

Aneta Sapińska-Śliwa*, Tomasz Śliwa*, Patryk Leśniak*

EFEKTYWNA PRZEWODNOŚĆ CIEPLNA I OPÓR TERMICZNY OTWOROWYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA O RÓŻNYCH KONSTRUKCJACH**

Streszczenie: Otworowe wymienniki ciepła to najlepszy sposób na pozyskanie energii zgromadzonej w górotworze niezależnie od litologii. Geotermalne pompy ciepła oparte na ciepłe niskotemperaturowym mogą być jedną z możliwości redukcji smogu w miastach. W zabytkowych częściach miast często nie ma odpowiednio dużego obszaru do wiercenia otworów. Jest to jeden z wielu powodów poszukiwania konstrukcji otworowych wymienników ciepła o dużej efektywności (jednostkowym transferze ciepła między nośnikiem a górotworem). Jednym ze sposobów na poprawę sprawności jest zastosowanie najbardziej wydajnej konstrukcji otworowego wymiennika ciepła. W artykule opisano badania efektywności cieplnej otworowych wymienników ciepła z wykorzystaniem testów reakcji termicznej. Badaniami objęto otworowe wymienniki ciepła należące do Laboratorium Geoenergetyki AGH oraz dwa testowe otwory o różnych konstrukcjach. Na podstawie interpretacji testów reakcji termicznej oraz wzorów empirycznych obliczono jednostkową wymianę ciepła. Opisano warunki realizacji otworowych wymienników ciepła w zabytkowych miejscowościach, przy małej powierzchni do wykonania wierceń i utrudnionym dostępie do obiektów. Warunki takie wymuszają niewielką liczbę otworowych wymienników ciepła, wobec tego ich większą głębokość, ukośny kierunek wiercenia i/lub specjalną wiertnicę do wiercenia z wnętrza obiektów.

Słowa kluczowe: otworowe wymienniki ciepła, ciepło geotermalne, opór termiczny odwiertu, geoenergetyka, geotermalne pompy ciepła

© 2019 Autorzy. Jest to publikacja ogólnodostępna, którą można wykorzystywać, rozpowszechniać i kopiować w dowolnej formie zgodnie z licencją Creative Commons CC-BY 4.0.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Laboratorium Geoenergetyki, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

** Badania zostały sfinansowane w ramach programu badań statutowych na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, nr grantu 11.11.190.555

Oznaczenia

- ΔT_i – różnica między temperaturą zasilania a temperaturą powrotu dla rekordu i , K,
 α – dyfuzyjność cieplna górotworu, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,
 γ – stała Eulera, $\gamma = 0,5772156$,
 λ – przewodność cieplna górotworu, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,
 λ_{cm} – przewodność cieplna górotworu (metoda klasyczna), $\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,
 λ_{pm} – przewodnictwo cieplne górotworu (metoda punktowa), $\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,
 λ_{cbm} – przewodnictwo cieplne górotworu (metoda stałej rezystywności odwiertu),
 $\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,
 ρ – gęstość skał, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,
 ρ_i – gęstość nośnika ciepła dla rekordu i $\rho_i = f(T)$, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,
 H – głębokość otworowego wymiennika ciepła, m,
 P – moc cieplna, W,
 P_{chi} – tymczasowa moc grzewcza dla rekordu i , W,
 $R_{b,cm}$ – opór cieplny otworu (metoda klasyczna), $\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{W}^{-1}$,
 $R_{b,pm}$ – opór cieplny otworu (metoda punktowa), $\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{W}^{-1}$,
 $R_{b,cbm}$ – opór cieplny otworu wiertniczego (metoda stałej rezystywności otworu),
 $\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{W}^{-1}$,
 T_0 – średnia temperatura naturalna profilu geologicznego otworu, K,
 T_f – temperatura zasilania, °C,
 T_r – temperatura powrotu, °C,
 $T(t_1)$ – średnia temperatura nośnika ciepła w chwili t_1 , K,
 $T(t_2)$ – średnia temperatura nośnika ciepła w chwili t_2 , K,
 T_z – temperatura zasilania (na wpływie do wymiennika), K,
 T_p – temperatura powrotu (na wypływie z wymiennika), K,
 $T_{sr(\text{reg})}$ – temperatura z funkcji regresji liniowej ($T(t_1)$ lub $T(t_2)$), K,
 c_i – ciepło właściwe nośnika ciepła dla rekordu i , $c_i = f(T)$, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,
 c_v – objętościowe ciepło właściwe, $\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$,
 k – współczynnik nachylenia (prostych) linii trendów, przedstawiający funkcję temperatury nośnika ciepła względem logarytmu naturalnego czasu TRT, –,
 k_{cm} – nachylenie linii regresji (metoda klasyczna), –,
 k_{pm} – nachylenie linii regresji (metoda punktowa), –,
 k_{cbm} – nachylenie linii regresji (metoda stałej rezystywności odwiertu), –,
 n – liczba rekordów zarejestrowanych w fazie nagrzewania TRT, –,
 q – jednostkowe straty ciepła w otworowym wymienniku ciepła, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$,
 r – promień, m,
 r_b – promień odwiertu, m,
 u – podstawienie, –,
 t – czas, s,
 t_1 – czas początkowy, s,
 t_2 – czas końcowy, s,
 x – $\ln(t_1)$ lub $\ln(t_2)$,
 \bar{x} – średnia arytmetyczna $\ln(t)$ w danym przedziale czasu, –,
 \bar{y} – średnia arytmetyczna średniej temperatury nośnika ciepła w danym przedziale czasu, K,
 \dot{V}_i – natężenie przepływu nośnika ciepła dla rekordu i , $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

1. WPROWADZENIE

Na wielu uniwersytetach trwają badania nad polami otworowych wymienników ciepła i magazynowaniem ciepła w górotworze. Pierwszy magazyn ciepła na dużą skalę został zbudowany w latach 1982–1983 przez naukowców Uniwersytetu Technicznego w Luleå w Szwecji [1].

Oprócz instalacji w Akademii Górniczo-Hutniczej studia nad wymiennikami otworowymi prowadzone są m.in. na Uniwersytecie Technicznym w Ostrawie w Czechach. Układ wymienników otworowych na tym uniwersytecie został opisany przez Bujoka i in. [2]. System na University of Ontario Institute of Technology (Ontario Tech University) w Oshawie (Kanada) jest opisany przez Koochi-Fayegh i Rosena [3]. Systemy z geotermalnymi pompami ciepła i wymiennikami ciepła istnieją między innymi w niemieckim Instytucie Technologii w Karlsruhe (Karlsruher Institut für Technologie), Politechnice Turyńskiej [4] oraz w Ball State University w Stanach Zjednoczonych [5]. Głęboki wymiennik otworowy został wywiercony na uniwersytecie w Akwizgranie (RWTH, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen) [6].

Niektóre z pierwszych, najważniejszych doświadczeń i osiągnięć naukowych w dziedzinie geotermalnych pomp ciepła uzyskano z wymiennikami ciepła w Europie w Szwecji [7–9], Szwajcarii [10, 11] i w Niemczech [12, 13], ponadto w Kanadzie [14] i w USA [15] oraz w Japonii [16]. Obecnie wiele badań dotyczących opisywanego obszaru tematycznego prowadzi się w Chinach [17].

Aktualne badania nad wymiennikami otworowymi mają wiele szczegółowych aspektów. Obejmują między innymi:

- badania materiałowe [18],
- maksymalizację głębokości dla określonej konstrukcji,
- wykorzystanie starych/ opuszczonych/ zlikwidowanych otworów wywierconych w różnych celach [19],
- optymalizację parametrów eksploatacyjnych, takich jak rodzaj nośnika ciepła, jego natężenie przepływu i prędkość, temperatura na wpływie, moc grzewcza (zoptymalizowana pod kątem COP pompy ciepła),
- konstrukcje, takie jak pojedyncza U-rurka, multi-U-rurka, układ współosiowy [20, 21], spiralę [22, 23], termopale [24], geotermalne kosze i wymienniki ukośne (*geothermal radial drilling* – GRD) [25], z uwzględnieniem średnicy i grubości rur [26],
- przebieg osi odwiertu: wymienniki można wiercić pionowo, alternatywnie, technologia geotermalnego wiercenia ukośnego (GRD) pozwala na wykonanie otworów ukośnych wierconych pod budynkami i infrastrukturą miejską [27], np. w Paęcznicy,
- materiał uszczelniający [28, 29],
- inne, np. W-rurkę i typ spiralny [30].

Największa taka instalacja znajduje się na Ball State University w Indianie (USA), gdzie w 2012 roku wykonano 3600 otworów i zainstalowano pionowe U-rurki. System ogrzewa i chłodzi 47 budynków oraz zastępuje cztery stare kotłownie węglowe. System dostarcza zimną wodę o temperaturze 6°C do chłodzenia i ciepłą wodę o temperaturze 66°C do ogrzewania, co daje roczne oszczędności w wysokości 2 mln dolarów [31]. Instalacja ta wykorzystuje otwory o głębokości od 122 m do 152 m [15, 32]. Ogólny przegląd otworowych

magazynów energii cieplnej, wraz z opisem ogólnych procedur projektowania i budowy, opisał Lee [33].

Najgłębsze otworowe wymienniki ciepła (głębsze niż 1000 m) zostały opracowane w porządku chronologicznym:

- Niemcy, Prenzlau, 2786 m [34], aktualnie działa, jednak po dłuższej przerwie i Akwi-zgran, 2500 m [6, 35],
- Szwajcaria, Weggis, 2281 m [36, 37], i Weissbad, 1213 m [38–41],
- Polska, Sucha Beskidzka, 2864,5 m, najgłębszy na świecie otworowy wymiennik ciepła w otworze do głębokości 4281 m, rurę koncentryczną zainstalowano w otworze kierunkowym, gdzie odchylenie od pionu wynosiło maksymalnie 38° [42], zainstalowany jedynie w celach badawczych w 1999 roku [43],
- China, Xi'an, konstrukcje z ośmioma głębokimi otworowymi wymiennikami ciepła o głębokościach między 2 km i 2,5 km i temperaturą około $70\text{--}90^\circ\text{C}$ [44].

W literaturze nie ma definicji głębokiego otworowego wymiennika ciepła. Aby go zdefiniować, należy wziąć pod uwagę wiele kryteriów. Najważniejsze powinno być kryterium wiercenia. Również w przemyśle naftowo-gazowym nie ma definicji głębokich otworów wiertniczych – wielu badaczy podaje różne głębokości [45].

Propozycja autorów oparta jest na konstrukcji wymiennika. Płytkie wymienniki mogą znajdować się w otworach o głębokości do 300 m, w których można zainstalować wszystkie typowe konstrukcje (głównie rury w kształcie litery U). Średniej głębokości wymienniki mają głębokość od 300 m do 800 m i ze względu na trudne warunki geologiczne (luźne i plastyczne skały) konieczne jest stosowanie w nich zaczynu wypełniającego jako stabilizatora średnicy. W przypadku głębokich wymienników (ponad 800 m) możliwa jest tylko budowa współosiowa (ze względów technicznych i ekonomicznych).

Głównym celem artykułu jest przegląd i krytyczna dyskusja czynników geologiczno-konstrukcyjnych wpływających na projekt, liczbę, głębokość i rozmieszczenie otworowych wymienników ciepła. Projekt terenowy wymienników musi uwzględniać różne opcje techniczne wymiany ciepła. Odpowiednia analiza i projekt mogą zmniejszyć liczbę otworów i umożliwić budowę odpowiednich pól wymienników, nawet jeśli powierzchnia pola jest niewystarczająca.

Badania oparto na danych z testów reakcji termicznej (TRT) z pola A wymienników Laboratorium Geoenergetyki AGH oraz dwóch innych otworów. Dane TRT zostały zinterpretowane trzema metodami: metodą tradycyjną [46], metodą punktową [28] oraz metodą stałej oporności termicznej wymiennika otworowego [47].

Po raz pierwszy idea testu reakcji termicznej została poruszona przez Mogensena w 1983 roku [48]. Już wtedy sugerował on badanie średniej temperatury otworu wiertniczego, do którego dostarczano ciepło o stałej mocy grzewczej. Natomiast pierwsze badania wymienników otworowych wykonane w Polsce i opisane w literaturze przedstawili Czekalski i Obstawski [49]. Jednakże pierwszy typowy, komercyjny test wykonano i opisano w roku 2007 [50]. Od tego czasu stale poszukuje się coraz nowszych i dokładniejszych metod wyznaczania najważniejszych parametrów tzw. dolnego źródła ciepła, jakimi są: efektywna przewodność termiczna górotworu, oporność termiczna otworu wiertniczego oraz profil temperaturowy górotworu [51]. Swoje metody proponowali m.in. Spitler i Gehlin [52], Śliwa [47] czy też Gonet i in. [28].

2. ISTOTA TESTU REAKCJI TERMICZNEJ

Metodologia TRT opiera się na postaci różniczkowego cząstkowego równania przewodnictwa cieplnego Fouriera [53], które opisuje dynamiczną zależność temperatury T od odległości od wymiennika ciepła r i czasu trwania testu t , tj. $T = T(r, t)$. Równanie to ma następującą postać:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\rho c_p}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Jedną z metod rozwiązania takiego cząstkowego równania różniczkowego jest podstawianie, które przekształca cząstkowe równanie różniczkowe (1) w zwykłe równanie różniczkowe. Podejście to zostało zastosowane przez Perinę [54] do opisu równania Theisa w hydrogeologii, które daje rozkład ciśnienia $p = p(r, t)$. Aby skorzystać z tego podejścia, podstawiono:

$$u = \frac{r^2 \rho c_p}{4t\lambda} \quad (2)$$

i

$$\rho c_p = \frac{\lambda}{\alpha} \quad (3)$$

Następnie można wskazać, że:

$$u = \frac{r^2}{4\alpha t} \quad (4)$$

a równanie (1) przyjmuje następującą postać:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

Wracając do podstawienia (4), w końcu otrzymujemy:

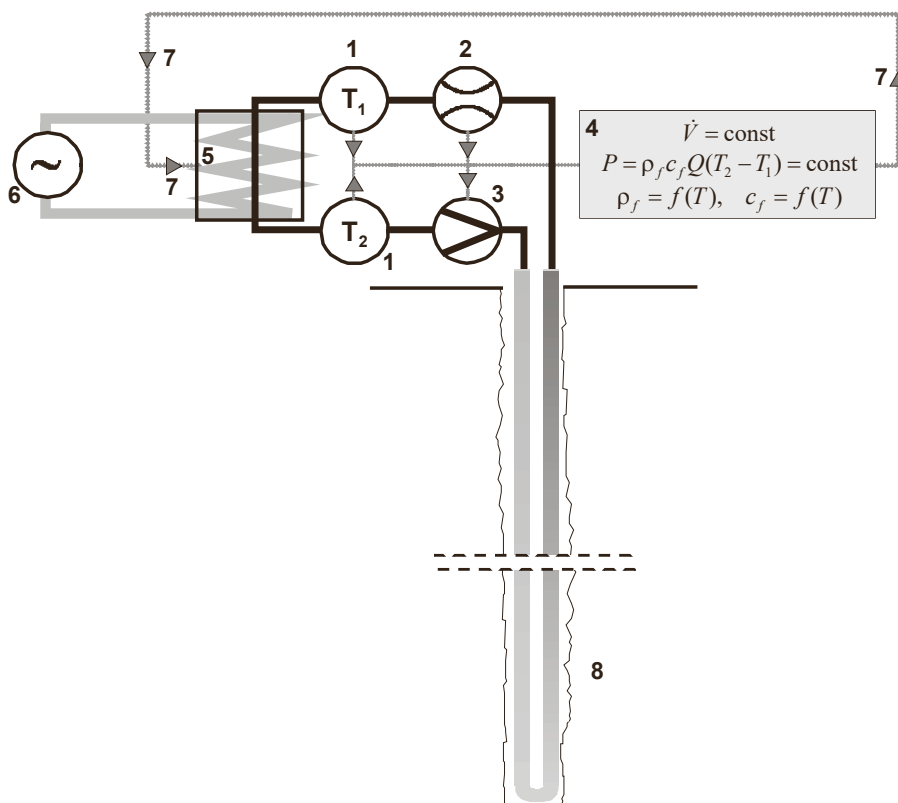
$$T(r, t) = T_0 + \frac{q}{k\pi\lambda} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx \quad (6)$$

Wobec podstawienia w równaniu (4) i podstawiając całkę w (6) wyrażeniem przybliżonym, otrzymujemy:

$$T(r, t) = T_0 + \frac{q}{4\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{4\alpha t}{r^2} \right) - \gamma \right] \quad (7)$$

W odniesieniu do warunków początkowych i brzegowych należy zauważyć, że otrzymane rozwiązanie nie jest numeryczne. Jest raczej analityczne, a idea matematycznego

modelu TRT (rys. 1) opiera się na nieskończonym liniowym źródle ciepła. Tak więc nie rozwiązujemy równania różniczkowego w skończonym obszarze. (Liniowe) źródło ma długość odpowiadającą głębokości odwiertu. Czas TRT jest ograniczony (maksymalnie 100 h). Temperatura początkowa odpowiada naturalnemu rozkładowi temperatury górotworu, ale zwykle przybliża się ją jedną temperaturą początkową (średnią) T_o .



Rys. 1. Schemat działania zestawu do testów reakcji termicznej

- 1 – termometr, 2 – przepływomierz, 3 – pompa, 4 – komputer sterujący, 5 – zestaw grzałek,
 6 – źródło prądu, 7 – sygnał sterujący grzałką, 8 – otworowy wymiennik ciepła,
 Q – natężenie przepływu nośnika ciepła, P – natężenie przepływu (moc) ciepła, T – temperatura,
 $\rho = f(T)$ – gęstość nośnika ciepła w funkcji temperatury,
 $c = f(T)$ – ciepło właściwe nośnika ciepła zależne od temperatury

3. METODY INTERPRETACJI

Istnieją trzy metody interpretacji wyników z testów reakcji termicznej. Parametry wyznaczane to efektywna przewodność cieplna λ_{ef} i opór termiczny otworu wiertniczego R_b . Znajomość tych parametrów jest niezbędna do prawidłowego zaprojektowania wymienników otworowych i działania geotermalnych pomp ciepła. Obecnie w użyciu jest metoda klasyczna.

Klasyyczna metoda wyznaczania parametrów z wyników testu reakcji termicznej

Najpopularniejszą i podstawową metodologią oceny podziemnego przewodnictwa cieplnego z TRT jest metodologia nachylenia prostej przyrostu temperatury [46, 55]. Średnia temperatura jest wykreślana z uwzględnieniem logarytmu czasu, a zatem przewodnictwo cieplne jest określane jako nachylenie krzywej. Ta formuła pochodzi z dobrze znanego wyrażenia nieskończonego liniowego źródła ciepła. Średnią temperaturę płynu określa równanie (7) [28], a straty ciepła na jednostkę głębokości q oznaczają:

$$q = \frac{P}{H} \quad (8)$$

W każdym TRT ważny jest czas testu i czas przyjęty jako początek interpretacji powyższej funkcji w układzie semilogarytmicznym. Ustalono, że zgodnie z równaniem (7) błąd obliczeniowy wynosi 2,5% dla czasu t dłuższego lub równego $20 \cdot r^2 \cdot \alpha^{-1}$ i 10% dla $t \geq 5 \cdot r^2 \cdot \alpha^{-1}$. W wielu interpretacjach TRT temperaturę określa się na wpływie i wypływie nośnika ciepła w funkcji czasu trwania testu [56]. Na podstawie pomiaru temperatury zasilania i powrotu nośnika ciepła można określić zależność między średnią temperaturą T_f a czasem trwania testu t [57]. Stworzenie wykresu współzależności między średnią temperaturą płynu T_f a logarytmem czasu trwania testu $\ln(t)$ jest sposobem oceny danych testu reakcji termicznej.

Charakter tego wykresu jest liniowy względem $\ln(t)$. Nachylenie krzywej k pozwala na ocenę efektywnej przewodności cieplnej λ_{ef} według wzoru:

$$\lambda_{ef} = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot H \cdot k} \quad (9)$$

gdzie:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n P_{chi}}{n} \quad (10)$$

$$Q_{chi} = \dot{V}_i \cdot c_i \cdot \rho_i \cdot \Delta T_i \quad (11)$$

Innym ważnym parametrem wymiennika otworowego jest jego rezystywność termiczna określona wzorem:

$$R_b = \frac{1}{q} (T_{av} - T_0) - \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \left[\ln \left(\frac{4\alpha t}{r_b^2} \right) + \frac{r_b^2}{4\alpha t} - \gamma \right] \quad (12)$$

gdzie:

$$T_{av} = \frac{T_f + T_r}{2} \quad (13)$$

Dzięki poprawnie wyznaczonym parametrom można wykonać właściwy dobór otworów do charakterystyki geotermalnej pompy ciepła.

Punktowa metoda wyznaczania parametrów z testu reakcji termicznej

Efektywny współczynnik przewodzenia ciepła skał można obliczyć także ze wzoru [28]:

$$\lambda_{ef} = \frac{q}{4\pi} \cdot \frac{\left[\ln \frac{t_2}{t_1} + \frac{r_b^2 \cdot (t_2 - t_1)}{4\alpha t_1 t_2} \right]}{T(t_2) - T(t_1)} \quad (14)$$

Czasy t_1 i t_2 odnoszą się do początku i końca zakresu, dla którego obliczany jest współczynnik λ_{ef} . Temperatury $T(t_1)$ oraz $T(t_2)$ odczytywane są z funkcji regresji liniowej dla średniej temperatury nośnika ciepła, obliczonej ze wzoru:

$$T_{sr} = \frac{(T_z + T_p)}{2} \quad (15)$$

Poniżej opisano sposób wyznaczania temperatury $T(t_1)$ i $T(t_2)$.

Dysponując danymi: $x = \ln(t)$ oraz $y = T_{sr}(\ln[t])$, dla danego zakresu czasu wyznacza się współczynnik nachylenia k oraz punkt przecięcia się linii z osią y (punkt b). Punkt przecięcia jest to punkt, w którym prosta regresji, poprowadzona przez wartości znane x i znane y , przecina oś y .

$$b = \bar{y} - k \cdot \bar{x} \quad (16)$$

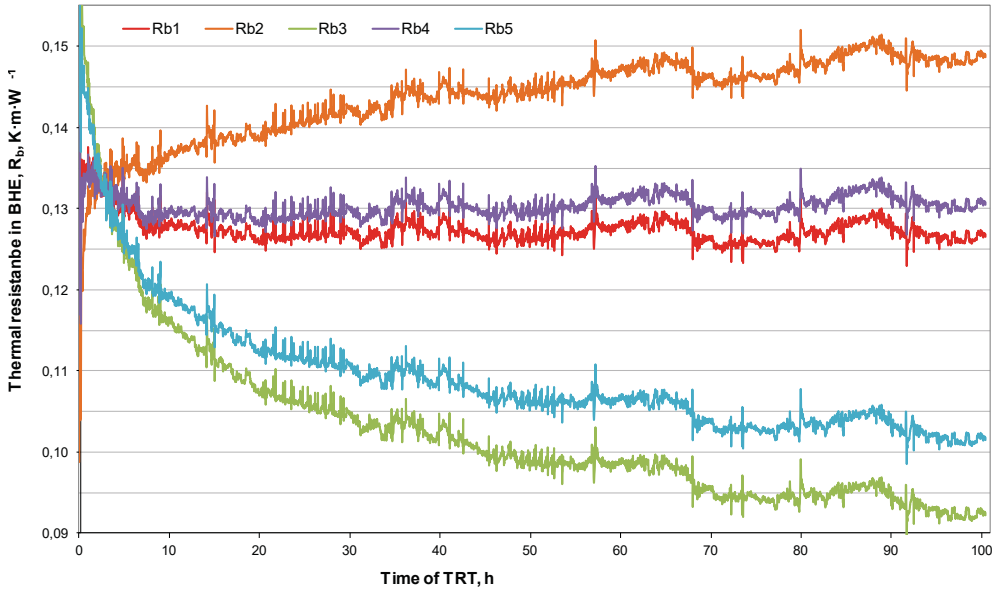
Następnie tworzy się równanie:

$$T_{sr(reg)} = k \cdot x + b \quad (17)$$

Dzięki takiemu podejściu unika się wpływu ewentualnych zaburzeń w rejestracji temperatur podczas testu reakcji termicznej na granicach badanego okresu (t_1 i t_2) w równaniu (14). Opór termiczny otworu oblicza się identycznie jak w metodzie klasycznej, tj. za pomocą wzoru (12).

Metoda stałej rezystywności odwiertu wyznaczania parametrów z testu reakcji termicznej

Niestety niemal idealny przebieg testu reakcji termicznej nie zawsze gwarantuje zbliżone wyniki wartości efektywnego przewodnictwa cieplnego λ_{ef} i rezystywności cieplnej otworu R_b , ocenionej przez Śliwę [47]. Wynika to z różnic między analizowanymi danymi. W wielu przypadkach można zaobserwować, że wartość przewodności cieplnej zmienia się wraz z czasem trwania TRT. W związku z tym proponuje się nową metodę określania parametrów z testu reakcji termicznej, w której przypadku czas trwania testu nie wpływa znacząco na dane. Na rysunku 2 przedstawiono zależność między rezystywnością cieplną R_b a czasem trwania testu reakcji termicznej. Jediną różnicą między wykresami jest inna przewodność cieplna λ [47].



Rys. 2. Opór cieplny wymiennika w funkcji czasu TRT, gdzie R_{b1} , R_{b2} , R_{b3} , R_{b4} i R_{b5} – wartości różnych przewodności cieplnych λ podanych we wzorze (12)

Proponowanym rozwiązaniem jest wyznaczenie takiej wartości λ_{ef} , że regresja liniowa oparta na relacji eksperymentalnej $R_b = f(t)$ przyjmuje postać funkcji $R_b = kt + b$, gdzie współczynnik nachylenia (prostej) linii trendu k , reprezentujący wykres temperatury nośnika ciepła w funkcji logarytmu naturalnego czasu nagrzewania TRT, jest równy (bliski) zeru. Wyznaczenie wartości λ_{ef} i R_b sprowadza się do wyszukania tegoż λ_{ef} gdzie $k = 0$. Wtedy $R_b = b$ [47]. Można go opisać na podstawie zależności (12) jako:

$$R_b(t) = kt + b \quad (18)$$

$$R_b(t) = \frac{1}{q}(T_{av} - T_0) - \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{ef}} \left[\ln \left(\frac{4\alpha t}{r_b^2} \right) + \frac{r_b^2}{4\alpha t} - \gamma \right] = b \quad (19)$$

$$b = \frac{1}{q}(T_{av} - T_0) \quad (20)$$

$$-k \frac{H}{P} \left[\ln \left(\frac{4\alpha t}{r_b^2} \right) + \frac{r_b^2}{4\alpha t} - \gamma \right] = 0 \quad (21)$$

$$k = 0 \text{ gdy } \lambda = \lambda_{ef} \quad (22)$$

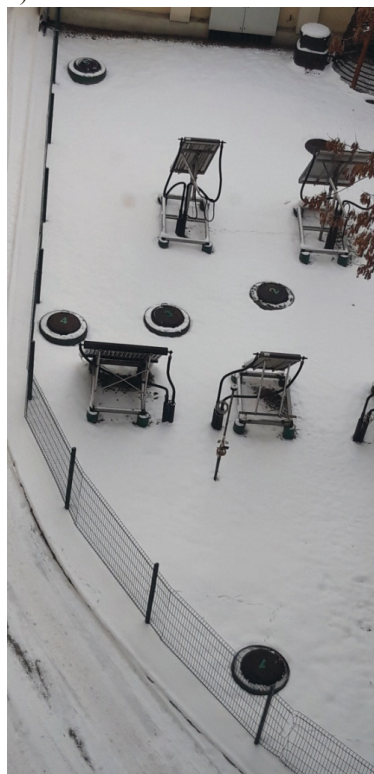
4. BAZA OTWORÓW BADAWCZYCH

W Laboratorium Geoenergetyki AGH w Krakowie na polu A znajduje się pięć otworowych wymienników ciepła (rys. 3) o różnych konstrukcjach i uszczelnieniach, które powstały w okresie od stycznia do lutego 2008 roku. Zgodnie z projektem geologicznym utwory czwartorzędowe wiercono na głębokość 19,80 m p.p.t. świdrem o średnicy 216 mm z płuczką ilastą. Rury osłonowe 7" (177,8 mm) zostały użyte do głębokości 18,80 m p.p.t., posadowiono je w szarych iłach miocenu, izolując w ten sposób czwartorzęd od powierzchni. Następnie w trzeciorzędowej formacji iłów miocenijskich wiercono świdrem o średnicy 143 mm. Profil litologiczny badanego obszaru przedstawia tabela 1. Profil rozpoczyna się od głębokości 1,8 m ze względu na głębokość studni pomiarowej (patrz rys. 3). Pierwszy wymiennik otworowy wykonano do głębokości 84 m od powierzchni, jednak ze względu na zasoby wód podziemnych, stwierdzone w utworach jurajskich korkiem ilastym, zlikwidowano sześciometrowy odcinek zawierający na dole 2 m udostępnionych wapieni jurajskich. Pozostałe cztery otwory wykonano do głębokości 78 m od powierzchni i 76,2 m od poziomu dna studni pomiarowej [58–60]. Szczegółową specyfikację techniczną wymienników otworowych przedstawiono w tabeli 2.

a)



b)



Rys. 3. Studzienki rewizyjne pięciu otworowych wymienników ciepła (a); studzienki z kolektorami słonecznymi do produkcji ciepła do magazynowania w górotworze (b) [60]

Tabela 1

Profil stratygraficzno-litologiczny w odwiertach pola A Laboratorium Geoenergetyki z wybranymi parametrami termicznymi skał [28]

Lp.	Strop, m	Spąg, m	Mięszczość, m	Litologia	Stratygrafia	Przewodnictwo cieplne, λ , $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Ciepło właściwe, c_p , $MJ \cdot m^{-3} K^{-1}$
1	1,8	2,2	0,4	grunty antropogeniczne (nasyp ciemnoszary z rumoszem)	Czwartorzęd (plejstocen, holocen)	1,600	2,000
2	2,2	2,6	0,4	namuły (gleba szara)		1,600	2,200
3	2,6	4,0	1,4	piasek drobny i pylasty nieco zagliniony		1,000	2,000
4	4,0	6,0	2,0	piasek drobny		1,200	2,500
5	6,0	15,0	9,0	pospółka i żwir		1,800	2,400
6	15,0	30,0	15,0	ił szary	Trzeciorzęd (miocen)	2,200	2,300
7	30,0	78,0	48,0	iłółupek szary		2,100	2,300
Średnia ważona						2,039	2,309

Tabela 2

Konstrukcje otworowych wymienników ciepła (od LG-1a do LG-5a) o głębokości 76,4 m


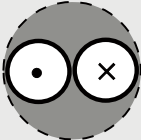
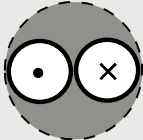
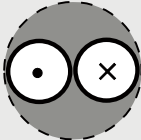
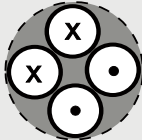
Parametr	LG-1a	LG-2a	LG-3a	LG-4a	LG-5a
Konstrukcja	Rury osłonowe PE o średnicy 90 mm i grubości ścianki 5,4 mm, rura wewnętrzna PE o średnicy 40 mm i grubości ścianki 2,4 mm	Pojedyncza rura U PE o średnicy 40 mm i grubości ścianki 2,4 mm	Pojedyncza rura U PE o średnicy 40 mm i grubości ścianki 2,4 mm	Pojedyncza rura U PE o średnicy 40 mm i grubości ścianki 2,4 mm	Podwójna U-rura PE o średnicy 32 mm i grubości ścianki 2,4 mm
Przekrój poprzeczny					

Tabela 2 cd.

Parametr	LG-1a	LG-2a	LG-3a	LG-4a	LG-5a
Rodzaj materiału zastosowanego do uszczelnienia wymiennika	Zaczyn cementowy	Zaczyn cementowy	Zaczyn cementowy (ThermoCem) o podwyższonej przewodności cieplnej	Żwir o granulacji od 8 mm do 16 mm i dwa korki ilaste (Compactonit)	Zaczyn cementowy
Przewodnictwo cieplne materiału wypełniającego, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	$\lambda = 1,2$	$\lambda = 1,2$	$\lambda = 2,0$	$\lambda = 1,8$	$\lambda = 1,2$

Otwory F1 i F2 znajdują się w Folszu. Tabela 3 przedstawia profil lito-stratygraficzny w otworach. Konstrukcja otworowego wymiennika ciepła F1 to podwójna U-rura PE o średnicy nominalnej 32 mm i grubości ścianki 2,4 mm, natomiast w otworze F2 zastosowano pojedynczą U-rurę PE o średnicy nominalnej 40 mm i grubości ścianki także 2,4 mm. Głębokość otworów to 100 m. Ponadto otwory te uszczelniono uszczelnieniem na bazie zaczynu cementowego. Przewodność cieplna materiału wypełniającego wynosi $1,2 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

Tabela 3

Profil stratygraficzno-litologiczny w otworach w Folszu [28]

Lp.	Strop, m	Spąg, m	Miąższość, m	Litologia	Stratygrafia	Przewodnictwo cieplne, λ , $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Ciepło właściwe, c_v , $MJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$
1	0	2,0	2,0	Piaszczysta glina i kamienny żwir	Czwartorzęd (plejstocen, holocen)	1,60	2,400
2	2	7,0	5,0	Żwir uwarstwiony z gliną		1,60	2,400
3	7	12,5	5,5	Łupki, iłowce		2,10	2,300
4	12,5	45,5	32,0	Piaskowiec uwarstwiony z mułowcami i iłowcami		2,30	2,000
5	45,5	100,0	54,5	Piaszczysty żwir i żwir		2,30	2,000
Średnia ważona						2,24	2,045

5. WYNIKI TESTÓW REAKCJI TERMICZNEJ

Z testu reakcji termicznej można otrzymać następujące wyniki:

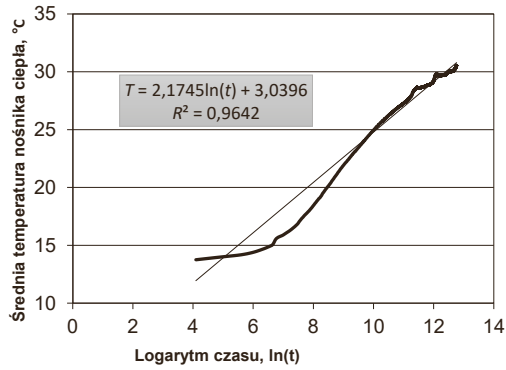
- liczba sekund od początku nagrzewania, s,
- temperatura płynu zasilającego wymiennik, °C,
- temperatura płynu powracającego z wymiennika, °C,
- temperatura zewnętrzna (temperatura atmosferyczna), °C,
- przepływ chwilowy, dm³/min,
- ciśnienie różnicowe (straty hydrauliczne przepływu nośnika ciepła, Pa,
- średnią temperaturę początkową przewierconego profilu, °C.

We wszystkich wymiennikach ciepła średnica otworu wynosiła $d = 0,143$ m. Na uwagę zasługuje również fakt, że zadaną temperaturę profilu można wyznaczyć, rejestrując temperaturę czynnika krążącego w otworowych wymiennikach ciepła przed nagrzewaniem. Wartość tej temperatury można określić także przez profilowanie temperatury. W przypadku wymienników ciepła w AGH (1, 2, 3, 4, 5) i Foluszu (6, 7) ustalona temperatura profilu T_0 została wcześniej wyznaczona przez sondę NIMO-T. W przypadku znajomości mocy cieplnej P i głębokości wymiennika H można obliczyć jednostkową moc cieplną q . Uzyskane wyniki wyznaczonych temperatur, głębokości i jednostkowej mocy cieplnej poszczególnych wymienników zestawiono w tabeli 5.

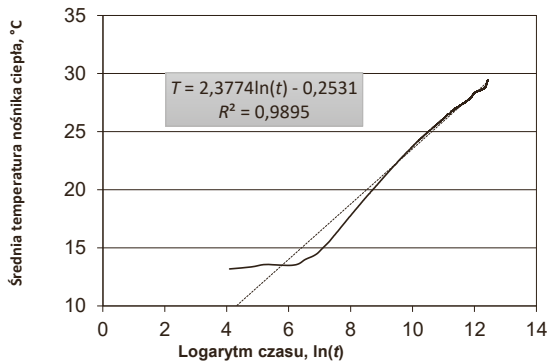
Tabela 5
Wartości zadanej temperatury profilu i głębokości wymienników

Numer otworowego wymiennika ciepła	1	2	3	4	5	6	7
$T_0, ^\circ\text{C}$	12,68	12,73	12,72	13,18	12,71	10,17	10,33
P, W	4000						
H, m	76,4					100	
$q, \text{W}\cdot\text{m}^{-1}$	52,36					40	

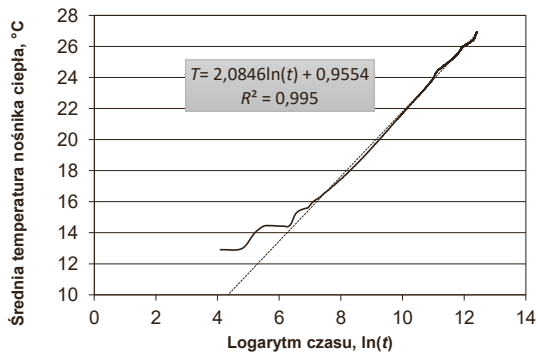
Na podstawie wyników testu reakcji termicznej przeprowadzonego w każdym otworowym wymienniku ciepła wyznaczono wykresy zależności temperatur średnich (temperatury zasilania i powrotu nośnika ciepła) i logarytm czasu nagrzewania. Ta metoda pokazuje, jak zmienia się w czasie temperatura medium wypełniającego wymiennik ciepła. Na podstawie badań Grygielczy dokonano porównania zilustrowanego na rysunkach 4–10 [61].



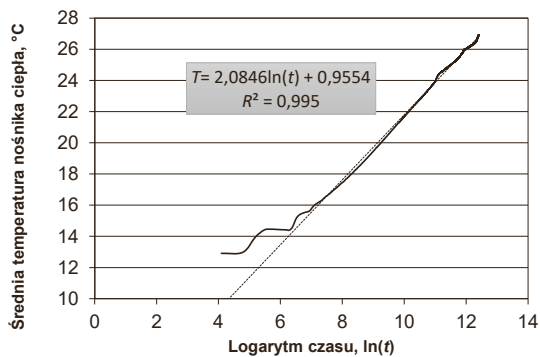
Rys. 4. Wykres zależności między średnią temperaturą nośnika ciepła a logarytmem czasu nagrzewania w wymienniku LG-1a (współosiowym)



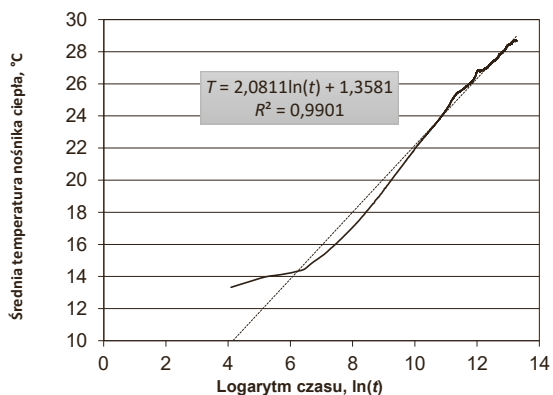
Rys. 5. Wykres zależności między średnią temperaturą czynnika grzewczego a logarytmem czasu nagrzewania w wymienniku LG-2a (pojedyncza U-rura uszczelniona zaczynem cementowym)



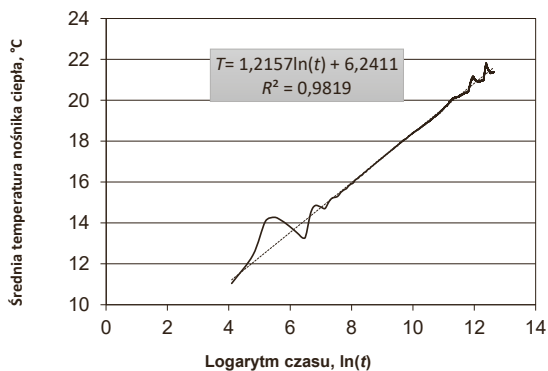
Rys. 6. Wykres zależności między średnią temperaturą czynnika grzewczego a logarytmem czasu nagrzewania w wymienniku LG-3a (pojedyncza U-rura z uszczelnieniem cementowym o podwyższonej przewodności cieplnej)



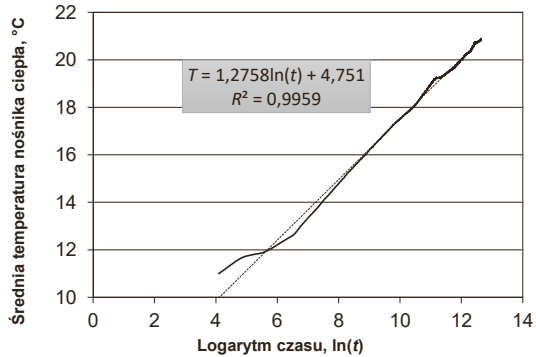
Rys. 7. Wykres zależności między średnią temperaturą czynnika grzewczego a logarytmem czasu nagrzewania w wymienniku LG-4a (pojedyncza U-rura ze żwirem)



Rys. 8. Wykres zależności między średnią temperaturą czynnika grzewczego a logarytmem czasu grzania w wymienniku LG-5a (podwójna U-rura)



Rys. 9. Wykres zależności między średnią temperaturą czynnika grzewczego a logarytmem czasu grzania w wymienniku F1 (podwójna U-rura)

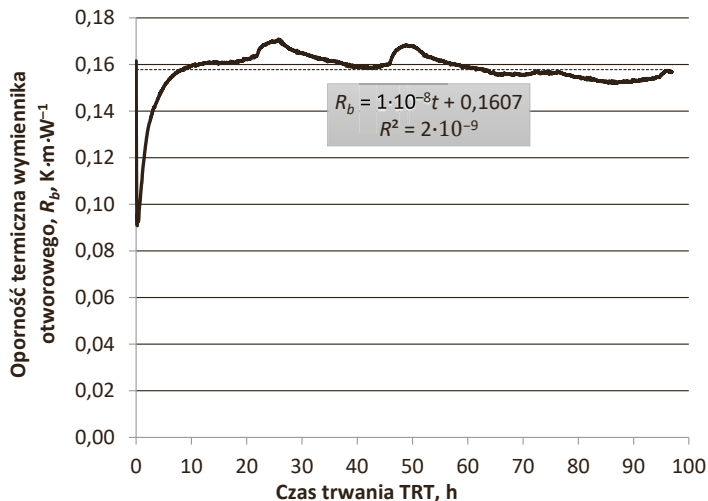


Rys. 10. Wykres zależności między średnią temperaturą czynnika grzewczego a logarytmem czasu grzania w wymienniku F2 (pojedyncza U-rura)

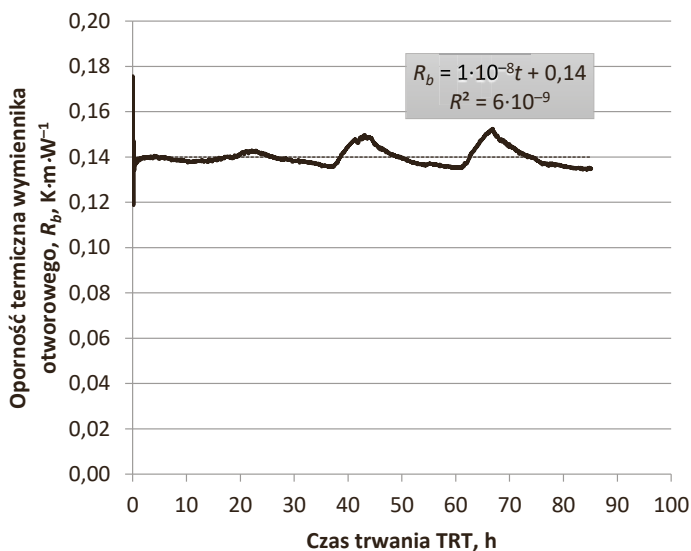
6. ANALIZA WYNIKÓW TRT

Na rysunkach 11–17 przedstawiono zależność między średnią temperaturą nośnika ciepła a logarytmem czasu TRT.

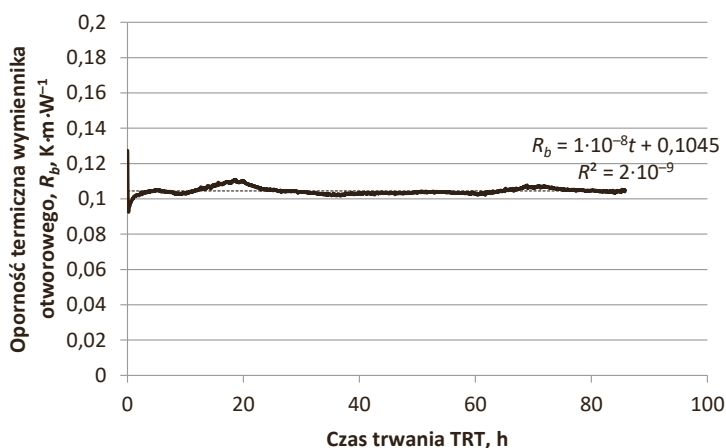
Na rysunku 11 przedstawiono przykładowy otwór Laboratorium Geoenergetyki AGH, a na rysunkach 12 i 13 wykresy dla otworów z Folusza, pokazujące zależność między oporem termicznym R_b a czasem trwania testu t . Warto zwrócić uwagę na krzywą regresji liniowej, która jest prawie pozioma względem osi X. To jest charakterystyczny wygląd krzywej dla metody analizy danych z testów reakcji termicznej (metoda stałej rezystywności odwiertu), gdzie k ma być bliskie zeru [47].



Rys. 11. Wykres zależności między oporem cieplnym wymiennika a czasem trwania TRT w otworze LG-1a (współosiowym)



Rys. 12. Wykres zależności między oporem cieplnym wymiennika a czasem trwania TRT w otworze F1 (podwójna U-rura)



Rys. 13. Wykres zależności między oporem cieplnym wymiennika a czasem trwania TRT w otworze F2 (pojedyncza U-rura)





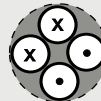
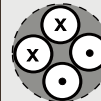
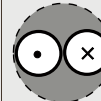
7. INTERPRETACJA WYNIKÓW

Wartości otrzymane metodą klasyczną analizy porównano z wartościami uzyskanymi metodą punktową i metodą stałej rezystywności odwiertu (tab. 6).

Odchylenie standardowe dla przewodności termicznej (λ) obliczono dla zobrazowania, jak bardzo zróżnicowane są wyniki dla przewodności termicznej obliczonej za pomocą każdej z trzech metod.

Odchylenie standardowe dla oporności termicznej (R_b) obliczono analogicznie jak w przypadku przewodności termicznej. Wynik uzyskany podczas użycia każdej z trzech metod został porównany tak, aby zobaczyć, jakie jest odchylenie wyników.

Tabela 6
Porównanie wyników

Konstrukcja	LG-1a	LG-2a	LG-3a	LG-4a	LG-5a	F1	F2
							
	współosiowa	pojedyncza U-rura z cementem	pojedyncza U-rura z cementem o podwyższonym przewodnictwie	pojedyncza U-rura ze żwirem	podwójna U-rura	podwójna U-rura	pojedyncza U-rura
k	2,055	1,833	2,085	1,488	2,062	1,216	1,276
λ_{cm}	1,917	1,753	2,003	2,802	1,980	2,701	2,600
λ_{cbm}	2,121	1,829	1,981	2,716	1,980	2,724	2,617
λ_{pm}	1,905	2,403	2,072	2,075	1,980	2,802	2,91
Odchylenie standardowe	0,121	0,355	0,047	0,397	0,000	0,053	0,174
$R_{b,cm}$	0,151	0,151	0,124	0,045	0,135	0,125	0,112
$R_{b,cbm}$	0,161	0,116	0,091	0,134	0,102	0,140	0,104
$R_{b,pm}$	0,138	0,147	0,093	0,097	0,099	0,141	0,113
Odchylenie standardowe	0,012	0,019	0,019	0,045	0,020	0,009	0,005

Wartości pogrubione w tabeli 6 oznaczają najgorsze wyniki dla każdej z poszczególnych metod, natomiast pochyłe – wyniki najbardziej korzystne.

8. WNIOSKI

1. Najlepsza wartość efektywnej przewodności cieplnej górotworu pochodzi z czwartego odwiertu metodą klasyczną i jest równa $2,802 \text{ W K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. W przypadku metody stałej rezystywności otworu najlepszym wynikiem cechuje się wymiennik F1 z wynikiem $2,724 \text{ W K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Natomiast według metody punktowej najlepszym otworowym wymiennikiem ciepła okazuje się wymiennik F2. Są to wartości uznawane za bardzo wysokie, co oznacza uzyskanie bardzo wydajnych wyników pracy (mocy grzewczej) otworów.

2. Najkorzystniejszą opornością termiczną charakteryzuje się otwór LG-4a, gdzie wyniosła ona $0,045 \text{ K}\cdot\text{m}\cdot\text{W}^{-1}$ dla klasycznej metody. W przypadku zastosowania metody punktowej oraz metody stałej rezystancji termicznej otworu wyniki wskazują, że otworowy wymiennik ciepła LG-3a ma najmniejszą oporność termiczną. Rozbieżności mogą być rezultatem niedoskonałości samej metody pomiaru (np. zaburzenia strumienia przepływu nośnika ciepła) oraz błędów podczas odczytu temperatury w trakcie trwania testu reakcji termicznej.
3. Aby porównać wpływ konstrukcji na charakterystykę współczynników efektywnej przewodności i oporności termicznej, można wykorzystać otwory z Fulusza, gdzie jedną z konstrukcji była pojedyncza U-rurka, a drugą podwójna U-rurka. W tym przypadku widać wyraźnie, że lepsze (niższe) wartości oporności termicznej osiąga pojedyncza U-rurka, za to lepszą przewodność efektywną uzyskuje się w podwójnej U-rurce. W praktyce uważa się, że lepszą, choć droższą konstrukcją, jest podwójna U-rurka.
4. Nowe metody wyznaczania współczynników charakterystycznych z testu reakcji termicznych dają różniące się wyniki w porównaniu z zastosowaniem metodyki klasycznej. Największe odchylenie standardowe dla przewodności termicznej można zaobserwować w otworze LG-4a, gdzie wyniosło ono 0,397, reszta wyników odchylenia utrzymuje się na dużo mniejszym poziomie, co może wskazywać na dobrą relację pomiędzy odczytem wyników efektywnej przewodności termicznej dla obydwu metod. Niewielkimi odchyleniami standardowymi cechuje się również oporność termiczna. Jednak na przykładzie otworu LG-4a można zaobserwować, że w poszczególnych przypadkach mogą się pojawić znaczące różnice, które najprawdopodobniej są uzależnione od czasu trwania testu reakcji termicznej.
5. Metoda stałej rezystywności termicznej zapewnia wyniki, które nie zależą w żadnej mierze od czasu trwania testu, przez co można wysunąć teorię, że może być ona metodą pewniejszą i dającą dokładniejsze wyniki współczynników otworowych wymienników ciepła z testu reakcji termicznej, a co za tym idzie – lepsze dopasowanie konstrukcji otworowych wymienników ciepła do danych współczynników.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Nordell B.: *Borehole heat store design optimization*. PhD dissertation, Division of Water Resources Engineering Luleå University of Technology, 1994, <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-26447> [8.01.2018].
- [2] Bujok P., Klempa M., Koziorek J., Rado R., Porzer M.: *Evaluation of influence of climate conditions on rock mass energy balance in the research area of VSB – TU Ostrava*. AGH Drilling, Oil, Gas, vol. 29, no. 1, 2012, s. 97–107.
- [3] Koohi-Fayegh S., Rosen M.A.: *Examination of thermal interaction of multiple vertical ground heat exchangers*. Applied Energy, vol. 97, 2012, s. 962–969.
- [4] Cassaso A., Sethi R.: *Sensitivity analysis on the performance of a ground source heat pump equipped with a double U-pipe borehole heat exchanger*. European Geosciences Union General Assembly, 2014, <https://core.ac.uk/download/pdf/234903172.pdf> [8.01.2018].

- [5] Pollard H.J., Lee F.: *Long term monitoring of borehole temperature profiles using a thermistor array in the ball state university ground-source geothermal system*, [w:] *Conference: 50th Annual GSA North-Central Section Meeting, January 2016*, https://www.researchgate.net/publication/301642374_LONG_TERM_MONITORING_OF_BOREHOLE_TEMPERATURE_PROFILES_USING_A_THERMISTOR_ARRAY_IN_THE_BALL_STATE_UNIVERSITY_GROUND-SOURCE_GEO_THERMAL_SYSTEM [1.02.2018].
- [6] Dijkshoorn L., Speer S., Pechnig R.: *Measurements and Design Calculations for a Deep Coaxial Borehole Heat Exchanger in Aachen, Germany*. *International Journal of Geophysics*, vol. 1–2, 2013, s. 2–14.
- [7] Gehlin S., Andersson O., Bjelm L., Alm P.G., Rosberg J.E.: *Country Update for Sweden*, [w:] *Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 2015*, <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/papers/WGC/2015/01021.pdf> [8.09.2015].
- [8] Hellstrom G.: *Ground Heat Storage Thermal Analyses of Duct Storage Systems Theory*. Department of Mathematical Physics University of Lund, Sweden, 1991, <https://portal.research.lu.se/portal/files/6178678/8161230.pdf> [1.02.2018].
- [9] Eskilson P.: *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes*. Department of Mathematical Physics University of Lund, Sweden, 1987, https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwip_avW5urwAhWyxIsKHZbKA9IQFjAAegQIAhAD&url=https%3A%2F%2Fwww.buildingphysics.com%2Fdownload%2FEskilson1987.pdf&usg=AOvVaw2UyBY8Am3I8z4B0jJqC938 [1.02.2018].
- [10] Rybach L., Eugster W.J.: *Sustainability aspects of geothermal heat pump operation, with experience from Switzerland*. *Geothermics*, vol. 39, 2010, s. 365–369, https://www.researchgate.net/publication/229389926_Sustainability_aspects_of_geothermal_heat_pump_operation_with_experience_from_Switzerland [1.02.2018].
- [11] Rybach L., Hopkirk R.J.: *Experience with borehole heat exchangers in Switzerland*. Institute of Geophysics ETH-Hoenggerberg, Zurich, Switzerland, 1994. https://www.researchgate.net/publication/255003367_Experience_with_borehole_heat_exchangers_in_Switzerland [1.02.2018].
- [12] Weber J., Ganz B., Schellschmidt R., Sanner B., Schulz R.: *Geothermal Energy Use in Germany*, [w:] *Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia*, <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/01045.pdf>? [24.08.2015].
- [13] Schulte D.O., *Modeling insulated borehole heat exchangers*. *Environmental Earth Sciences*, vol. 75, article no. 910, 2016, <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-016-5638-x> [1.02.2018].
- [14] Raymond J., Malo M., Tanguay D., Grasby S., Bakhteyar F.: *Direct Utilization of Geothermal Energy from Coast to Coast: a Review of Current Applications and Research in Canada*, [w:] *Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia, 2015*, <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/28041.pdf> [24.08.2015].
- [15] Boyd T.L., Sifford A., Lund J.W.: *The United States of America Country Update 2015*, [w:] *Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 2015*, s. 1–12, <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/01009.pdf> [24.08.2015].

- [16] Sasada M.: *Geothermal heat pumps in Japan*, [w:] *Proceedings Japan International Geothermal Symposium 2002 Japan*, [http://www.geothermal-energy.org/pdf/IG-Astandard/Japan/2012/p17-Masakatsu_Sasada\(Eng-Jpn\).pdf](http://www.geothermal-energy.org/pdf/IG-Astandard/Japan/2012/p17-Masakatsu_Sasada(Eng-Jpn).pdf) [8.09.2015].
- [17] Fang L., Diao N., Shao Z., Cui P., Zhu K., Fang Z.: *Thermal analysis models of deep borehole heat exchangers*. Conference: International Ground Source Heat Pump Association, 2018, https://www.researchgate.net/publication/327729921_Thermal_analysis_models_of_deep_borehole_heat_exchangers [12.02.2018].
- [18] Javadi H., Ajatrostaghi S., Rosen M., Pourfallah M.: *A Comprehensive Review of Backfill Materials and Their Effects on Ground Heat Exchanger Performance*. Sustainability, vol. 10, no. 12, s. 4486, 2018, <https://doi.org/10.3390/su10124486> [1.02.2018].
- [19] Caulk R., Tomac I.: *Reuse of Abandoned Oil and Gas Wells for Geothermal Energy Production*. Renewable Energy, vol. 112, 2017, https://www.researchgate.net/publication/316897692_Reuse_of_Abandoned_Oil_and_Gas_Wells_for_Geothermal_Energy_Production [12.02.2018].
- [20] Śliwa T., Rosen M.A.: *Natural and artificial methods for regeneration of heat resources for borehole heat exchangers to enhance the sustainability of underground thermal storages: a review*. Sustainability, vol. 7, no. 10, 2015, s. 13104–13125.
- [21] Beier R.A., Acuña J., Mogensen P., Palm B.: *Borehole resistance and vertical temperature profiles in coaxial borehole heat exchangers*. Applied Energy, vol. 102, 2013, s. 665–675.
- [22] Zarrella A., De Carli M.: *Heat transfer analysis of short helical borehole heat exchangers*. Applied Energy, vol. 102, 2013, s. 1477–1491.
- [23] Zarrella A., Capozza A., De Carli M.: *Analysis of short helical and double U-tube borehole heat exchangers: A simulation-based comparison*. Applied Energy, vol. 112, 2013, s. 358–370.
- [24] Li M., Lai A.C.K.: *Heat-source solutions to heat conduction in anisotropic media with application to pile and borehole ground heat exchangers*. Applied Energy, vol. 96, 2012, s. 451–458.
- [25] Śliwa T., Kucper M.: *Accessing Earth's heat using Geothermal Radial Drilling for borehole heat exchangers*. AGH Drilling, Oil, Gas, vol. 34, no. 2, 2017, s. 495–512.
- [26] Mendrinós D., Katsantonis S., Karytsas C.: *Pipe materials for borehole heat exchangers*. Conference: European Geothermal Congress 2016, https://www.researchgate.net/publication/328232447_Pipe_materials_for_borehole_heat_exchangers [12.02.2018].
- [27] Śliwa T., Gaweł M.: *Ohorona atmosfernogo povitrâ zavdâki vikoristannû vidnovlûvanih dżerel energii v sistemah opalennâ ta oholodżennâ u gromads'kih ob'ektah u gmîni Palečnica*, [w:] *Improvement of energy management in typical public buildings of the city and Oblast Ivano-Frankivsk*, Kraków – Zakopane, 9–12 September 2013, AGH University of Science and Technology in Kraków, 2013, s. 1–11, <http://globenergia.pl/sklep/wydania-globenergia-elektroniczne-pdf/wydanie-elektroniczne-globenergia-4-2014-automat-24h-detail> [12.02.2018].
- [28] 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.

- [29] Alberti L., Angelotti A., Antelmi M., La Licata I.: *A Numerical Study on the Impact of Grouting Material on Borehole Heat Exchangers Performance in Aquifers*. *Energies*, vol. 703, no. 10, 2017, <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/5/703>.
- [30] Yoon S., Lee S.R., Xue J., Zosseder K., Go G.H., Park H.: *Evaluation of the Thermal Efficiency and a Costanalysis of Different Types of Ground Heat Exchangers in Energy Piles*. *Energy Conversion and Management*, vol. 105, 2015, s. 393–402.
- [31] Lund J.W., Toth A.N.: *Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review*, [w:] *Proceedings World Geothermal Congress 2020 Reykjavik, Iceland, April 26 – May 2, 2020, International Geothermal Association*, <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2010/0102.pdf> [24.08.2020].
- [32] Lund J.W., Gawell K., Boyd T.L., Jennejohn D.: *The United States of America Country Update 2010*, [w:] *Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 2010, 1–18*, <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2010/0102.pdf> [24.08.2015].
- [33] Lee K.S.: *Underground Thermal Energy Storage*. *Green Energy and Technology*, 152, 2012, s. 15–26, https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4273-7_2.
- [34] Schneider D., Strothöffer T., Broßmann E.: *Die 2800 m von Prenzlau oder die tiefste Erdwärmesonde der Welt*. *Geothermische Energie*, vol. 16, 1996, s. 10–12.
- [35] Clauser Ch.: *Numerical Simulation of Reactive Flowing Hot Aquifers*, Springer, Berlin 2003, <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-642-55684-5> [24.08.2015].
- [36] Rybach L., Eugster W.: *Reliable long term performance of BHE systems and market penetration – The Swiss success story*, [w:] *Proceedings, 2nd Stockton International Geothermal Conference*, ed. L. Stiles, 1998, s. 41–57, https://www.researchgate.net/publication/228512800_Reliable_long_term_performance_of_BHE_systems_and_market_penetration-The_Swiss_success_story [12.02.2018].
- [37] Rybach L., Hopkirk R.J.: *Shallow and Deep Borehole Heat Exchangers – Achievements and Prospects*, [w:] *Proceedings, World Geothermal Congress 1995, Italy, 1995*, s. 2133–2138, <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/1995/3-rybach.pdf> [12.02.2018].
- [38] Kohl T., Salton M., Rybach L.: *Data Analysis of The Deep Borehole Heat Exchanger Plant Weissbad (Switzerland)*, [w:] *Proceedings, World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, 2000*, s. 3459–3464, <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2000/R0924.PDF> [12.02.2018].
- [39] Kohl T., Brenni R., Eugster W.: *System performance of a deep borehole heat exchanger, Geothermics*, vol. 31, 2002, s. 687–708, https://www.agw.kit.edu/english/278_2219.php [26.02.2018].
- [40] Kohl T., Rybach L.: *Projekt Statistik Geothermische Nutzung der Schweiz für die Jahre 2000 und 2001*, 2003, https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/36/052/36052675.pdf [12.02.2018].
- [41] Signorelli S., Wagner R., Kohl T., Rybach L.: *Statistik der geothermischen Nutzung in der Schweiz, Ausgabe 2006 Überarbeitung der Geothermiestatistik von 1990 bis 2006*, 2007 https://geothermie-schweiz.ch/wp_live/wp-content/uploads/2015/10/I_Geothermiestatistik-Schweiz2014.pdf [12.02.2018].
- [42] Śliwa T., Kotyza J.: *Dobór optymalnego otworowego wymiennika ciepła w otworze Jachówka 2K do głębokości 2870 m*, [w:] *Metodyka i technologia uzyskiwania użytecznej*

- energii geotermicznej z pojedynczego otworu wiertniczego*, red. J. Sokołowski, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energia PAN, Pracownia Geosynoptyki i Geotermii, Kraków 2000, s. 251–284.
- [43] Sokołowski J., Ludwikowski B., Pawlik E.: *O potrzebie wykonania ocen zasobów geotermalnych pod gminami województw: małopolskiego i śląskiego*. Technika Poszukiwań Geologicznych, nr 2, 1999, s. 17–23.
- [44] Deng J., Wei Q., He S. Liang M., Zhang H.: *What Is the Main Difference between Medium-Depth Geothermal Heat Pump Systems and Conventional Shallow-Depth Geothermal Heat Pump Systems? Field Tests and Comparative Study*. Applied Sciences, vol. 9, no. 23, 2019, s. 5120, https://www.researchgate.net/publication/337552592_What_Is_the_Main_Difference_between_Medium-Depth_Geothermal_Heat_Pump_Systems_and_Conventional_Shallow-Depth_Geothermal_Heat_Pump_Systems_Field_Tests_and_Comparative_Study [26.02.2018].
- [45] Sapińska-Śliwa A., Rosen M., Gonet A., Śliwa T.: *Deep Borehole Heat Exchangers – A Conceptual and Comparative Review*. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, vol. 24, no. 1, 2015, https://www.researchgate.net/publication/284554643_Deep_Borehole_Heat_Exchangers_-_A_Conceptual_and_Comparative_Review.
- [46] Gehlin S.: *Thermal Response Test, Method Development and Evaluation*. Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, Sweden 2002, [https://www.scrip.org/\(S\(i43dyn45teexjx455qlt3d2q\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1716306](https://www.scrip.org/(S(i43dyn45teexjx455qlt3d2q))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1716306).
- [47] Śliwa T.: *Badania podziemnego magazynowania ciepła za pomocą kolektorów słonecznych i wymienników otworowych ciepła*. Wydawnictwa AGH, Kraków 2012, <https://geotermia.agh.edu.pl/pliki/monografie/Badania.pdf> [26.02.2018].
- [48] Mogensen Palne, *Fluid to Duct Wall Heat Transfer in Duct System Heat Storages* [Conference], Stockholm: The International Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice, 1983, s. 652–657.
- [49] Czekalski D., Obstawski P., *Procedura testowania pionowego wymiennika gruntowego w warunkach eksploatacyjnych*. Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, r. 37, nr 4, 2006, s. 18–21.
- [50] Gonet A., Śliwa T.: *Thermal response test on example of borehole heat exchangers in Ecological Park of Education and Amusement “OSSA”*, [w:] *Proceedings of XIV International Scientific-Technical Conference “New knowledge in the area of drilling, production, transport and storage hydrocarbons”*, Technická Univerzita Kosice, Pobanske, 2008, s. 42–47.
- [51] Rybach L.: *Shallow Systems*, GEOWATT AG, Zurich, Switzerland 2012, https://www.researchgate.net/publication/288164052_Shallow_Systems [26.02.2018].
- [52] Spitler J., Gehlin S.: *Thermal response testing for ground source heat pump systems. An historical review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 50, 2015, s. 1125–1137, https://econpapers.repec.org/article/eeerensus/v_3a50_3ay_3a2015_3ai_3ac_3ap_3a1125-1137.htm [26.02.2018].
- [53] Badenes B., Mateo Pla M.Á., Lemus-Zúñiga L.G., Sáiz Mauleón B., Urchueguía J.F.: *On the Influence of Operational and Control Parameters in Thermal Response Testing of Borehole Heat Exchangers*. Energies, vol. 10, no. 9, 2017, <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/9/1328> [26.02.2018].

- [54] Perina T.: *Derivation of the Theis (1935) Equation by Substitution*. Ground Water, vol. 48, iss. 1, 2010, s. 6–7, <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00610.x> [26.02.2018].
- [55] Sanner B., Hellström G., Spittler J., Gehlin S.: *Thermal Response Test – Current Status and World-Wide Application (PDF)*, [w:] *Proceedings World Geothermal Congress 2005*, https://www.researchgate.net/publication/228849837_Thermal_Response_Test-Current_Status_and_World-Wide_Application [26.02.2018].
- [56] Gonet A., Śliwa T., Złotkowski A., Sapińska-Śliwa A., Macuda J.: *Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University, Stanford, California 2012.
- [57] Lamarche L., Raymond J., Pambou C.H.: *Evaluation of the Internal and Borehole Resistances during Thermal Response Tests and Impact on Ground Heat Exchanger Design*. Energies, vol. 1, 2017, <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/1/38>.
- [58] Pawlikowski B.: *Dokumentacja geologiczna wierceń dla przyszłej instalacji otworowych wymienników ciepła w celach naukowo-badawczych*. AGH, Kraków 2008.
- [59] Śliwa T., Gonet A.: *Otworowe wymienniki ciepła jako źródło ciepła lub chłodu na przykładzie Geoenergetics Laboratory WWiG AGH (Borehole heat exchangers as heat or cool source on the basis of Laboratory of Geothermics of Drilling, Oil and Gas Faculty in AGH University of Science and Technology)*. Wiertnictwo, Nafta, Gaz, t. 28, nr 1–2, 2011, s. 419–430.
- [60] 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, vol. 2, Drilling, Oil and Gas Foundation, Kraków 2016.
- [61] Grygieńcza A.: *Analysis of estimation methods of borehole heat exchangers power rating*. MSc thesis, AGH University of Science and Technology, Drilling, Oil and Gas Faculty, Krakow 2009.

EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY AND BOREHOLE THERMAL RESISTANCE OF BOREHOLE HEAT EXCHANGERS WITH DIFFERENT CONSTRUCTIONS

Abstract: Borehole heat exchangers are the best way to geothermal energy extraction from the ground independent on lithology. Geothermal heat pumps based on the low-temperature heat can be one of possibilities smog reduction in cities. There often is not big area for drilling in the down towns (often with monuments). There is the reason for looking for the constructions of borehole heat exchangers with high efficiency (unit heat transfer between heat carrier and ground). One of the ways to improve the efficiency is use the most efficient construction of borehole heat exchanger. In the paper is described a research of thermal efficiency of borehole heat exchangers with use thermal response tests. The Laboratory of Geoenergetics borehole heat exchangers was studied. Based on thermal response tests interpretation and on empirical formulas unit heat transfer was calculated. Other conditions for use borehole heat exchangers in down towns was discussed. The conditions with small area and with difficult access to the field of drilling forces small number of borehole heat exchangers; its higher depth; directional axis, special rig for drilling.

Keywords: borehole heat exchangers, geothermal heat, borehole thermal resistance, geoenergetics, geothermal heat pumps