

Grzegorz PEŁKA¹, Wojciech LUBOŃ¹, Jarosław KOTYZA¹, Daniel MALIK¹

BADANIA OTWOROWEGO WYMIENNIKA CIEPŁA W ASPEKCIE ICH PARAMETRÓW CIEPLNYCH NA POTRZEBY WSPÓŁPRACY Z POMPĄ CIEPŁA

STRESZCZENIE

Pompy ciepła pozyskujące energię z płytkich systemów geotermalnych są obecnie najbardziej efektywnymi urządzeniami grzewczo-chłodzącymi. Centrum Zrównoważonego Rozwoju i Poszanowania Energii WGGiOŚ AGH w Miękinii prowadzi badania w zakresie pomp ciepła oraz otworowych wymienników ciepła. W celu kompleksowej realizacji badań opracowano przenośne urządzenie do prowadzenia testów reakcji termicznej (TRT) dla otworowych wymienników ciepła. Koncepcja urządzenia zakładała wykorzystanie dostępnych, krajowych komponentów składowych, co miało zapewnić niski koszt budowy. Test reakcji termicznej gruntu pozwala na określenie efektywnego współczynnika przewodzenia ciepła, oporu cieplnego otworowego wymiennika ciepła oraz temperatury początkowej w wymienniku. Wykonane urządzenie testowano na wymiennikach testowych w Centrum w Miękinii.

SŁOWA KLUCZOWE

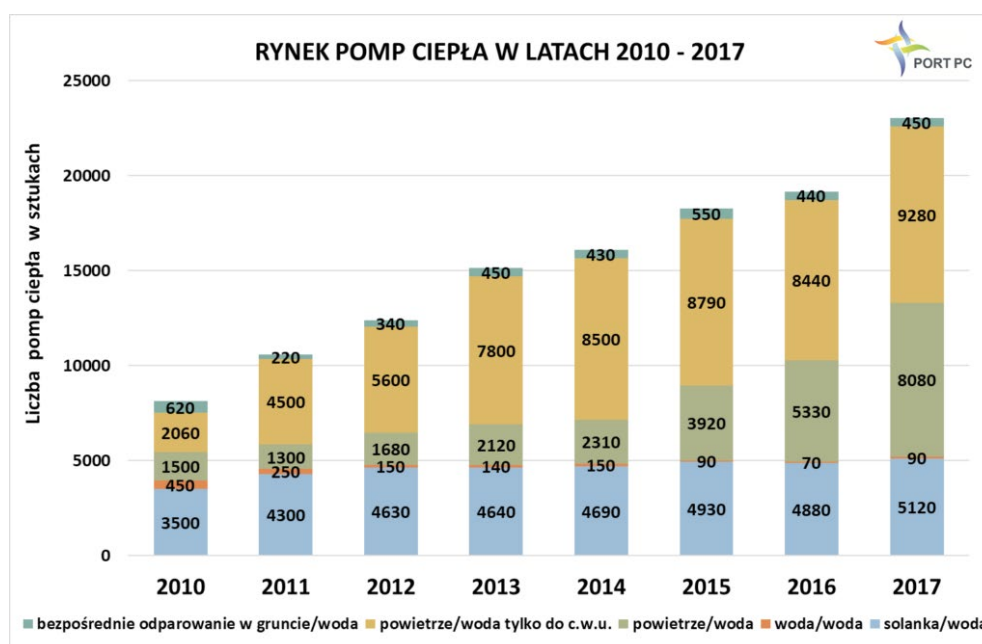
Gruntowe pompy ciepła, efektywny współczynnik przewodzenia ciepła, opór cieplny otworowego wymiennika ciepła

* * *

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Surowców Energetycznych, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: gpelka@geol.agh.edu.pl

WPROWADZENIE

Obecnie w Polsce zauważalny ciągle rozwój rynku pomp ciepła. Zgodnie z rysunkiem 1 główny wzrost rynku pomp ciepła odnotowywany jest w zakresie pomp ciepła typu powietrze-woda, do przygotowania ciepłej wody użytkowej, ale także do ogrzewania. Niemniej jednak rynek gruntowych pomp ciepła także rośnie, choć jego dynamika jest mniejsza niż dynamika wzrostu sprzedaży powietrznych pomp ciepła.



Rys. 1. Rynek pomp ciepła w Polsce w latach 2010–2017 (źródło: PORT PC 2018)

Fig. 1. Heat pumps market in Poland in the years 2010–2017 (source: PORT PC 2018)

W przypadku gruntowych pomp ciepła niezwykle ważne, poza jakością samego urządzenia, jest odpowiednie zwymiarowanie oraz wykonanie dolnego źródła ciepła. W tym celu, w przypadku najbardziej popularnego systemu gruntowego dolnego źródła ciepła w postaci otworowych wymienników ciepła, wykonywane są badania testu reakcji termicznej (TRT) gruntu (Śliwa i in. 2017; Rzyżyński i in. 2017; Wajman 2011; Zbrojkiewicz 2011). Wyniki testu, odpowiednio opracowane, informują o średniej temperaturze cieczy w wymienniku niepracującym, a także o efektywnym współczynniku przewodzenia ciepła λ_{ef} oraz o oporze cieplnym otworowego wymiennika ciepła R_b . Współczynnik przewodzenia ciepła zależy głównie od parametrów cieplnych otaczającego wymiennik ośrodka skalnego, a opór cieplny wymiennika zależy od jakości i technologii jego wykonania.

Centrum Zrównoważonego Rozwoju i Poszanowania Energii WGGiOŚ AGH w Miękinii, prowadząc działalność edukacyjną oraz naukowo-rozwojową w zakresie pomp ciepła oraz

gruntowych dolnych źródeł, posiada kilka wymienników na potrzeby prowadzenia edukacji oraz badań własnych. Aby poszerzyć spektrum prowadzonych działań zarówno edukacyjnych, jak i badawczo-rozwojowych, niezbędne było poszerzenie działalności o testowanie otworowych wymienników ciepła.

Projekt i wykonanie własnego urządzenia zdeterminowała cena urządzenia komercyjnego do przeprowadzania testów TRT wynosząca około 17 000 dolarów netto. Współpraca z firmą Globenergia Sp. z o.o. zaowocowała możliwością wykonania projektu technicznego własnego urządzenia TRT.

1. KONCEPCJA WYKONANIA URZĄDZENIA TRT

Prace koncepcyjne zostały poprzedzone przeglądem literaturowym dostępnych rozwiązań (Hemingway i Long 2012; Georgiev i in. 2010; Rees 2011; Mattson i in. 2007; Sanner i in. 2008). Przegląd literatury pozwolił na wytypowanie następujących cech urządzenia:

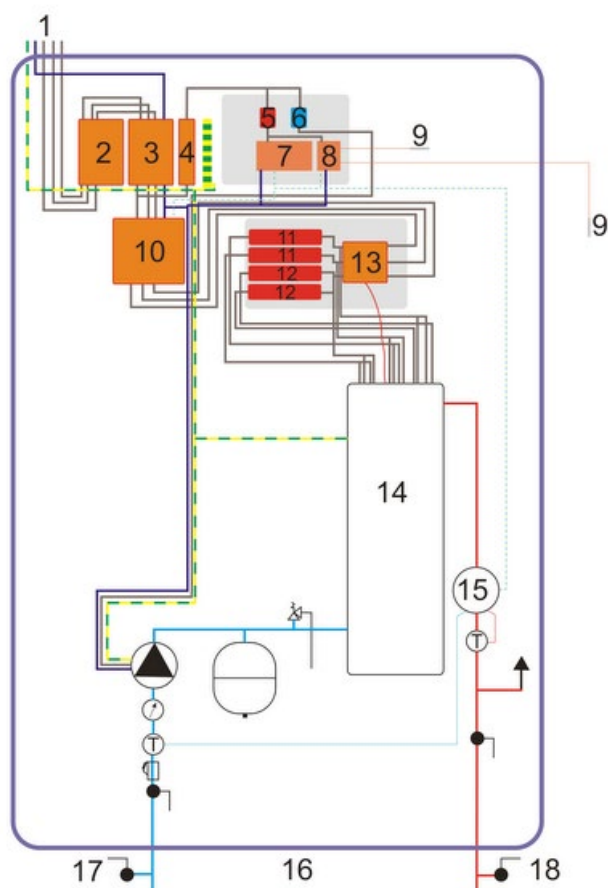
- niska cena całkowita urządzenia, ze względu na ograniczony budżet projektu,
- wykorzystanie krajowych komponentów do budowy urządzenia,
- kompaktowe wymiary, ułatwiające transport urządzenia (np. w bagażniku samochodu osobowego),
- możliwość przeprowadzania badań dla otworów o głębokości do 200 m,
- możliwość przeprowadzania badań dla wymienników typu podwójna U-rurka,
- możliwość rozbudowy urządzenia o dodatkowe moduły komunikacyjne, np. z wykorzystaniem GPRS lub sieci wi-fi.

Na podstawie wymienionych wyżej założeń koncepcyjnych, a także bazując na już istniejących rozwiązaniach, dokonano doboru poszczególnych komponentów urządzenia, obejmujących następujące pozycje:

- elementy grzewcze,
- zabezpieczenia elektryczne, włączniki i czujniki,
- pompę obiegową o regulowanej prędkości obrotowej,
- naczynie przeponowe (kompensujące rozszerzalność cieczy w związku ze wzrostem temperatury),
- odpowietrzniki automatyczne, zawory odcinające, zawory napełniające i zawór bezpieczeństwa,
- szybkozłączki hydrauliczne,
- rejestrator danych pomiarowych (temperatury, przepływ, moc elektryczna, temperatura zewnętrzna),
- czujniki temperatury, przepływomierz/ciepłomierz, licznik elektryczny, manometr,
- obudowa urządzenia.

2. BUDOWA URZĄDZENIA

Opracowany na podstawie powyższych założeń schemat techniczny urządzenia przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat wykonanego urządzenia do TRT. Objaśnienia numerów: 1 – zasilanie elektryczne trójfazowe, 2 – wyłącznik nadprądowy trójfazowy, 3 – bezpiecznik różnicowo-prądowy, 4 – wyłącznik nadprądowy jednofazowy, 5 – wyłącznik rejestratora, 6 – wyłącznik pompy obiegowej, 7 – rejestrator, 8 – przetwornik czujników temperatury, 9 – czujnik temperatury PT100, 10 – licznik energii elektrycznej z analizą parametrów sieci, 11 – wyłącznik grzałki 2 kW, 12 – wyłącznik grzałki 4 kW, 13 – wyłącznik termiczny (bezpieczeństwa) grzałek, 14 – zespół grzejny (6 elementów grzewczych – każdy po 2 kW), 15 – ciepłomierz, 16 – przyłącza hydrauliczne do otworu, 17 – zawór spustowy, 18 – zawór napełniający (Pelka in. 2015)

Fig. 2. Scheme of constructed TRT device. Explanations: 1 – 3-phase electrical connection, 2 – 3-phase over current protection switch, 3 – residual current device, 4 – 1-phase over current protection switch, 5 – logger switch, 6 – pump switch, 7 – logger, 8 – temperature sensors transducer, 9 – temperature sensor PT100, 10 – energy meter, 11 – 2 kW heaters switch, 12 – 4 kW heaters switch, 13 – heaters thermal protection switch, 14 – heater (6 heaters, each 2 kW), 15 – heat meter, 16 – hydraulic circuit connections, 17 – drain valve, 18 – filling valve (Pelka et al. 2015)

Obudowę urządzenia stanowi skrzynia narzędziowa wykonana z tworzywa sztucznego o wymiarach 630 x 450 x 480 mm. Skrzynia ta jest zamykana na kluczyk, posiada wymiary pozwalające jednocześnie na umieszczenie w niej wszystkich niezbędnych elementów, jak i na spełnienie założenia koncepcyjnego o wymiarach urządzenia pozwalających na przewożenie go w samochodzie osobowym. W obudowie wykonano przepusty techniczne pod elementy hydrauliczne, kable elektryczne oraz otwory odpływowe i wentylacyjne.

W związku z założeniem, że urządzenie do TRT będzie mogło obsługiwać otwory do 200 m głębokości (zdecydowana większość otworów wierconych pod pompy ciepła w Polsce mieści się w tym zakresie), należało dobrać element grzewczy, który będzie dostarczał odpowiednią moc grzewczą. Po przeprowadzeniu badań literaturowych w temacie jednostkowego poboru mocy przez 1 mb otworowego wymiennika ciepła OWC w trakcie wykonywania testu TRT, można przyjąć moc dostarczaną na 1 mb OWC:

- w zakresie od 50 do 80 W/mb otworu według zaleceń ASHRAE z 2002 roku, lub
- 30 W/mb otworu dla warstw słabo przewodzących do 80 W/mb otworu dla warstwach o wysokiej przewodności cieplnej według zaleceń dokumentu IEA ECES Annex 13 (Sanner i in. 2005).

Uwzględniając maksymalne długości testowanych OWC równe 200 m, określone podczas prac koncepcyjnych, element grzewczy w skrajnym przypadku powinien dysponować mocą równą 13 kW (zakładając średni jednostkowy pobór mocy równy 65 W/mb OWC). W oparciu o te dane oraz biorąc pod uwagę możliwość regulacji mocy w kroku maksymalnym co 2 kW (aby móc właściwie dobrać moc grzewczą do długości otworowego wymiennika ciepła, jako element grzewczy zaproponowano układ zbudowany w oparciu o gotowy kocioł Kospel EKCo.M1Nz 12 kW. Jest to kocioł trójfazowy posiadający 6 elementów grzewczych, każdy po 2 kW. Posiada zabudowaną w sobie pompę obiegową oraz grupę bezpieczeństwa w postaci zaworu bezpieczeństwa (o ciśnieniu otwarcia 3 bar) oraz naczynia przeponowego o pojemności 6 litrów. Ten zespół kotłowy posiada element zabezpieczający w postaci wyłącznika wyzwalanego termicznie, przy temperaturze 95°C (Kospel 2015). Cały zespół elementów, stanowiących urządzenie do TRT, został tak skonstruowany, aby móc sterować manualnie mocą grzewczą oraz wydajnością pompy obiegowej. Sterownik kotła został zamieniony na manualne włączniki poszczególnych urządzeń i sekcji elementu grzewczego. Układ hydrauliczny został tak przekonstruowany, aby zmieścić się w wybranej obudowie.

Na podstawie analizy istniejących urządzeń, a także zgodnie z wytycznymi IEA ECES Annex 21 (Nordell 2011) przy projektowaniu układu pomiarowego wzięto pod uwagę następujące informacje:

- Zgodnie z wytycznymi Annex 21 powinny być zbierane takie dane jak przepływ czynnika, temperatura zasilania i powrotu, temperatura zewnętrzna, temperatura wewnątrz obudowy oraz pobór mocy elektrycznej elementu grzewczego.
- System zbierania i archiwizacji danych powinien zapisywać dane na nośniku przenośnym typu pendrive, karta pamięci lub pozwalać na szybkie zgranie zapisanych danych na dysk komputera za pomocą złącza RS485/232.

— Powinna być możliwość zainstalowania bezprzewodowego systemu transmisji danych (wi-fi lub GPRS).

Urządzeniem odczytującym temperatury zasilania i powrotu medium grzewczego, a także przepływ wody/glikolu przez układ jest ciepłomierz Apator model Faun z wirnikowym przetwornikiem przepływu JS90 1,5-NC (Apator 2014). Ciepłomierz ten jest wyposażony w moduł komunikacji Modbus RTU. Jest on wyposażony w rezystancyjne czujniki temperatury typu PT100. Czujniki te są zanurzone bezpośrednio w strudze przepływającego medium. W celu pomiaru poboru mocy elektrycznej w urządzeniu zamontowano trójfazowy analizator parametrów sieci firmy FiF model LE03MP (F&F 2015). Odczyt zużycia energii elektrycznej podczas testu może także służyć do rozliczeń za pobraną w trakcie testu energię elektryczną. W urządzeniu zamontowano dodatkowe dwa czujniki temperatury typu PT 100 w celu monitorowania temperatury zewnętrznej oraz temperatury panującej wewnątrz obudowy urządzenia.

System transmisji danych z urządzeń pomiarowych do rejestratora oparto na porcie szeregowym RS485 i protokole transmisji danych Modbus RTU. Wybrano rejestrator firmy Lumel model N30B (Lumel 2015). Dane z rejestratora mogą być archiwizowane na przenośnym, wymiowym nośniku w postaci karty pamięci. Istnieje także możliwość zgrywania danych za pomocą portu RS485 i protokołu Modbus RTU, z wykorzystaniem konwertera typu Modbus RTU na USB i oprogramowania firmy Lumel.

Zespół hydrauliczny umieszczono w obudowie, w której uprzednio wywiercono otwory na króćce przyłączeniowe, odpływ z zaworu bezpieczeństwa, a także otwór odpływowy awaryjny – zabezpieczający przed zalaniem urządzenia spowodowanym nieszczelnością układu hydraulicznego lub pokrywy skrzyni (przeciekanie deszczu).

Zespół łączący grzałki elektryczne wraz z bezpiecznikiem termicznym został umieszczony w skrzynce elektrycznej przy zespole hydraulicznym urządzenia. W celu uniknięcia zalania skrzynki elektrycznej, np. w przypadku wycieku medium, została ona odpowiednio odizolowana od dna skrzyni. W celu stopniowania mocy zespołu grzejnego zastosowano, jako wyłączniki poszczególnych grzałek, wyłączniki nadprądowe. Grzałki zostały tak pogrupowane, że pierwsze dwa wyłączniki łączą po jednej grzałce o mocy 2 kW, a kolejne dwa po dwie grzałki. Dzięki temu można stopniować moc co 2 kW (2, 4, 6, 8, 10, 12 kW).

Na górnej pokrywie skrzyni zamontowano zespół rejestrująco-elektryczny umiejscowiony w trzech skrzynkach elektrycznych. Połączeń elektrycznych i sygnałowych dokonano zgodnie ze schematem zamieszczonym na rysunku 2. Na rysunku 3 przedstawiono fotografie wnętrza urządzenia do TRT.

Po zbudowaniu urządzenia przeprowadzono próbne testy na otworze badawczym (rys. 4), które pozwoliły na końcową konfigurację systemu rejestracji danych. Ponadto sprawdzono wydajność pompy obiegowej na poszczególnych biegach. Ustawiono minutowy krok pomiarowy.



Rys. 3. Wykonane urządzenie do TRT

Fig. 3. TRT device



Rys. 4. Urządzenie TRT podczas testowania na otworze badawczym

Fig. 4. TRT during testing

3. ANALIZA WYNIKÓW TRT

Najbardziej popularną metodą interpretacji wyników testu TRT jest model źródła liniowego (*line-source model*). Metoda ta została zaadoptowana do opisu wymiany ciepła w dolnym źródle ciepła przez Igersoll i Plass (Liu i in. 2017; Nordell 2011). Model ten definiuje pionowy wymiennik jako nieskończone liniowe źródło i pomija przepływ ciepła od powierzchni gruntu oraz strumień cieplny przepływający z głębi Ziemi. Grunt jest zdefiniowany jako nieskończony ośrodek z jednolitą temperaturą. Proces przewodzenia ciepła jest uproszczony do jednowymiarowego, z pominięciem przepływu ciepła wzdłuż osi otworu. Według modelu źródła liniowego, odpowiedź termiczna cieczy na stały strumień dostarczanego ciepła jest wyrażona równaniem:

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

gdzie:

- $T_{sr}(t)$ – średnia temperatura medium płynącego w wymienniku ciepła [K],
- q – jednostkowa moc grzewcza [W],
- λ_{ef} – efektywny współczynnik przewodzenia gruntu [W/mK],
- α – dyfuzyjność cieplna gruntu [m²/s],
- t – czas trwania testu [s],
- r – promień odległości od źródła liniowego [m],
- γ – stała Eulera (0,5772...),
- R_b – opór cieplny otworowego wymiennika ciepła [m²K/W],
- T_0 – niezaburzona temperatura gruntu [K].

Równanie 1 można zapisać w postaci jak na równaniu 2, gdzie k jest współczynnikiem kierunkowym prostej powstałej przez przedstawienie w postaci półlogarytmicznej zmian temperatury medium podczas fazy grzewczej testu.

$$T(t) = k \cdot \ln(t) + m \quad (2)$$

Współczynnik kierunkowy k zdefiniowany jest równaniem 3.

$$k = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{ef}} \quad (3)$$

Przekształcając równanie 3 można otrzymać wzór na efektywny współczynnik przewodzenia ciepła λ_{ef} , zgodnie ze wzorem 4.

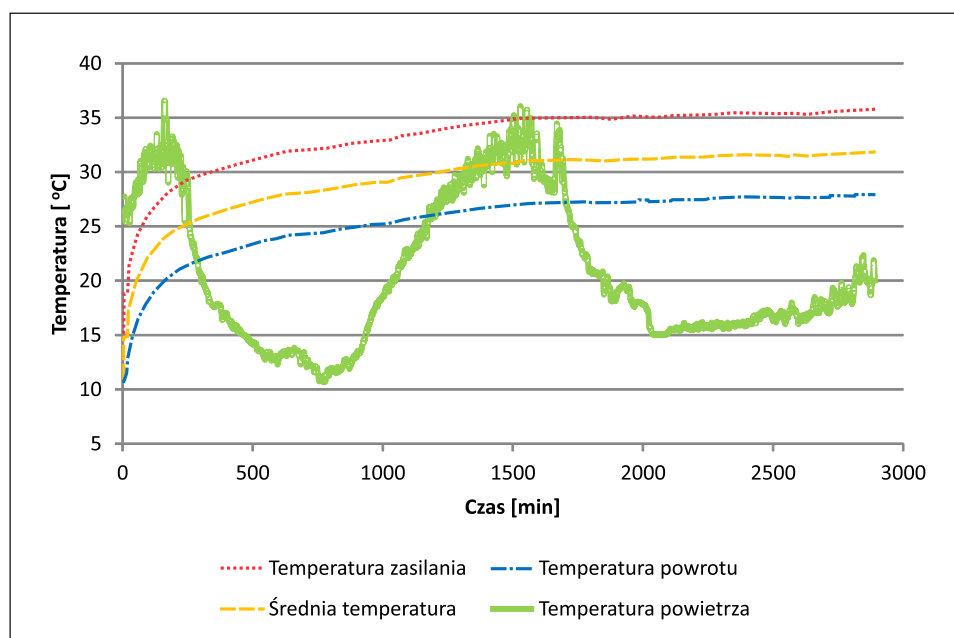
$$\lambda_{ef} = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot k} \quad (4)$$

Maksymalny błąd obliczeń dla powyższego wzoru wynosi 2,5% dla oraz 10% dla $\frac{\alpha \cdot t}{r^2} \geq 5$ (Gehlin 2002).

Przekształcając równanie 1, można wyznaczyć opór cieplny otworowego wymiennika ciepła, zgodnie z równaniem 5.

$$R_b = \frac{(T_{sr} - T_0)}{q} - \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{ef}} \cdot \left[\ln \left(\frac{4 \cdot \alpha \cdot t}{r^2} \right) - \gamma \right] \quad (5)$$

Na rysunku 5 przedstawiono przyrost w czasie temperatur zasilania i powrotu oraz średniej temperatury podczas fazy grzewczej testu. Dodatkowo naniesiono wykres przedstawiający zmiany temperatury zewnętrznej w trakcie trwania testu.

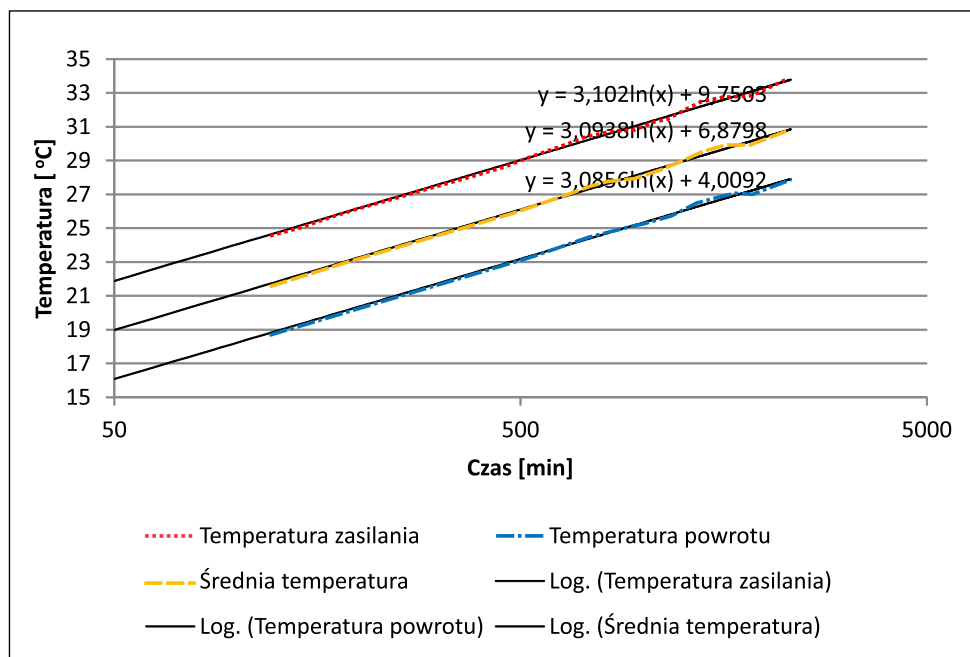


Rys. 5. Przebieg temperatur podczas fazy grzewczej testu TRT

Fig. 5. Fluid temperatures during heating phase of TRT

W celu porównania parametrów pracy otworowego wymiennika ciepła w zależności od typu zastosowanej sondy (pojedyncza lub podwójna U-rurka), przeprowadzono testy TRT na badawczym otworowym wymienniku ciepła. Jest on zbudowany z podwójnej U-rurki o głębokości 92 m. Tworzą go U-rurki z tworzywa HDPE o średnicy zewnętrznej 40 mm i grubości ścianki 3,7 mm – SDR 11. Średnica otworu, w który został zapuszczony wymiennik ciepła, wynosi 160 mm. Otwór został zacementowany zaczynem termoprzewodzącym Muoviterm o współczynniku przewodzenia ciepła $\lambda = 2,0$ W/mK (Muovitech). W celu przeprowadzenia

badania dla pojedynczej U-rurki urządzenie podłączono pod jedną z dostępnych dwóch par króćców przyłączeniowych. Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono przebieg temperatur zasilania i powrotu (oraz średniej temperatury płynu) dla faz grzewczych testów reakcji termicznej gruntu dla wymiennika typu pojedyncza U-rurka (rys. 6) oraz podwójna U-rurka (rys. 7).



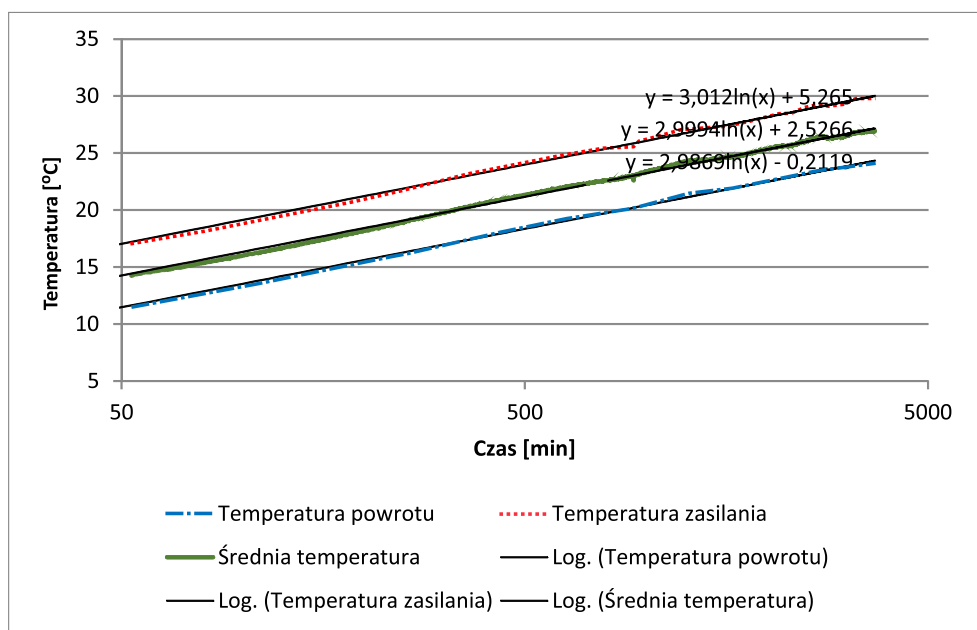
Rys. 6. Przebieg temperatur zasilania i powrotu dla pojedynczej U-rurki podczas fazy grzewczej TRT, czas w skali logarytmicznej

Fig. 6. Flow and return temperatures for single U-pipe during heating phase of TRT, time log scale

Analiza przeprowadzona na podstawie badań dla pojedynczej U-rurki wykazała, że efektywny współczynnik przewodzenia ciepła dla gruntu wyniósł 1,73 W/mK, natomiast opór cieplny otworowego wymiennika ciepła wyniósł 0,132 m²K/W. Test dla podwójnej U-rurki potwierdził efektywny współczynnik przewodzenia ciepła dla gruntu (1,79 mK/W) oraz wykazał, że opór cieplny dla takiego wymiennika jest prawie dwukrotnie niższy (0,078 m²K/W). Parametry testów zostały przedstawione w tabelach 1 i 2.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wytworzone urządzenie do przeprowadzania testów reakcji termicznej gruntu zostało wykorzystane do przeprowadzenia badań m.in. z wykorzystaniem badawczego otworowego wymiennika ciepła znajdującego się w Centrum Zrównoważonego Rozwoju i Poszanowania Energii AGH WGGiOŚ w Miękinii. Przeprowadzone badania dotyczące porównania para-



Rys. 7. Przebieg temperatur zasilania i powrotu dla podwójnej U-rurki podczas fazy grzewczej TRT, czas w skali logarytmicznej

Fig. 7. Flow and return temperatures for double U-pipe during heating phase of TRT, time log scale

Tabela 1

Dane i wyniki TRT dla standardowej U-rurki i objętościowego natężenia przepływu równego 970 l/h

Table 1

Data and results of TRT for standard single U-pipe and flow rate 970 l/h

Data wykonywania fazy grzewczej testu	06–08.07.2015
Długość otworowego wymiennika ciepła [m]	92
Typ otworowego wymiennika ciepła	rura PE 40 x 3,7 mm SDR11
Nośnik ciepła	woda
Średnie objętościowe natężenie przepływu [l/h]	970
Warunki prowadzenia testu	przepływ burzliwy
Średnica otworu [mm]	160
Czas trwania fazy grzewczej testu [h]	40
Początkowa temperatura gruntu [°C]	9,92
Średnia moc grzewcza [W]	6200
Ciepło dostarczone do gruntu [kWh]	245,5 kWh
Średni współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/mK]	1,73 ± 0,04
Średni opór termiczny otworowego wymiennika ciepła R_b [mK/W]	0,132

Tabela 2

Dane i wyniki TRT dla podwójnej U-rurki (standardowa i turbo) i objętościowego natężenia przepływu równego 979 l/h

Table 2

Data and results of TRT for standard double U-pipe and flow rate 979 l/h

Data wykonywania fazy grzewczej testu	04–07.11.2015
Długość otworowego wymiennika ciepła [m]	92
Typ otworowego wymiennika ciepła	podwójna U-rurka PE 40 x 3,7 mm SDR11
Nośnik ciepła	woda
Średnie objętościowe natężenie przepływu [l/h]	979
Warunki prowadzenia testu	przepływ burzliwy
Średnica otworu [mm]	160
Czas trwania fazy grzewczej testu [h]	62
Początkowa temperatura gruntu [°C]	8,96
Średnia moc grzewcza [W]	6200
Ciepło dostarczone do gruntu [kWh]	389,17 kWh
Średni współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/mK]	1,79 ± 0,04
Średni opór termiczny otworowego wymiennika ciepła R_b [mK/W]	0,078

metrów pracy otworowych wymienników ciepła typu pojedyncza oraz podwójna U-rurka, wykazały znacznie niższy opór cieplny dla drugiej z konfiguracji. Im niższy opór cieplny otworowego wymiennika ciepła, tym korzystniejsza (wyższa) średnia temperatura solanki krążącej w dolnym źródle ciepła w trakcie eksploatacji gruntowego wymiennika przez pompę ciepła. Wyższa temperatura solanki przekłada się na korzystniejszy – wyższy współczynnik efektywności pracy pompy ciepła – COP. Wyższa temperatura medium wychodzącego z wymiennika gruntowego i wpływająca do parownika pompy ciepła przekłada się na wyższą temperaturę odparowania czynnika roboczego w układzie chłodniczym pompy ciepła. Przyczynia się to do zmniejszenia różnicy ciśnień, które pokonać ma sprężarka, a tym samym do obniżenia kosztów pracy urządzenia. Dzięki zastosowaniu podwójnej U-rurki w wymienniku gruntowym o takiej samej sumarycznej długości, w identycznych warunkach geologicznych pompa ciepła pracować będzie efektywniej, co przełoży się na niższe koszty eksploatacyjne. Badania prowadzone w Laboratorium w Miękinii w zakresie efektywności pracy otworowych wymienników ciepła można wykorzystać w realizowanych inwestycjach z otworowymi wymiennikami ciepła.

Praca finansowana z umowy z AGH 11.11.140.031.

LITERATURA

- Apator, 2014 – Faun. *Profesjonalny, najnowszej generacji przelicznik wskazujący do ciepłomierzy rozłącznych* [Online] <http://www.apator.com/uploads/files/Produkty/Cieplomierze/faun/pl-00075-2014-faun-v1.pdf> [Dostęp: 15.05.2015].
- F&F, 2015 – *Wskaźnik zużycia energii elektrycznej LE-03MP* [Online] <https://www.fif.com.pl/liczniki-zuzycia-energii-elektrycznej/463-licznik-zuzycia-energii-le-03mp.html> [Dostęp: 16.05.2015].
- Gehlin, S. 2002. *Thermal response test. Method development and evaluation*. Praca doktorska. Lulea University of Technology, Department Environmental Engineering, Division of Water Resources Engineering.
- Georgiev i in. 2010 – Georgiev, A., Tabakova, S. i Popov, R. 2010. The Bulgarian Experience in the Thermal Response Tests. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*. Bali, Indonesia, s. 25–29 April 2010.
- Hemmingway, P. i Long, M. 2012. Design and development of a low-cost thermal response rig. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Energy* 165 (3), s. 137–148.
- Kospel, 2015 – *Instrukcja obsługi kotła Kospel EKCo.M1Nz* [Online] <http://kospel.pl/pl/instrukcje-obslugi.html?download=1124:ekco-tm-instrukcja> [Dostęp: 15.05.2015].
- Liu i in. 2017 – Liu, X., Clemenzi, R. i Liu, S. 2017. *Advanced testing method for ground thermal conductivity*. Oak Ridge National Laboratory.
- Lumel, 2015 – N30B Cyfrowy rejestrator tablicowy [Online] https://www.lumel.com.pl/resources/Pliki%20do%20pobrania/N30B/N30B_karta_katalogowa.pdf [Dostęp: 16.05.2015].
- Mattson i in. 2007 – Mattson, N., Steinmann, G. i Laloui, L. 2007. In-Situ Thermal Response Testing – New Developments. *Proceedings European Geothermal Congress 2007*. Unterchaching, Germany, 30 May–1 June 2007.
- MuoviTech [Online] <https://www.muovitech.pl/default.asp?page=products&category=Czesci%20instalacyjne&id=2995> [Dostęp: 24.06.2018].
- Nordell, B. 2011. Thermal Response Test (TRT) State-of-the art 2011 : IEA ECES ANNEX 21.
- Pełka i in. 2015 – Pełka, G., Luboń, W. i Kotyza, J. 2015. *Design and development of portable, low-cost thermal response test device*. 2nd international conference Renewable Energy Sources : engineering, technology, innovations – scientific conference : May 26–29, Krynica, Poland.
- PORT PC, 2018 – Spektakularny wzrost rynku pomp ciepła w Polsce w 2017 roku [Online] <http://portpc.pl/spektakularny-wzrost-rynku-pomp-ciepła-polsce-2017-roku/> [Dostęp: 15.06.2018].
- Rees, S. 2011. *Thermal response testing: development and practice*. Interseasonal Heat Transfer. Ground Source Live Seminar. 8 June 2011. Peterborough England.
- Ryżyński i in. 2017 – Ryżyński, G., Czarniak, P. i Sobótka, P. 2017. PGI-NRI experiences in geothermal parameters measurements, GEOPLASMA-CE: Knowledge exchange workshop on workflows and standards for calibration of thermal Response Test devices, Prague 15.03.2017.
- Sanner i in. 2005 – Sanner, B., Hellstrom, G., Spittler, J. i Gehlin, S. 2005. *Thermal Response Test – Current Status and World-Wide Application*. Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24–29 April.
- Sanner i in. 2008 – Sanner, B., Mands, E., Sauer, M.K. i Grundmann, E. 2008. *Thermal response test, a routine method to determine thermal ground properties for GSHP design*. 9th International IEA Heat Pump Conference, 20–22 May, Zurich, Switzerland.

- Śliwa i in. 2017 – Śliwa, T., Sapińska-Śliwa, A., Gonet, A., Jezuit, Z., Bieda, A., Kowalski, T., Ozimek, J. i Złotkowski, A. 2017. Specifying the number of borehole heat exchangers based on thermal response test and geoenergetic analysis. *AGH Drilling, Oil, Gas* Vol. 34, No. 1.
- Wajman, M. 2011. Metody pomiarowe badania warunków pracy pionowych sond gruntowych – testy TRT i DTRT. *Technika Chłodnicza i klimatyzacyjna* nr 12.
- Zbrojkiewicz, S. 2011. Określanie wydajności pionowych gruntowych wymienników ciepła. *Globe-nergia* nr 4.

ANALYSIS PARAMETERS OF HEATING – COOLING INSTALLATION WITH GROUND SOURCE HEAT PUMP IN HEATING AND PASSIVE COOLING MODE

ABSTRACT

Geothermal heat pumps are the most efficient heating and cooling devices. The AGH Sustainable Development and Energy Saving Center in Miękinia conducts heat pump and borehole heat exchangers research. To do the complex research a portable thermal response test device was developed. The concept of this device assume the use of available, domestic parts with a low cost of the construction. Thermal response test allows to determine an effective ground heat transfer coefficient, borehole heat exchanger thermal resistance and undisturbed fluid temperature. The constructed device was tested on the borehole heat exchangers in the Miękinia Laboratory.

KEYWORDS

Geothermal heat pumps, effective coefficient of thermal conductivity, borehole heat exchanger thermal resistance