

ANNA JUREK
Kielce University of Technology
e-mail: anna.jurek85@o2.pl

THE INFLUENCE OF GROUT USED IN BOREHOLE VERTICAL GROUND HEAT EXCHANGERS ON HEAT FLUX FROM THE GROUND

Abstract

This paper describes a process for the non-stationary heat transfer that occurs between the vertical ground heat exchanger, surrounded by grout and the surrounding ground. Mathematical model of this phenomenon and its exemplary solution using the method of elementary balances were presented. Numerical calculations were performed using Mathcad. As a result, the set temperature field is formed in the wall of the heat exchanger, in the grout and also in the ground surrounding the U-tube and the amount of heat extracted from ground in the case of not including the occurrence of filling and using a variety of commonly used grouts.

Keywords: vertical ground heat exchanger, heat transfer, non-stationary state, temperature field, the method of elementary balances, grout

1. Introduction

In Polish conditions, according to the Regulation of the Minister of Environment of 15 December 2011 on detailed requirements for other geological documentation; § 6; point 1.f, it is necessary to fulfill requirement for isolation of aquifers for holes drilled in order to use the heat from the Earth [1]. Therefore, in the technologies of the vertical ground heat exchangers space between the walls of the U-tubes and the ground is filled with a suitable material along its entire length. Such a seal hole is aimed at not only separation of drilled aquifers, but also to prevent the entry of surface contamination and protect the U-tube from possible damage. In addition, the filler material should be selected so that its presence does not change for the worse the heat transfer, and all the ingredients used in it were not harmful to the soil and water environment. Figure 1 shows a schematic embodiment of a typical geothermal heat exchanger.

The presence of the filler material has an impact on the process of heat exchange between the U-tube and the surrounding soil. During the operation of the groundwater heat pump in heating mode, a factor that circulates in the U-tube extracts heat from the surrounding soil encountering additional thermal resistance caused by the presence of an additional layer, which is a grout.

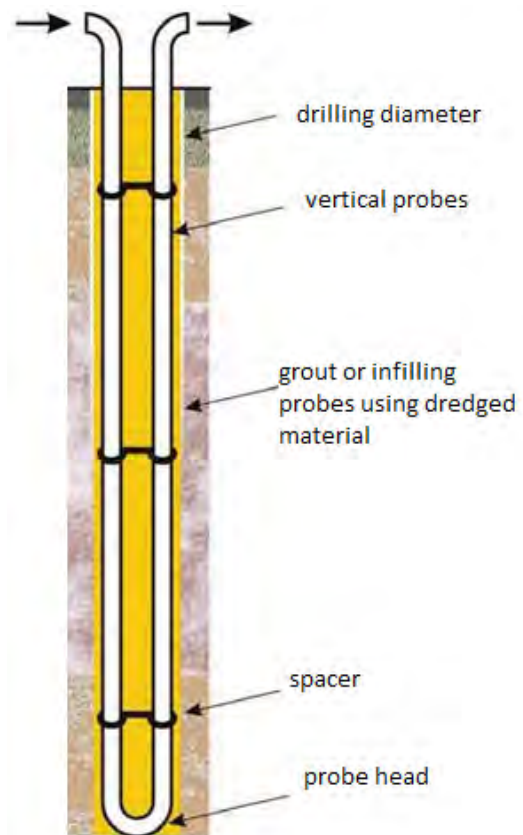


Fig. 1. Typical U-tube [2]

During this process, in the initial period of operation, there is a significant decrease of the natural, undisturbed ground temperature under consideration for a given length of the exchanger. The duration of such non-stationary conditions may be different. Only after a few decades of the operation of the heat pump stationary conditions occur. During the first years of the geothermal heat pump there is a primarily mechanism of heat conduction in the radial direction. After some time a three-dimensional process appears [3].

This article presents a computational model of vertical ground heat exchanger surrounded by the grout for non-stationary conditions. The heat transfer using a cylindrical model is shown, which was established in order to facilitate a one-dimensional heat flow (only in the direction to r). Between the ground heat exchanger wall and the surrounding grout there is the heat conduction, as well as between the grout and the surrounding soil while the possible movement of deep water or groundwater is omitted. In order to determine the heat flux, to raise the potential from the borehole, the case should be considered only limited to what is happening on the surface of the borehole wall by taking the boundary condition of the third type, the convective heat transfer between the wall of the heat exchanger and the fluid which fills it. The heat flux taken from the ground and the temperature distribution in the wall of the heat exchanger, the grout and the surrounding ground always depends on the time, in the non-stationary processes.

2. A mathematical model of the heat transfer in the vertical ground heat exchanger surrounded by the grout

Unsteady one-dimensional heat conduction through the layer of soil, soil density, heat capacity and thermal conductivity of the ground, grout and the material from which the wall is made of the heat exchanger were found. The solution to the equations of the heat exchange model using the method of elementary balances was obtained. The test area was divided into geometric elements, for which the energy balance sheet based on the following assumptions was prepared:

- The temperature of the surrounding medium is constant and unchanging $T_k = \text{const}$.
- The temperature of the transfer medium is always constant and unchanging $T_f = \text{const}$.
- A one-dimensional temperature field \rightarrow one-dimensional heat movement in the direction of r .
- Heat is supplied from the outer surface through convection with a constant thermal diffusion coefficient $\alpha = \text{const}$.

- The initial temperature of the system is equal to the initial temperature of the soil.
- The constant parameters of the wall, grout and ground are known (c_p, ρ, λ).
- There are no internal heat sources.
- Each element is represented by a node that is located in the center of gravity of the element, which focuses the whole heat capacity of the element in question.
- The whole the area in question is symmetrical about an axis which is located in the core of the transfer medium.

Thermal processes occurring in the area under consideration describes a system of partial differential equations of the form:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_g \cdot (T_1 - T_f) = \lambda_r \cdot \frac{\partial T(r)}{\partial r} \Big|_{r=r_1} \\ q_1 \Big|_{r=\frac{d_w}{2}} = q_2 \Big|_{r=\frac{d_z}{2}} \\ T_1 \Big|_{r=\frac{d_w}{2}} = T_2 \Big|_{r=\frac{d_z}{2}} \\ \lambda_r \cdot \frac{\partial T(r)}{\partial r} \Big|_{r=\frac{d_z}{2}} = \lambda_{wyp} \cdot \frac{\partial T(r)}{\partial r} \Big|_{r=\frac{d_{wyp}}{2}} \\ q_2 \Big|_{r=\frac{d_z}{2}} = q_3 \Big|_{r=\frac{d_{wyp}}{2}} \\ T_2 \Big|_{r=\frac{d_z}{2}} = T_3 \Big|_{r=\frac{d_{wyp}}{2}} \\ c_{p_{gr}} \cdot \rho_{gr} \cdot \frac{\partial T_2(r)}{\partial \tau} = \lambda_{gr} \cdot \frac{\partial^2 T_2(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_2(r)}{\partial r} \Big|_{r_2 > r > r_k} \\ T_7 \Big|_{r=\frac{D}{2}} = T_k = \text{const} \Big|_{r=r_7} \end{array} \right.$$

where:

- α – thermal diffusion coefficient, $W/(m^2 \cdot K)$,
- λ – thermal conductivity coefficient, $W/(m \cdot K)$,
- ρ – density, kg/m^3 ,
- c_p – specific heat capacity, $J/(kg \cdot K)$,
- q – heat transfer rate per unit depth, (W/m) ,
- T – temperature, $(^\circ C)$,
- r – radius, (m) ,
- $\Delta \tau$ – time (s) .

For the calculation the following diagram of ground, for which the surrogate parameters were determined:

Calculations are performed for several different types of filling compounds. Posted following table shows the types of fillings used and their ability to transport heat (Table 2) [4].

Table 1. Soil parameters

The number of layers	The depth [m p.p.t.]	The height of the layer [m]	The lithological description of the layers	Other studies hydrogeological	The thermal conductivity coefficient [W/mK]	Specific heat capacity [MJ/m ³ K]	Density [kg/m ³]	The Equivalent thermal conductivity coefficient [W/mK]	The Equivalent specific heat capacity [J/kgK]	The Equivalent density [kg/m ³]
1	0.2	0.2	sandy soil	to a depth of 28.0 m p.p.t. lack of inflow of groundwater into the hole; it was necessary to refill water for drilling	0.4	1.3	2600	1.303	1024.93	2035.51
2	2.8	2.6	clayey land bulk		0.4	1.6	1800			
3	4	1.2	clay concise, brown		0.5	1.5	1200			
4	8	4	clay silt, light yellow		2.2	2.3	2500			
5	14	6	clay with tiny boulders, brown		0.5	1.5	1200			
6	15.5	1.5	sandy loam, yellowish brown		2.2	2.3	2500			
7	22	6.5	clay with tiny boulders, brown		0.5	1.5	1200			
8	28	6	clay with rock crumbs, yellowish brown		0.5	1.5	1200			
9	30	2	rubble limestone with clay, yellow-brown		2.8	2.3	2600			
10	46	16	dolomitic limestones, compact, slightly cracked		2.8	2.3	2600			
11	72	26	dolomites almost black, very hard, compact		3.3	2.7	2600			
12	86	14	dolomites dark gray, hard, brittle, highly cracked		3.3	2.7	2600			
13	88	2	shale, ashen		2.15	0.86	2000			
14	90	2	dark gray limestone, hard		2.8	2.3	2600			

Table 2. Thermal conductivity grouts to the boreholes [4]

Type of the grout	Thermal conductivity λ [W/(mK)]	
	The minimum value	The maximum value
bentonite (20%)	0.73	0.75
bentonite (30%)	0.74	0.74
cement	0.7	0.78
20% bentonite, 40% sand	1.48	1.48
30% bentonite, 30% sand	1.2	1.3
concrete (50% sand)	2.1	2.8

3. Example of calculation

Numerical calculations were done in Mathcad, using the following data. The average temperature of the transfer medium (ethylene glycol – 38%) in the heat exchanger is $T_f = -3^{\circ}\text{C}$, and its parameters are: $C_{PG} = 3430 \text{ J}/(\text{kgK})$, $\rho_g = 1055 \text{ kg}/\text{m}^3$, and the heat transfer coefficient determined for ethylene glycol (38%) is $\alpha = 6970 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Soil properties were adopted in accordance with Table 1, the properties of the fill material taken from Table 2, and its diameter is $d_{wyp} = 0.22 \text{ m}$. Applied heat exchanger with dimensions

$d_w = 0.049 \text{ m}$ and $d = 0.0527 \text{ m}$ is made of a material having a thermal conductivity coefficient equal to $\lambda_r = 0.51 \text{ W}/\text{mK}$ (HDPE pipe). It was assumed also that the constant undisturbed ground temperature at a distance $r_7 = 2.5 \text{ m}$ is $T_k = T_z = 8^{\circ}\text{C}$. In the accompanying figure below the results of simulations performed are presented. Figure 2 illustrates the changes in temperature in each node model after a month of work of the ground heat exchanger, without filling, and using a different filler materials.

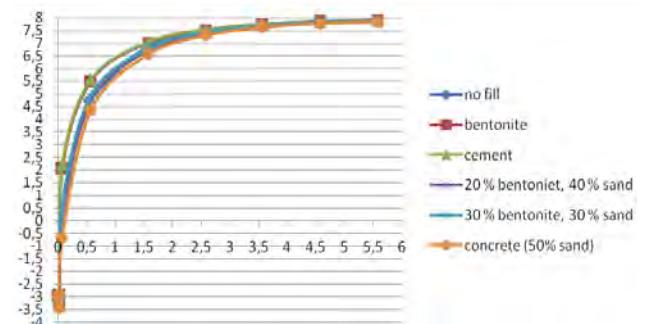


Fig. 2. Temperature distribution around a single U-tube

On the other hand Figure 3 shows the amount of heat taken from the ground by the U-tube after a month it work for all previously mentioned cases.

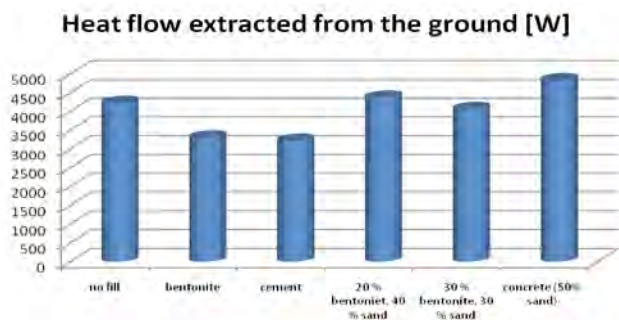


Fig. 3 Heat flow extracted from the ground

4. Conclusions

Adopted computational model allows for not only in-depth knowledge of the complex processes of heat transfer around a single U-tube surrounded by a grout, but also allows selecting parameters of individual elements of the model to optimize the operation of the heat pump itself. Simulation can be made by, for example the selection of the transfer medium (c_{pg} , ρ_g , λ_{gr}) or the appropriate speed of flow, but also a filler material with different physical properties (c_{pwyp} , ρ_{wyp} , λ_{wyp}) referring them to the ground conditions with

which we are dealing (c_{pgr} , ρ_{gr} , λ_{gr}). From the analysis it is shown that the choice of filler material used in borehole vertical ground heat exchanger is extremely important for its later work, because the results of the calculations show that it can have both positive and negative impact on the size of the input heat flux from the ground. Determination of the optimal operating conditions of the ground heat exchanger is extremely important at the design stage, hence the conclusion that a clear understanding of processes occurring around him is essential.

References

- [1] *Wytyczne projektowania, wykonania i odbioru instalacji z pompami ciepła. Część 1 Dolne źródła do pomp ciepła*, Polska Organizacja Rozwoju Technologii Pomp Ciepła, Kraków 2013.
- [2] Białko B., Królicki Z., Sendler S., Zajączkowski B.: *Analiza modyfikacji konstrukcyjnych wybranych sond gruntowych do sprężarkowych pomp ciepła*, „Chłodnictwo i Klimatyzacja”, 4 (2014), s. 36–40.
- [3] Jurek A.: *Rozkład temperatury wokół pojedynczego pionowego wymiennika gruntowego obliczony metodą bilansów elementarnych*, „Structure and Environment” 1 (2013), s. 46–50.
- [4] Smuczyńska M.: *Wymiarowanie kolektora gruntowego w pompach ciepła*, INSTALREPORTER, November 2011, s. 33-35.

Anna Jurek

Wpływ stosowanych materiałów wypełniających do odwiertów pionowych wymienników gruntowych na strumień ciepła pobierany z gruntu

1. Wstęp

W warunkach polskich, zgodnie z Rozporządzeniem ministra środowiska z dnia 15 grudnia 2011 roku w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących innych dokumentacji geologicznych; §6; pkt 1.f, konieczne jest spełnienie wymagania dotyczącego izolacji poziomów wodonośnych dla otworów wierconych w celu wykorzystania ciepła z Ziemi [1]. W związku z powyższym w technologii wykonywania pionowych wymienników gruntowych przestrzeń pomiędzy rurami sondy gruntowej a ścianami odwiertu wypełnia się odpowiednim materiałem na

całej jego długości. Takie uszczelnienie otworu ma na celu nie tylko odseparowanie przewierconych poziomów wodonośnych, ale także uniemożliwienie przedostawania się zanieczyszczeń powierzchniowych oraz zabezpieczenie samej sondy przed możliwym uszkodzeniem. Dodatkowo materiał wypełniający powinien być tak dobrany, aby jego obecność nie pogorszała warunków wymiany ciepła oraz wszelkie składniki w nim stosowane nie były szkodliwe dla środowiska gruntowo-wodnego. Rysunek 1 przedstawia schemat wykonania typowej sondy gruntowej typu U.

Obecność materiału wypełniającego nie pozostaje bez wpływu na proces wymiany ciepła pomiędzy sondą a otaczającym ją gruntem. Podczas pracy pompy w trybie grzania, czynnik, który krąży w sondzie pionowej pobiera ciepło od otaczającego ją gruntu napotykając dodatkowy opór cieplny powodowany obecnością dodatkowej warstwy, jaką stanowi masa wypełniająca. Podczas tego procesu w początkowym okresie pracy, następuje znaczny spadek naturalnej, niezakłóconej temperatury gruntu rozważanej dla danej długości wymiennika. Czas trwania takich niestacjonarnych warunków może być różny, dopiero po paru dekadach pracy pompy mają miejsce warunki ustalone. Podczas pierwszych lat pracy pompy ciepła mechanizm przewodzenia ciepła występuje głównie w kierunku promieniowym, przechodząc po pewnym czasie w proces o charakterze trójwymiarowym [3].

W niniejszym artykule zaprezentowano model obliczeniowy pojedynczej gruntowej sondy pionowej otoczonej masą wypełniająca, dla warunków niestabilnych. Proces wymiany ciepła przedstawiono za pomocą modelu cylindrycznego, w którym w celu uproszczenia założono jednowymiarowy przepływ ciepła (tylko w kierunku r).

Pomiędzy ścianą wymiennika gruntowego a wypełnieniem następuje przewodzenie ciepła, podobnie zresztą jak i pomiędzy wypełnieniem a otaczającym go gruntem, podczas gdy możliwy ruch wody głębinowej lub gruntowej został pominięty. W celu określenia strumienia ciepła, możliwego do pozyskania z odwiertu, rozważany przypadek należy ograniczyć tylko do tego co dzieje się na powierzchni ściany odwiertu, przyjmując warunek brzegowy trzeciego rodzaju, czyli konwekcyjną wymianę ciepła pomiędzy ścianą sondy i wypełniającym ją płynem. W procesie niestabilnym ilość ciepła pobranego z gruntu oraz rozkład temperatur w ścianie wymiennika, w wypełnieniu i w otaczającym go gruncie, są wartościami zawsze zależnymi od czasu.

2. Model matematyczny wymiany ciepła w wymienniku otoczonym materiałem wypełniającym

Założono niestabilne, jednowymiarowe przewodzenie ciepła przez warstwę gruntu, stałe wartości gęstości, ciepła właściwego i współczynnika przewodzenia ciepła gruntu, wypełnienia oraz materiału, z którego wykonana jest ściana sondy. Rozwiązanie równań modelu wymiany ciepła uzyskano stosując metodę bilansów elementarnych. Badany obszar

podzielono na elementy geometryczne, dla których sporządzono bilanse energii na podstawie następujących założeń:

- stała i niezmienna temperatura otaczającego ośrodka $T_k = \text{const}$;
- cały czas stała i niezmienna temperatura czynnika pośredniczącego $T_f = \text{const}$;
- jednowymiarowe pole temperaturowe \rightarrow ruch ciepła jednowymiarowy w kierunku r ;
- z powierzchni zewnętrznej ciepło jest dostarczane na drodze wnikania ze stałą wartością współczynnika wnikania ciepła $\alpha = \text{const}$;
- początkowa temperatura układu równa jest początkowej temperaturze gruntu;
- znane są stałe parametry ścianki, wypełnienia i gruntu: c_p, ρ, λ ;
- brak obecności wewnętrznych źródeł ciepła;
- każdy element reprezentowany jest przez węzeł leżący w środku ciężkości elementu, w którym skupia się cała pojemność cieplna rozpatrywanego elementu;
- cały rozpatrywany obszar jest symetryczny względem osi zlokalizowanej w rdzeniu czynnika pośredniczącego.

Procesy cieplne zachodzące w rozważanym obszarze opisuje układ równań różniczkowych cząstkowych.

Do obliczeń przyjęto schemat ośrodka gruntowego, dla którego wyznaczono zastępcze parametry (tab. 1).

Obliczenia przeprowadzono dla kilku różnych rodzajów mas wypełniających. Tabela przedstawia rodzaje użytych wypełnień i ich zdolność do transportu ciepła [4].

3. Przykład obliczeniowy

Obliczenia numeryczne wykonano w programie Mathcad, przy zastosowaniu następujących danych. Średnia temperatura czynnika pośredniczącego (glikolu etylenowego – 38%) w wymienniku wynosi $T_f = -3^\circ\text{C}$, a jego parametry wynoszą: $c_{pg} = 3430 \text{ J/kgK}$, $\rho_g = 1055 \text{ kg/m}^3$, natomiast wyznaczony współczynnik przejmowania ciepła dla glikolu etylenowego (38%) wynosi $\alpha = 6970 \text{ W/m}^2\text{K}$. Właściwości gruntu zostały przyjęte zgodnie z tabelą 1, zaś właściwości materiału wypełniającego zgodnie z tabelą 2, zaś jego średnica wynosi $d_{wyp} = 0,22 \text{ m}$. Zastosowano wymiennik o wymiarach $d_w = 0,049 \text{ m}$ oraz $d_z = 0,0527 \text{ m}$ wykonany z materiału o współczynniku przewodzenia ciepła równym: $\lambda_r = 0,51 \text{ W/(mK)}$ (rury PEHD) Przyjęto, także że stała niezakłócona temperatura gruntu w odległości $r_7 = 2,5 \text{ m}$ wynosi $T_k = T_z = 8^\circ\text{C}$.

Na załączonych rysunkach przedstawiono wyniki dokonanych symulacji. Rysunek 2 ilustruje zmiany

temperatur w poszczególnych węzłach modelu po miesiącu pracy sondy gruntowej, bez wypełnienia oraz przy zastosowaniu różnego materiału wypełniającego.

Natomiast rysunek 3 przedstawia ilość ciepła pobranego z gruntu przez sondę gruntową po miesiącu jej pracy dla wszystkich wspomnianych wcześniej przypadków.

4. Wnioski

Przyjęty model obliczeniowy pozwala nie tylko na dogłębne poznanie procesów złożonej wymiany ciepła wokół pojedynczej sondy gruntowej otoczonej masą wypełniającą, ale umożliwia także dobieranie parametrów poszczególnych elementów modelu w celu optymalizacji pracy samej pompy ciepła. Symulacji można dokonywać poprzez np. dobór czynnika pośredniczącego (c_{pg} , ρ_g , λ_{gr}) czy też odpowiedniej prędkości jego przepływu, ale także materiału wypełniającego o innych właściwościach fizycznych (c_{pwypp} , ρ_{wypp} , λ_{wypp}) odnosząc je do warunków gruntowych z jakimi mamy do czynienia (c_{pg} , ρ_g , λ_{gr}). Z dokonanej analizy wynika, że dobór materiału wypełniającego odwiert sondy gruntowej jest niezwykle istotny dla późniejszej jej pracy, bowiem wyniki dokonanych obliczeń pokazują, że może mieć on zarówno pozytywny jak i negatywny wpływ na wielkość strumienia ciepła pobieranego z gruntu. Określenie optymalnych warunków pracy wymiennika gruntowego jest niezwykle istotne już na etapie projektowania, stąd wniosek że dokładne poznanie procesów wokół niego zachodzących jest niezbędne.