

PODSTAWY TEORETYCZNE WYMIANY CIEPŁA W PIONOWYCH SONDACH GRUNTOWYCH

mgr inż. Michał WAJMAN

Wydział Mechaniczny
Politechnika Gdańska

WPROWADZENIE

Sprężarkowe Pompy Ciepła (SPC) wykorzystujące grunt jako źródło ciepła są współcześnie coraz częściej jedynym urządzeniem pokrywającym zapotrzebowanie budynku na ciepło bądź chłód. Najbardziej wydajną z metod na odebranie/oddanie ciepła niskotemperaturowego z/do gruntu jest umieszczenie wymiennika ciepła (tzw. **sondy pionowej**) w wykonanym w gruncie odwiercie i wprowadzenie do niego cyrkulującego płynu pośredniczącego. Pomimo wielu niezaprzeczalnych zalet systemów opartych na gruntowych pompach ciepła z wymiennikiem pionowym, takich jak wieloletnia „żywołność” inwestycji (funkcjonalność odwiertu zakładana się często na okres przynajmniej 50 lat), wysoka wydajność i niskie koszty eksploatacyjne w trakcie całego okresu użytkowania gruntowej pompy ciepła, urządzenia tego typu w Polsce, w porównaniu do innych krajów europejskich są niestety wciąż rzadko stosowane.

W artykule przedstawiono teoretyczne podstawy wymiany ciepła w pionowych wymiennikach gruntowych oraz zagadnienie oporów cieplnych występujących podczas ich pracy. Jest on pierwszym z serii planowanych artykułów poświęconych zagadnieniom związanym z sondami gruntowymi, wśród których znajdzie się między opis **Rozłożonego Testu Reakcji Termicznej (Disributed Thermal Response Test - DTRT)**, innowacyjnego sposobu zabezpieczania sond za pomocą tzw. „**kapsuł energii**” oraz różnych typów konstrukcyjnych wymienników pionowych.

Napisanie tego artykułu i jego kontynuacja w formie kolejnych zagadnień była możliwa dzięki wiedzy uzyskanej podczas trzymiesięcznej współpracy autora ze stroną szwedzką w ramach stypendium LLP Erasmus w KTH Royal Institute of Technology w Sztokholmie. Szczególne podziękowania i słowa uznania należą się doktorantowi José Acuña oraz dr. inż. Zenonowi Boncy, pod których opieką została wykonana praca magisterska, będąca podstawą prezentowanych treści.

1. TEORETYCZNE PODSTAWY WYMIANY CIEPŁA

1.1 Przewodzenie ciepła w gruncie

W trybie grzania za pomocą pompy ciepła, w którym płyn pośredniczący krążący w sondzie pionowej ogrzewa się od otaczającego ją gruntu, pobór ciepła, który ma miejsce w początkowym okresie działania urządzenia powoduje znaczny spadek naturalnej, niezakłóconej temperatury gruntu rozważanej dla danej długości wymiennika. Okres ten może charakteryzować się różnym czasem trwania, najczęściej jednak dopiero po paru dekadach pracy pompy mamy do czynienia z warunkami stanu ustalonego, dla którego teoretycznie rozważa się procesy cieplne występujące w gruncie. Mechanizm przewodzenia ciepła podczas pierwszych lat działania pompy ciepła występuje głównie w kierunku promieniowym, przechodząc po pewnym czasie w trójwymiarowy przepływ ciepła [1].

Dla warunków stanu ustalonego, trójwymiarowy model wymiany ciepła wyrażony za pomocą modelu

cylindrycznego jest uproszczony do postaci równania jednowymiarowego, w którym strumień ciepła przepływa tylko w jednym kierunku x . Przewodzenie ciepła następuje pomiędzy otaczającym wymiennik pionowy gruntem i nim samym, tzn. jego ścianą, podczas gdy możliwy ruch wody głębinowej lub gruntowej zostaje pominięty. Mechanizm ów zdefiniowany jest za pomocą równania (1):

$$q = -\lambda_{\text{gruntu}} \frac{\partial T}{\partial x} [W/m^2] \quad (1)$$

gdzie:

- q – strumień ciepła (moc cieplna na jednostkę powierzchni) wyrażony w $[W/m^2]$
- λ_{gruntu} – przewodność cieplna gruntu wyrażona w $[W/mK]$
- ∂T – gradient temperatury wyrażony w $[K]$
- ∂x – gradient odległości wyrażony w $[m]$

W powyższym równaniu gradient temperatury ∂T jest siłą napędową procesu przepływu ciepła i można go tu zinterpretować jako różnicę między temperaturą ściany odwiertu T_{bh} i niezakłóconym profilem temperaturowym gruntu T_{gruntu} . Gradient odległości ∂x można natomiast zinterpretować jako różnicę między promieniami r_{gruntu} i r_{bh} .

Aby określić jaki strumień ciepła wyrażony w $[W]$ jest możliwy do uzyskania z jednego metra odwiertu o średnicy r_{bh} , należy przyjąć warunek brzegowy, który ogranicza rozważany przypadek tylko do tego, co dzieje się na powierzchni ściany odwiertu i pomnożyć równanie (1) przez obwód otworu w ziemi:

$$q' = \lambda_{gruntu} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_{bh}} \cdot 2 \pi r_{bh} \text{ [W/m]} \quad (2)$$

Przewodność cieplna gruntu λ_{gruntu} , definiująca jego zdolność do transportu ciepła, jest przede wszystkim zależna od przewodności cieplnej materiału litego (minerałów lub ich kombinacji), przewodności cieplnej materiału wypełniającego pory oraz od wymiany ciepła na granicy cząsteczek stałych lub pomiędzy materiałem litym a materiałem wypełniającym pory [4]. Przewodzenie ciepła w skałach o dużej zwartości jest zależne praktycznie tylko i wyłącznie od materiału litego, natomiast na przepływ ciepła w formacjach luźnych (piaski, ropy, mady, żwiry, itp.), formacjach o małej zwartości, a także w skałach spękanych z pustymi przestrzeniami, istotny wpływ ma rodzaj materiału wypełniającego, którym najczęściej jest woda lub powietrze [4].

Wartości współczynnika przewodności cieplnej dla wybranych gruntów podano w tabeli 1. Należy przy tym pamiętać, że na terenie wykonywanej inwestycji, na różnych głębokościach mogą występować znaczne różnice w strukturze gruntu i jego rodzaju, tak więc przewodność cieplna może wahać się w sposób znaczny. Z tego względu w celu wyznaczenia jej średniej wartości najczęściej przeprowadza się **Test Odpowiedzi Termicznej (Thermal Response Test - TRT)**. Dla dokładnego oszacowania analizowanego parametru na poszczególnych głębokościach, wykonuje się natomiast dodatkowo **Rozłożony Test Reakcji Termicznej (Distributed Thermal Response Test - DTRT)**. Jego przykładowy wynik przedstawiono na rysunku 1, gdzie sondę podzielono na dwanaście równych sekcji, każda z nich odwzorowuje wzrost głębokości o 20 m. Pierwsze 10 m odwiertu zostało pominiętych w tym przykładzie w ten sposób, że sekcja nr 1 zawiera się między 10 a 30 m.

Przewodność cieplna gruntu bezpośrednio wpływa na ilość ciepła, jaka możliwa jest do pobrania/oddania z/do gruntu, a więc kształtuje tym samym wielkość instalacji dolnego źródła.

Im grunt lepiej przewodzi ciepło, tym mniejsza może być całkowita długość sond pionowych, im gorzej – tym ich długość musi być większa, aby uzyskać/odać taką samą ilość ciepła jak dla poprzedniego przypadku [6].

W literaturze pojawia się również odwrotność współczynnika przewodności cieplnej gruntu zwana jego oporem cieplnym R_{gruntu} . Parametr ten zostanie przedstawiony w punkcie 2.5.

1.2 Przejmowanie ciepła po stronie wody gruntowej/głębinyowej

Sonda pionowa, która wystawiona jest na działanie wody gruntowej bądź głębinyowej zazwyczaj pracuje bardziej efektywnie w trybie grzania, co oznacza, że zapewnia ona osiągnięcie odpowiednio wyższej temperatury płynu pośredniczącego. Jest to związane z wysoką przewodnością cieplną wody, a także z tym, że jej ruch może spowodować zwiększenie konwekcyjnego współczynnika przejmowania ciepła α (im wyższy jest jej przepływ objętościowy, tym wyższy współczynnik przejmowania ciepła, a więc lepsza wymiana ciepła). Dodatkowym atutem jest stała jej temperatura w przeciągu całego roku na pewnych głębokościach pod poziomem gruntu.

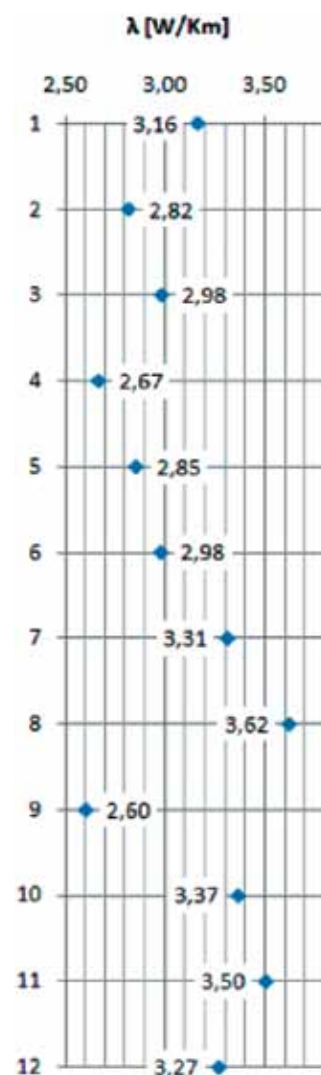
Gdy rozpatrywany jest tryb chłodzenia, wówczas woda gruntowa może niestety powodować obniżenie wydajności chłodniczej pompy [1], natomiast wpływ wody głębinyowej może być tak samo pozytywny jak opisany w poprzednim akapicie.

W hydrogeologii proces przejmowania ciepła od wody gruntowej następuje w wyniku konwekcji, czyli naturalnego, pionowego jej ruchu związanego ze zmianą gęstości powodowaną występowaniem różnicy temperatur. Natomiast przejmowanie ciepła od wody głębinyowej ma miejsce podczas poziomego jej ruchu, powstałego dzięki różnicy ciśnień w warstwie wodonośnej, zwanego adwekcją [4].

Konwekcja wody gruntowej występuje najczęściej w odwiertach wykonanych w skałach lub innych formacjach zwartych, gdy umieszczona w gruncie sonda pionowa nie zostaje

w żaden sposób zabezpieczona (zacementowana), tak więc nie został użyty materiał wypełniający, zaś woda gruntowa bezpośrednio omywa zewnętrzną powierzchnię rur wymiennika. Adwekcja ma miejsce w lokalizacjach występowania wielu warstw wodonośnych, kiedy to woda głębinyowa omiata zewnętrzną powierzchnię rur, jeżeli te wystawione są na jej działania.

Mechanizm przejmowania ciepła od wody gruntowej/głębinyowej jest procesem bardzo złożonym, dlatego możliwość przeprowadzania obliczeń teoretycznych jest znacznie ograniczona. Obliczenia takie mają sens tylko wówczas, gdy są prowadzone dla określonych lokalizacji, zapewniających wszystkie potrzebne informacje, takie jak właściwości płynu,



Rys. 1 Różnica przewodności cieplnej gruntu w głąb jego głębokości; Wyniki otrzymane za pomocą testu DTRT [1]

Tabela 1 Wartości współczynnika przewodności cieplnej dla wybranych rodzajów gruntu [4]

Typ formacji	Rodzaj gruntu	$\lambda_{\text{gruntu}} [W/mK]$	
		wartości możliwe	wartość zalecana
Formacje luźne	glina/mułek, suchy	0,4-1,0	0,5
	glina/mułek, nasycony wodą	0,9-2,3	1,7
	piach, suchy	0,3-0,8	0,4
	piach, nasycony wodą	1,5-4,0	2,4
	żwir, suchy	0,4-0,5	0,4
	żwir, nasycony wodą	1,6-2,0	1,8
Skały osadowe (sedymentacyjne)	iłowiec, mułowiec	1,1-3,5	2,2
	piaskowiec	1,3-5,1	2,3
	wapień	2,5-4,0	2,8
Skały magmowe	bazalt	1,3-2,3	1,7
	granit	2,1-4,1	3,4
Skały metamorficzne	łupki gliniaste	1,5-2,6	2,1
	marmur	1,3-3,1	2,5
	kwarcyt	5,0-6,0	5,5

jego natężenie przepływu i inne parametry hydrauliczne, właściwości materiału litego oraz wielkość porów, i ich charakterystyka [4].

1.3 Przejmowanie ciepła po stronie płynu pośredniczącego cyrkulującego w sondzie

Przepływ ciepła, który ma miejsce wewnątrz rur wymiennika pionowego jest rozważany jako konwekcja i określa on ile ciepła zostało zaabsorbowane przez cyrkulujący płyn pośredniczący z wewnętrznej powierzchni rury. Konwekcję w wymienniku pionowym przedstawia się za pomocą podstawowego równania konwekcyjnej wymiany ciepła w postaci:

$$q = \alpha \Delta T = \alpha (T_{ips} - T_m) [W/m^2] \quad (3)$$

gdzie:

- q – konwekcyjny strumień ciepła (moc cieplna na jednostkę powierzchni) wyrażony w $[W/m^2]$,
- α – współczynnik przejmowania ciepła w $[W/m^2K]$,
- T_{ips} – temperatura wewnętrznej powierzchni rury w $[^{\circ}K]$,
- T_m – średnia temperatura płynu rozpatrywana w przekroju poprzecznym wymiennika w $[^{\circ}K]$.

Równanie (3) jest bardziej użyteczne, gdy wykona się podobne jego przekształcenie jak dla równania (2), tzn. pomnoży przez obwód rozważanego otworu:

$$q' = \alpha (T_{ips} - T_m) \cdot 2 \pi r_{rury} [W/m] \quad (4)$$

W wyniku czego otrzymujemy ilość ciepła, która jest możliwa do przejścia przez nośnik ciepła dolnego źródła. Z powyższego wzoru można wywnioskować, że jednym ze sposobów na zwiększenie q' , a więc uzyskiwanej mocy cieplnej wyrażonej w $[W/m]$ jest oddziaływanie na współczynnik przejmowania ciepła α , poprzez zmianę (wzrost) prędkości przepływu płynu pośredniczącego. Większe natężenie przepływu tego płynu powoduje obniżenie oporu cieplnego mającego miejsce pomiędzy płynem, a powierzchnią wewnętrzną rury (punkt 2.2), który definiuje wpływ oddziaływania rodzaju przepływu w warstwie granicznej (przyściennej). Dodatkowo, negatywny i wielce niepożądany **efekt bocznej wymiany ciepła (Thermal Shunt Effect)**, czyli zjawisko w którym płyn zatłaczany do otworu odbiera ciepło od płynu już ogrzanego i go opuszczającego, jest tym mniejszy, im większy jest przepływ nośnika ciepła. Należy jednak pamiętać, że wzrost natężenia objętościowego tego płynu powoduje wzrost oporów przepływu, a tym samym zwiększa pracę pompy cyrkulacyjnej, a zatem zużycie przez nią energii elektrycznej.

1.4 Praktyczne zależności dla stanu nieustalonego

Od strony praktycznej, gdy rozważany jest stan nieustalony (przejściowy), ilość ciepła pobierana z gruntu oraz

średnia temperatura płynu pośredniczącego w sondzie są wartościami zawsze zależnymi od czasu. Dla zadanej wartości jednostkowej ilości ciepła do pobrania z jednego metra odwiertu oraz przy znanej konstrukcji wymiennika i jego parametrów hydraulicznych (określonych przez całkowity **opór cieplny sondy pionowej (Borehole Thermal Resistance) R_{bh}** , który zostanie omówiony w punkcie 2.6), możliwe jest zdefiniowanie różnicy temperatur między temperaturą gruntu a średnią temperaturą płynu pośredniczącego [1]:

$$T_{\text{gruntu}}(0) - T_f(t) = q' \cdot R_{bh} + q' \cdot f(t) \quad (5)$$

gdzie:

- $T_{\text{gruntu}}(0)$ – temperatura gruntu w czasie początkowym $t = 0$ w $[^{\circ}K]$,
- $T_f(t)$ – średnia temperatura płynu pośredniczącego jako funkcja zależna od czasu w $[^{\circ}K]$,
- q' – zadana wartość ilości ciepła do pobrania na jednostkę długości wyrażona w $[W/m]$,
- R_{bh} – opór cieplny sondy wyrażony w $[mK/W]$,
- $f(t)$ – funkcja określająca zmienność wartości oporu cieplnego gruntu w czasie.

Funkcja będąca zmienną w czasie, definiująca, w jaki sposób grunt odpowie na zadaną jednostkową moc ciepl-

ną q' jest w dużej mierze zależnością jego parametrów cieplnych, takich jak przewodność λ_{gruntu} i dyfuzyjność cieplna α :

$$f(t) = \frac{1}{4 \pi \lambda_{gruntu}} \left(\ln \left(\frac{4 \alpha t}{r_{bh}^2} \right) - \gamma \right) \quad (6)$$

gdzie:

- λ_{gruntu} – przewodność cieplna gruntu wyrażona w $[W/mK]$,
- α – dyfuzyjność cieplna gruntu wyrażona w $[m^2/s]$,
- t – czas wyrażony w $[s]$,
- r_{bh} – średnica odwiertu w $[m]$,
- γ – stała Eulera $[0,5772\dots]$.

2. OPORY CIEPLNE WYSTĘPUJĄCE PODCZAS PRACY WYMIENNIKA PIONOWEGO

1.1 Całkowity opór cieplny na drodze od gruntu do płynu pośredniczącego

Jest oczywiste, że opór cieplny występuje wszędzie tam, gdzie pojawia się przepływ bądź wymiana ciepła. Rozpatrując przypadek sondy pionowej, całkowity opór cieplny na drodze od gruntu do płynu pośredniczącego R_T składa się z oporu cieplnego pomiędzy tym płynem a powierzchnią rury R_f , oporu cieplnego samej rury (jako materiału przewodzącego ciepło) R_{rury} , całkowitego oporu materiału cementującego, wypełniającego odwiert R_{mw} oraz oporu cieplnego gruntu R_{gruntu} (Rys. 2):

$$R_T = R_f + R_{rury} + R_{mw} + R_{gruntu} \quad [K m/W] \quad (7)$$

W związku z tym, że projektant sondy pionowej ma możliwość oddziaływania na trzy z czterech wymienionych zmiennych w powyższym równaniu, łatwo można domyśleć się, jak ważny jest odpowiedni projekt konstrukcyjny wymiennika i jak ważne jest przywiązywanie uwagi do wszystkich szczegółów, takich jak: dokładne i wolne wpompowanie materiału cementującego w wolną przestrzeń w wykonanej sondzie pionowej, wybór odpowiedniego materiału wypełniającego, czy wreszcie prędkość płynu pośredniczącego.

2.2 Opór cieplny pomiędzy płynem a wewnętrzną ścianką wymiennika

R_f
Opór cieplny pomiędzy płynem a wewnętrzną ścianką wymiennika jest miarą konwekcyjnego przepływu ciepła pomiędzy nimi. Może być on przedstawiony w sytuacji, w której weźmiemy pod uwagę model cylindryczny w warunkach stanu ustalonego, w którym przepływ ciepła następuje na powierzchni cylindra:

$$R_f = \frac{1}{\alpha_f P_{rury}} = \frac{1}{\alpha_f 2 \pi r_{rury}} \quad [K m/W] \quad (8)$$

gdzie:

- R_f – opór cieplny pomiędzy

płynem a wewnętrzną ścianką rury wymiennika wyrażony w $[Km/W]$,

P_{rury} – obwód rury wyrażony w $[m]$,

α_f – współczynnik przejmowania ciepła dla płynu pośredniczącego wyrażony w $[W/m^2K]$,

r_{rury} – promień wewnętrzny rury wyrażony w $[m]$.

Obecność konwekcyjnego współczynnika przejmowania ciepła we wzorze (8) określa zależność między oporem cieplnym i prędkością przepływu płynu pośredniczącego w rurze. Jak wspomniano w punkcie 1.3, aby obniżyć opór cieplny pomiędzy płynem a rurą należy zwiększyć objętościowe natężenie przepływu nośnika ciepła, co automatycznie spowoduje wzrost wartości liczby Nusselta, a w efekcie zapewni wyższy współczynnik α_{pt} i mniejszy opór cieplny.

2.3 Opór cieplny rury pionowego wymiennika R_{rury}

Model obliczeniowy oporu cieplnego rury jest oparty na tych samych założeniach i modelu cylindrycznym, jak równanie (8):

$$R_{rury} = \frac{\ln(r_{zew rury}/r_{rury})}{2 \pi \lambda_{rury}} \quad [K m/W] \quad (9)$$

gdzie:

R_{rury} – opór cieplny rury wyrażony w $[Km/W]$,

λ_{rury} – przewodność cieplna rury wyrażona w $[W/mK]$,

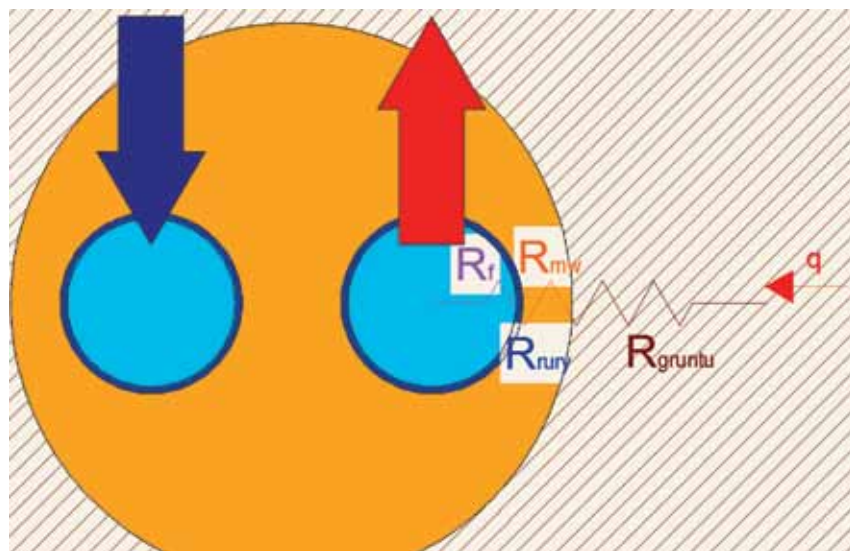
$r_{zew rury}$ – średnica zewnętrzna rury wyrażona w $[m]$,

r_{rury} – średnica wewnętrzna rury wyrażona w $[m]$.

W równaniu (9) człon $(r_{zew rury}/r_{rury})$ określa stosunek pomiędzy zewnętrzną i wewnętrzną średnicą rury. W związku z tym można wnioskować, że na wartość oporu cieplnego rury R_{rury} szczególny wpływ ma jej geometria oraz właściwości cieplne zastosowanego materiału.

2.4 Opór cieplny materiału wypełniającego odwiert R_{mw}

Całkowity opór cieplny materiału



Rys. 2 Opory cieplne występujące podczas pracy wymiennika pionowego [oprac. własne]

cementującego odwiert jest złożony z oporu cieplnego samego materiału R_{mw} kontaktowego oporu cieplnego pomiędzy rurami wymiennika a materiałem cementującym $R_{kontakt 1}$ i kontaktowego oporu cieplnego pomiędzy ścianą odwiertu a materiałem cementującym $R_{kontakt 2}$:

$$R_{mw} = R_{kontakt 1} + R_{mw} + R_{kontakt 2} [K m/W] \quad (10)$$

Model i założenia do obliczenia kontaktowych oporów cieplnych są takie same, jak dla równania (9):

$$R_{kontakt} = \frac{\ln(r_{kontakt} + \delta_{przestrzeń}/r_{kontakt})}{2 \pi \lambda_{przestrzeń}} [K m/W] \quad (11)$$

gdzie:

$R_{kontakt}$ – kontaktowy opór cieplny na styku materiału wypełniającego odwiert wyrażony w $[K m/W]$,

$\lambda_{przestrzeń}$ – przewodność cieplna możliwej wolnej przestrzeni i materiału ją wypełniającego wyrażona w $[W/mK]$,

$r_{kontakt}$ – średnica na której zachodzi kontaktowy opór cieplny pomiędzy dwoma powierzchniami, wyrażona w $[m]$,

$\delta_{przestrzeń}$ – możliwa szerokość przestrzeni pomiędzy dwoma powierzchniami w $[m]$.

Dla wody wypełniającej odwiert, tzn. dla najbardziej popularnej sytuacji w Szwecji, gdy otwór nie jest zapieczętowany przyjmuje się, że obydwa opory kontaktowe są równe zero. Gdy materiał cementujący został wtłoczony do wolnej przestrzeni odwiertu w sposób wolny i dokładny przyjmuje się, że obydwa opory kontaktowe sumarycznie wynoszą 0 lub 0,01 Km/W . Jeżeli materiał został wtłoczony w sposób niestaranny, wówczas opór kontaktowy wynosi zazwyczaj 0,02 do 0,03 Km/W [3].

2.5 Opór cieplny gruntu R_{gruntu}

Opór cieplny gruntu R_{gruntu} jest najbardziej złożonym i skomplikowanym do wyznaczenia rodzajem opo-

ru, w związku z tym, że jego wartość jest zmienna w czasie. Dla stanu nieustalonego, całkowity opór cieplny R_{rp} a tym samym i wydajność sondy pionowej o konstrukcji charakteryzującej się niskim oporem cieplnym R_{bh} będzie zależeć w większości od oporu cieplnego gruntu i jego odpowiedzi po danym czasie pracy urządzenia.

Równanie cylindryczne na opór cieplny gruntu w warunkach ustalonych jest funkcją przewodności cieplnej:

$$R_{gruntu} = \frac{\ln(r_{gruntu}/r_{bh})}{2 \pi \lambda_{gruntu}} [K m/W] \quad (12)$$

gdzie:

R_{gruntu} – opór cieplny gruntu wyrażony w $[K m/W]$,

r_{bh} – promień odwiertu wyrażony w $[m]$,

r_{gruntu} – odległość osi pionowej odwiertu do punktu, w którym grunt charakteryzuje się niezmienną wartością temperatury, wyrażony jest w $[m]$,

λ_{gruntu} – przewodność cieplna gruntu wyrażona w $[W/mK]$.

W powyższym równaniu człon r_{gruntu}/r_{bh} jest stosunkiem pomiędzy dwoma promieniami tworzącymi dwa okręgi, jeden wewnątrz drugiego.

2.6 Opór cieplny sondy R_{bh}

Trzy scharakteryzowane opory cieplne R_f , R_{rury} i R_{mw} w sumie składają się na całkowity opór cieplny R_{bh} , zwany **oporem cieplnym sondy**, określający opór, na który wpływ może mieć projektant konstrukcji wymiennika pionowego lub osoba go dobierająca:

$$R_{bh} = R_f + R_{rury} + R_{mw} [K m/W] \quad (13)$$

Całkowity opór cieplny odwiertowego wymiennika ciepła może być również wyrażony jako funkcja średnich temperatur krążącego płynu pośredniczącego T_f i ściany odwiertu T_{bh} oraz ilości przekazywanego ciepła q' (uzyskanego z gruntu lub do niego oddanego), jak zostało to zaproponowane przez G. Hellström'a w 1991 roku [5]:

$$R_{bh} = \frac{T_f - T_{bh}}{q'} [K m/W] \quad (14)$$

gdzie:

R_{bh} – całkowity opór cieplny pionowej sondy gruntowej wyrażony w $[K m/W]$,

T_f – średnia temperatura płynu pośredniczącego w sondzie ciepła wyrażona w $[^{\circ}K]$,

T_{bh} – średnia temperatura ściany odwiertu sondy ciepła wyrażona w $[^{\circ}K]$,

q' – ilość ciepła oddana do gruntu w $[W/m]$.

Na podstawie wzoru (14) można wnioskować, że im niższy jest opór cieplny wymiennika pionowego R_{bh} (tzn. im lepsza jest jego konstrukcja), tym dla zadanej jednostkowej mocy cieplnej q' straty w przekazywaniu ciepła na drodze od płynu pośredniczącego do ściany odwiertu będą mniejsze, co będzie bezpośrednio wyrażone niższą temperaturą tego płynu T_f .

Wzór (14) jest właściwy dla warunków przekazywania ciepła do gruntu, tzn. chłodzenia płynu pośredniczącego, ponieważ został opracowany do otrzymywania wyników z **Testu Reakcji Termicznej (TRT)**, w którym przekazywana jest moc cieplna do płynu najczęściej przez grzałkę elektryczną i w którym bada się, w jakim stopniu dany płyn zostanie ochłodzony przez grunt. Dla warunków ogrzewania płynu od gruntu wzór ten przyjmie następującą postać:

$$R_{bh} = \frac{T_{bh} - T_f}{q'} [K m/W] \quad (15)$$

gdzie:

R_{bh} – całkowity opór cieplny pionowej sondy gruntowej wyrażony w $[K m/W]$,

T_f – średnia temperatura płynu pośredniczącego w sondzie ciepła wyrażona w $[^{\circ}K]$,

T_{bh} – średnia temperatura ściany odwiertu sondy ciepła wyrażona w $[^{\circ}K]$,

q' – ilość ciepła pobrana z gruntu w $[W/m]$.

Równanie (13), z którego postać bierze równanie (14) nie jest w rzeczywistości możliwe do rozwiązania w sposób teoretyczny bez znacznych założeń upraszczających, z powodu braku informacji o temperaturze ściany odwiertu, a tym samym o temperaturze płynu pośredniczącego. W związku z tym, jeżeli konieczna jest znajomość oporu R_{bh} jest on najczęściej wyznaczany z dużym przybliżeniem za pomocą wzoru (13) lub dokładniej w sposób eksperymentalny, tzn. testem TRT lub testem DTRT.

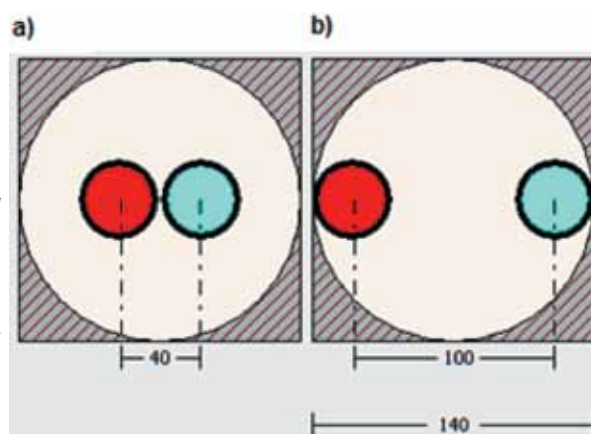
2.7 Znaczenie praktyczne oporu cieplnego sondy

Rozpatrzmy teraz dwa przypadki praktycznych wartości oporu cieplnego sondy i jego wpływu na efektywność jej działania. Pierwszym z nich będzie opór cieplny charakterystyczny dla wymiennika typu „U-rura”, gdy ten ma obie rury złączone ze sobą wewnątrz otworu (Rys. 3a). Drugi przypadek dotyczy będzie sytuacji, gdy rury te znajdują się po przeciwnych stronach odwiertu (Rys. 3b). Opór cieplny sondy R_{bh} dla danego umiejscowienia rur jest równy 0,26 Km/W dla rur w środku i 0,11 Km/W dla rur osobno, w warunkach gdy odwiert wypełnione są wodą, zaś objęściowy przepływ płynu pośredniczącego jest równy 0,5 l/s [2]. Przewodność cieplna wody wypełniającej odwiert została przyjęta na poziomie 0,6 W/mK, natomiast kontaktowy opór cieplny zarówno pomiędzy rurami i wodą, a także pomiędzy wodą a ścianą odwiertu jest równy 0. Odwiert ma średnicę 140 mm. Sonda typu „U-rura” zbudowana jest z dwóch rur polietylenowych o wymiarach 40 x 2,4 mm. Płyn pośredniczący krążący w sondzie pionowej, to 16 % roztwór wodny etanolu, którego wybrane właściwości zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2 Właściwości roztworu wodnego etanolu [EED]

Przewodność cieplna [W/mK]	0,52
Pojemność cieplna właściwa [J/kgK]	3900
Gęstość [kg/m ³]	1020
Lepekność [kg/ms]	0,0042
Temperatura zamarzania [°C]	-6

Rys. 3 Sonda typu „U” w różnych konfiguracjach umiejscowienia rur w jej wnętrzu [EED]. Po lewej stronie rury złączone razem w środku, po prawej rury osobno

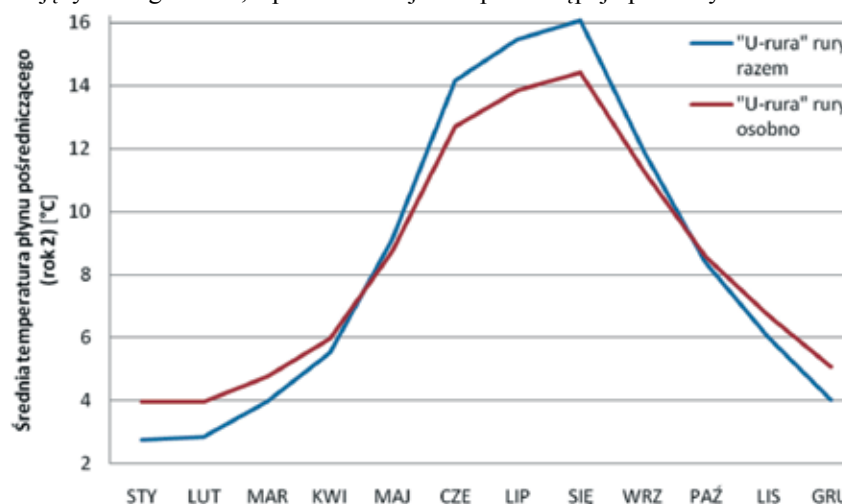


Rys. 4 Widok budynku obrotanego do analizy [3]

Porównanie dwóch przypadków zostało wykonane w programie symulacyjnym EED (Energy Earth Designer) i jest ono częścią pracy magisterskiej wykonanej w KTH Royal Institute of Technology w Szwecji [6]. Symulacje przeprowadzono w oparciu o wybrany budynek (Rys. 4) i jego profil zapotrzebowania na ciepło oraz chłód (tabela 3 i 4) dla danej jego lokalizacji, którą w tym przypadku był Gdańsk. Osoby zainteresowane większą liczbą szczegółów odsyłam do pracy w języku angielskim, opublikowanej

w formie otwartej, dostępnej w bazie szwedzkiej uczelni KTH Publication Database DiVA na stronie <http://kth.diva-portal.org/smash/search.jsf>.

Po wprowadzeniu wszystkich koniecznych parametrów, program symulacyjny oblicza przebieg średniej temperatury płynu pośredniczącego w okresie zadanych 25 lat. Ponieważ ilość ciepła, która do zespołu sond zostaje oddana z budynku jest większa, od ilości ciepła, które zostaje z gruntu pobrane, po drugim roku pracy pompy ciepła następuje powolny wzrost tem-



Rys. 5 Średnia temperatura płynu pośredniczącego w sondzie pionowej w drugim roku użytkowania gruntowej pompy ciepła w zależności od miesiąca [6]

Tabela 3 Zapotrzebowanie na ciepło i chłód dla przyjętego do analizy budynku [2]

Rodzaj zapotrzebowania:	Ilość [kW]	Roczne zapotrzebowanie energii [MWh]
ciepło (zima)	410	925
ciepło (lato)	160	50
chłód (zima)	90	190
chłód (lato)	330	305

Tabela 4 Profil procentowego zapotrzebowania na ciepło i chłód dla przyjętego do analizy obiektu w kolejnych miesiącach roku [7]

Rodzaj zapotrzebowania	Sty	Lut	Mar	Kwi	Maj	Czer	Lip	Sie	Wrz	Paź	Lis	Gru	Rocznie
Ciepło	14,7	14	11,9	9,4	6,1	1,7	1,7	1,7	5,8	8,3	11,1	13,6	100
Chłód	6,5	6,5	6,5	6,5	8,5	11,1	12,2	12,4	9,8	7	6,5	6,5	100

peratury płynu. Aby uniezależnić wyniki symulacji od opisanego zjawiska, zostaną one przedstawione tylko dla roku drugiego użytkowania urządzenia.

Jak można zauważyć z rysunku 5, różnice w temperaturach nośnika ciepła dla dwóch przeanalizowanych przypadków są znaczne. Dużo bardziej korzystną sytuacją jest przypadek rur wymiennika ulokowanych osobno, niż razem, co bezpośrednio przekłada się na różnice w wartości oporów cieplnych sond R_{bh} użytych do symulacji. Jest tak z tego względu, że bliższe umiejscowienie rur względem siebie, intensyfikuje negatywny efekt bocznej wymiany ciepła. Wskazaniem jest więc zachowanie możliwie największej odległości rur wymiennika względem siebie bądź izolacja cieplna pomiędzy „nogami” sondy. Ponieważ ze względów konstrukcyjnych, niemożliwym jest zaizolowanie wymiennika typu „U-rura”, konstrukcja ta charakteryzuje się zazwyczaj najniższą wydajnością spośród znanych typów pionowych sond gruntowych.

Podsumowując, można stwierdzić, że im lepsza i dokładniej wykonana instalacja sondy pionowej oraz im bardziej efektywna konstrukcja samego wymiennika, charakteryzująca się większym ograniczeniem wymiany ciepła pomiędzy płynem wytlaczanym a wtłaczanym, tym niższy opór cieplny sondy R_{bh} , a więc tym wyższa temperatura płynu pośredniczącego po opuszczeniu otworu w ziemi, bardziej zbliżona do temperatury ściany odwiertu/gruntu, wyższy współczynnik COP sprężarkowej pompy ciepła i w końcu niższe koszty jej użytkowania.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Acuña, J. (2010). *Improvements of U-pipe Borehole Heat Exchanger*. Licentiate Thesis in Energy Technology. Stockholm: KTH, Sweden;
- [2] Acuña, J. (2011). Personal contact: jose.acuna@energy.kth.se;

- [3] BLOCON (2008). *EED 3.0 Earth Energy Designer Manual*. <http://www.buildingphysics.com/>;
- [4] GEOTRAINET (2011). *Geotrainet Training Manual for Designers of Shallow Geothermal Systems*. Brussels;
- [5] Hellström, G. (1991). *GROUND HEAT STORAGE, Thermal Analyses of Duct Storage Systems*. Doctoral Thesis. Lund Institute of Technology. Lund, Sweden;
- [6] Wajman, M. (2011). *Technical and Economical Analysis of Ground Source Heat Pump Systems with BHE in Poland*. Master of Science Thesis in Energy Technology. Stockholm: KTH, Sweden;
- [7] Wajman, M. (2011). *Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania w systemach ogrzewania i chłodzenia sprężarkowych pomp ciepła, w których źródłem ciepła jest pionowy kolektor gruntowy, w warunkach Polski i Szwecji*. Praca dyplomowa magisterska. Gdańsk: Politechnika Gdańska;

