Gustafsson, A. Noderll, B. (2006). *Thermal Response Test While Drilling.*

[6] Fujii, H. Okubo, H. Itoi, R. (2006). *Thermal Response Tests Using Optical Fiber Thermometers.* Graduate School of Engineering, Kyushu University, Japan;

[7] Mogensen, P. (1983). Fluid to Duct Wall Heat Transfer in Duct System Heat Storages. *The International Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice*, (ss. [Appendix, Part. II, p. 652-657]). Stockholm.

[8] Oleśkowicz P., Cz. (2010). *„Terenowy test termiczny gruntu dla pionowego gruntowego wymiennika pompy ciepła".* Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, 41/11 (2010);

[9] Sanner, B. Hellström, G. Spitler, J. Gehlin S. (2005). *Thermal Response Test - Current Status and World-Wide Application.* Proceedings World Geothermal Congress 2005.

[10] Shonder, J.A., Beck, J.V. (1999). *Determining Effective Soil Formation Properties from Field Data Using a Parameter Estimation Technique.* ASHRAE Transactions. Volume: 105, p. 458-466.

[11] Wajman, M. (2011). *„Podstawy teoretyczne wymiany ciepła w pionowych sondach gruntowych".* Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna, Nr 9/2011, str. 438-444.