Tomasz KUJAWA, Władysław NOWAK
Politechnika Szczecińska
Katedra Techniki Cieplnej
Al. Piastów 19, 70-310 Szczecin
Tel.: +48 (91) 4494272, Tel./Fax: +48 (91) 4494591
E-mail: awajuk@safona.ps.pl

Proceedings of International Scientific Conference
"Geothermal Energy in Underground Mines"
November 21-23, 2001, Ustroń, Poland

ANALIZA WPŁYWU GŁĘBOKOŚCI SONDY GEOTERMICZNEJ UMIESZCZONEJ W ZŁOŻU ORAZ TEMPERATURY WODY SIECIOWEJ POWROTNEJ NA JEJ WYDAJNOŚĆ CIEPLNĄ

ANALYSIS OF IMPACT OF DEPTH OF A GEOTHERMAL EXCHANGER LOCATED IN DEPOSIT AND TEMPERATURE OF THE WATER IN A HEAT DISTRIBUTION NETWORK RETURNING TO THE SURFACE ON HEAT EXTRACTION RATE

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono model obliczeniowy systemu jednootworowego umożliwiający określenie ilości pozyskiwanej energii geotermicznej. Przeprowadzone obliczenia pozwoliły dokonać analizy możliwości pozyskiwania i wykorzystania energii geotermicznej ze szczególnym uwzględnieniem wpływu głębokości sondy jak również temperatury wody sieciowej powracającej do wymiennika gruntowego, która jest jednym z ważnych czynników decydujących o możliwości zagospodarowania pozyskiwanej tej energii.

* * *

ABSTRACT

A computational model of a one-hole system which enables the amount of extracted heat to be predicted is presented. The calculations permit analysing the possibility of obtaining and using geothermal energy, especially considering the influence of the depth of the geothermal exchanger as well as the temperature profile of the water in the heat distribution network returning to the ground surface. The temperatures of the up-flowing water in the heat exchanger and the produced water are very important factors in utilizing the obtained energy.

* * *

WSTĘP

Jedną z metod zmniejszenia kosztów inwestycyjnych związanych z wykorzystywaniem energii gruntu jest wykorzystanie istniejących otworów, które wykonane zostały przy poszukiwaniu ropy naftowej i gazu ziemnego. Adaptacja takiego otworu polega na umieszczeniu w nim wymiennika z czynnikiem pośredniczącym, który może przyjmować różne rozwiązania konstrukcyjne [7, 8, 9, 11].

Możliwe jest również wykorzystanie zasobów energii geotermicznej z kopalń węgla kamiennego. Świadczą o tym liczne prace [1, 3, 4, 5, 10, 12]. Dotyczy to zarówno kopalń eksploatowanych, jak również zamkniętych. Należy zaznaczyć, że wykorzystanie tego typu obiektów może w znacznym stopniu ograniczyć spalanie konwencjonalnych paliw w ciepłowniach czy gospodarstwach indywidualnych, a tym samym przyczynić się do zredukowania emisji szkodliwych gazów i pyłów do atmosfery oraz stałych produktów spalania.

Z tych oto przesłanek autorzy zajmują się zagadnieniami związanymi z pozyskiwaniem i wykorzystaniem energii geotermicznej. W pracy przedstawiono model obliczeniowy systemu jednootworowego umożliwiają-

INTRODUCTION

Employing the one-hole injection system is a way of reducing the initial. The use of existing single holes, drilled for oil or gas exploration, is the most efficient way from an economic point of view. In order to adapt one of these holes, it is enough to install an exchanger with a heat extraction medium. For this, there are various construction solutions [7-9, 11].

It is also possible to use geothermal energy supplies from coal mines. This applies to open as well as dormant mines. The available literature discusses this solution [1, 3-5, 10, 12]. Using mines and abandoned holes may considerably reduce the burning of conventional fuels in heating plants or houses. In this way, less harmful gases and dust as well as solid burning products are emitted into the atmosphere.

For this reason, the authors consider the problems of obtaining and using geothermal energy. A computational model of a one-hole system is presented, which makes it possible to determine the amount of extracted geothermal energy. The calculations enable the analysis of the possibility of obtaining and utilizing geothermal energy, in particular taking into consideration

Recenzent / Reviewer: dr Koji Morita

cy określenie ilości pozyskiwanej energii geotermicznej. Przeprowadzone obliczenia pozwoliły dokonać analizy możliwości pozyskiwania i wykorzystania energii geotermicznej ze szczególnym uwzględnieniem wpływu głębokości sondy jak również temperatury wody sieciowej powracającej do wymiennika gruntowego, która jest jednym z ważnych czynników decydujących o możliwości zagospodarowania pozyskiwanej tej energii.

PROPONOWANY MODEL WYMIENNIKA TYPU "RURA W RURZE"

Poniżej przedstawiono przybliżony model obliczeniowy geotermicznego wymiennika typu "rura w rurze", którego rura wewnętrzna jest doskonale zaizolowana. Wymiennik ten znajduje się w nieprzepuszczalnym masywie skalnym, którego temperatura zmienia się liniowo. Zasadę działania tego wymiennika ciepła przedstawiono na ryc. 1. Przy obliczaniu ilości przekazywanego ciepła między masywem skalnym a wodą płynącą w kanale pierścieniowym wykorzystuje się zastępczy współczynnik przenikania ciepła k_z, którego wartość może zmieniać się w czasie. Wartość tego współczynnika przekazywania ciepła można określić na podstawie wzorów podanych w literaturze [2]. Na powierzchnię płyn wyprowadzany jest kanałem środkowym.

Rozpatrywany model z adiatermiczną rurą wewnętrzną daje maksymalne wartości pozyskiwanego strumienia cieplnego oraz wyższe temperatury wody sieciowej na wypływie z wymiennika gruntowego w porównaniu do modeli nieadiatermicznych [6].

Na ryc. 2 pokazano pole temperatury czynnika oraz masywu skalnego. Przyjęto, że temperatura zatłaczanej wody jest wyższa od temperatury złoża na głębokości $x = 0$. Skutkiem tego w pierwszej fazie przepływu czynnika w wymienniku oddaje on ciepło do gruntu po czym odbiera ciepło z gruntu osiągając swoja tempera-

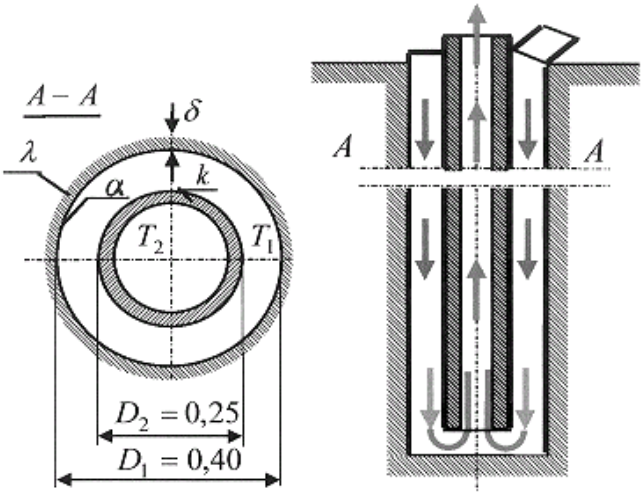
the depth of a geothermal exchanger and the temperatures of up-flowing water and the produced hot water. The temperatures of the up-flowing water in the heat exchanger and the produced water are very important factors in utilizing the obtained energy.

SUGGESTED MODEL OF A DOUBLE-PIPE HEAT EXCHANGER

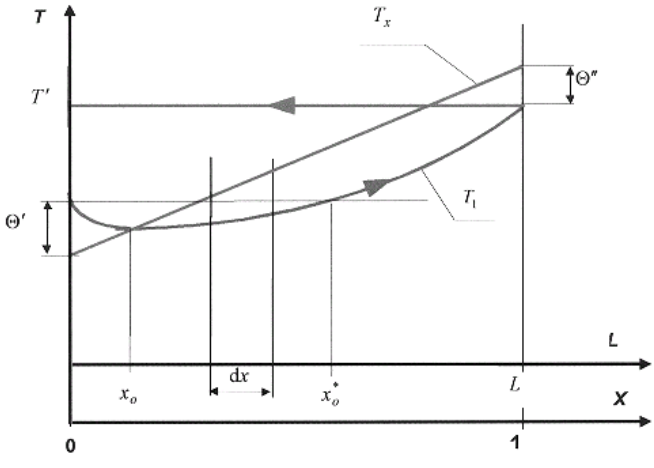
The authors present an approximate computational model of a geothermal double-pipe heat exchanger. Its inner pipe is perfectly insulated. The exchanger is located in an impermeable rock massif where the temperature changes linearly in a vertical direction. The principle of operation of the heat exchanger is shown in Fig. 1. To calculate the amount of transferred heat between the rock massif and the water flowing in a ring-shaped channel, the authors use an overall heat transfer coefficient k_z. The value may change with time. The value of the heat transfer coefficient may be estimated using equations that available publications provide [2]. Fluid is extracted to the surface through the inner pipe.

The considered model with an adiabatic inner pipe gives maximum values of extracted heat and higher outlet water temperatures in comparison with the non-adiabatic models [6].

Figure 2 presents the thermal field of the fluid and rock massif for the ground exchanger presented in Fig. 1. In this variant, it is assumed that the temperature of the water entering the heat exchanger is higher than the temperature of the deposit at the depth $x = 0$. As a result, fluid in the first phase of its flow in the heat exchanger transfers heat into the ground. After this first phase, heat is transferred into the fluid. Fluid reaches the temperature it was at upon first entering the heat



Ryc. 1. Głęboka geotermalna sonda pionowa typu "rura w rurze" z zaizolowaną rurą wewnętrzną
Fig. 1. Model of geothermal deep vertical heat exchanger of Field type with insulation.



Ryc. 2. Pole temperatur wody w wymienniku typu "rura w rurze" z ryc. 1
Fig. 2. Thermal field of a fluid in the considered mathematical model of a deep geothermal vertical heat exchanger of Field type.

turę początkową na wejściu do wymiennika (na głębokości x_o^*) i jeżeli warunki na to pozwalają osiąga temperaturę T''. Na podstawie równań bilansu energii dla elementarnej części wymiennika o długości $\mathrm{d}x$ z uwzględnieniem równań wymiany ciepła napisano równanie opisujące pole temperatury czynnika:

$$\dot{m}c_p T = k_z (T - T_x)\mathrm{d}A + \dot{m}c_p \left(T + \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}A}\mathrm{d}A \right), \quad (1)$$

gdzie: $A = \pi DX \quad X \in (0, L)$.

Po szeregu przekształceń i wprowadzeniu dodatkowych oznaczeń

$$x = \frac{X}{L}, \; \dot{W} = \dot{m}c_p, \; k_z^* = \frac{k_z \pi DL}{\dot{W}}$$

równanie (1) przyjmie postać

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x} = -k_z^* (T - T_x) . \quad (2)$$

Prostą obrazującą zmianę temperatury złoża opisuje równanie:

$$T_x = E^* x + F \quad (3)$$

gdzie: $E^* = EL$

Różnicę temperatur między czynnikiem a złożem możemy zapisać jako:

$$\Theta = T - T_x . \quad (4)$$

Podstawiając do równania (4) za T_x zależność (3), oraz różniczkując zależność (4) względem x otrzymamy:

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x} = \frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}x} + E^* . \quad (5)$$

Wykorzystując w równaniu (5) zależność (2) dochodzimy do równania różniczkowego I-rzędu

$$\frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}x} + k_z^* \Theta + E^* = 0 , \quad (6)$$

którego rozwiązanie określa zależność

$$\Theta = -\frac{E^*}{k_z^*} + Ce^{-k_z^* x} \quad (7)$$

Wykorzystując warunek brzegowy $\Theta = \Theta'$ dla $x = 0$ stała *C* określona jest zależnością

$$C = \Theta' + \frac{E^*}{k_z^*} . \quad (8)$$

Podstawiając równanie (8) do zależności (7) otrzymamy

$$\Theta = -\frac{E^*}{k_z^*} + \left(\Theta' + \frac{E^*}{k_z^*} \right) \mathrm{e}^{-k_z^* x} \quad (9)$$

exchanger after a distance x_o^*. If conditions allow, fluid reaches temperature T''. Based on elementary balance equations concerning a part of an exchanger of length $\mathrm{d}x$, and taking into account equations of heat exchange, the equation describing the fluid temperature is as follows:

$$\dot{m}c_p T = k_z (T - T_x)\mathrm{d}A + \dot{m}c_p \left(T + \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}A}\mathrm{d}A \right), \quad (1)$$

where $A = \pi DX \quad X \in (0, L)$.

After a series of transformations, and introducing additional signs

$$x = \frac{X}{L}, \; \dot{W} = \dot{m}c_p, \; k_z^* = \frac{k_z \pi DL}{\dot{W}}$$

equation (1) is as follows:

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x} = -k_z^* (T - T_x) . \quad (2)$$

A linear variation of the deposit temperature is given by the following relation:

$$T_x = E^* x + F \quad (3)$$

where $E^* = EL$.

The temperature difference between the fluid and the deposit may be written as follows:

$$\Theta = T - T_x . \quad (4)$$

Replacing T_x in relation (4) with relation (3) and differentiating relation (4) in relation to x, we obtain

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x} = \frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}x} + E^* . \quad (5)$$

Using in equation (5) relation (2), we obtain the first-order differential equation

$$\frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}x} + k_z^* \Theta + E^* = 0 . \quad (6)$$

Its solution is determined by the following relation:

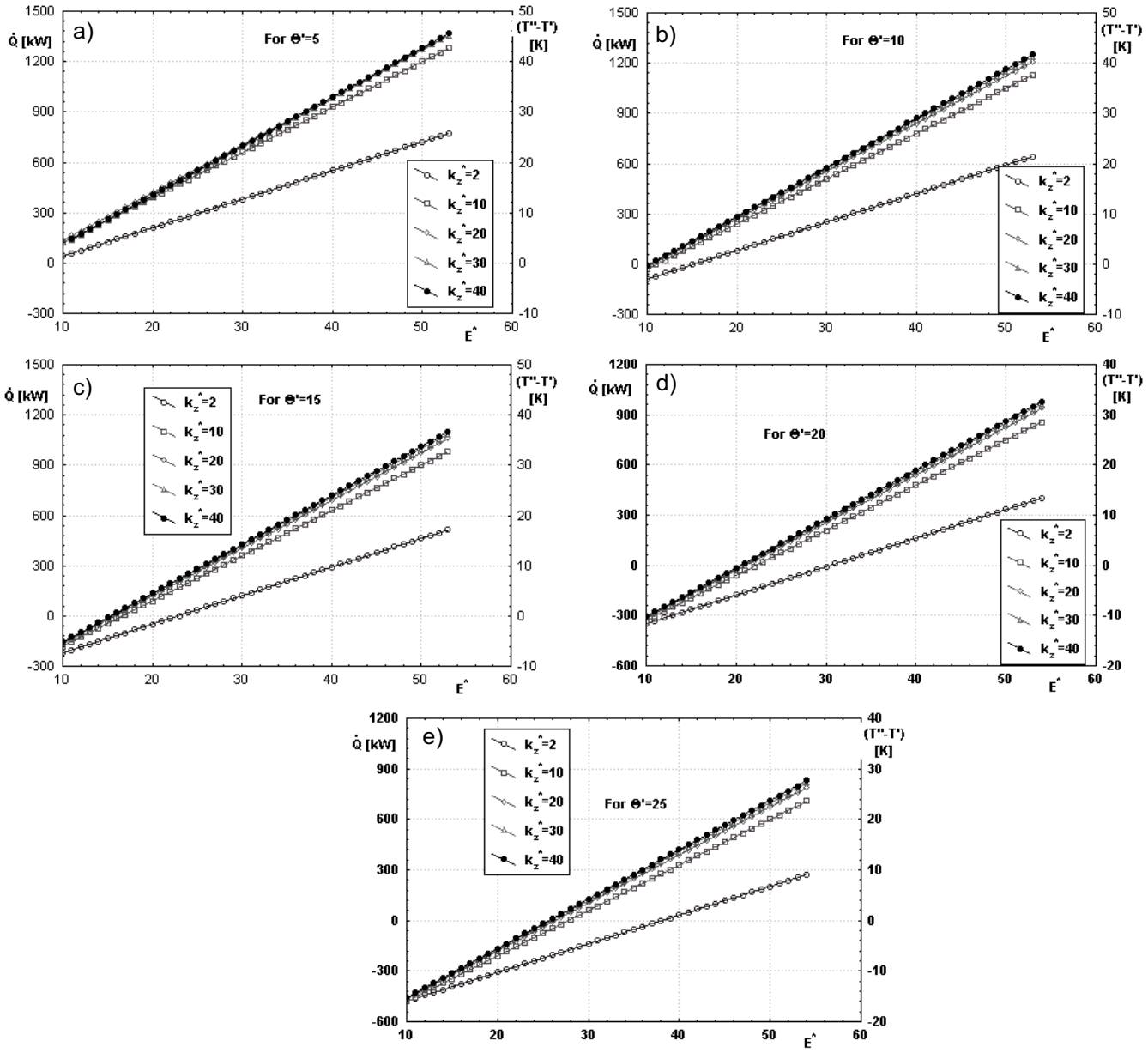
$$\Theta = -\frac{E^*}{k_z^*} + Ce^{-k_z^* x} . \quad (7)$$

Using the boundary condition $\Theta = \Theta'$, for $x = 0$ the constant C is determined by the following relation:

$$C = \Theta' + \frac{E^*}{k_z^*} . \quad (8)$$

Replacing relation (7) with equation (8) we obtain

$$\Theta = -\frac{E^*}{k_z^*} + \left(\Theta' + \frac{E^*}{k_z^*} \right) \mathrm{e}^{-k_z^* x} . \quad (9)$$



Ryc. 3. Wpływ parametru E^* na wydajność cieplną wymiennika typu "rura w rurze" (dla $\dot{W} = 30000$ W/K)

Fig. 3. Influence of parameter E^* on heat extraction rate of chosen model of exchanger of Field type (for $\dot{W} = 30000$ W/K).

Temperaturę wody na powierzchni ziemi oblicza się z powyższego równania: dla $x = 1$ różnica temperatur $\Theta = \Theta''$.

Równanie (9) przyjmie postać:

$$\Theta'' = -\frac{E^*}{k_z^*} + \left(\Theta' + \frac{E^*}{k_z^*}\right) e^{-k_z^*} \qquad (10)$$

lub

$$T'' = E^* + F - \frac{E^*}{k_z^*} + \left(\Theta' + \frac{E^*}{k_z^*}\right) e^{-k_z^*} \qquad (11)$$

Strumień przejętego ciepła od złoża określa równanie:

The temperature of the water exiting the heat exchanger at the surface is calculated from the above relation; for $x = 1$, the difference of temperature is $\Theta = \Theta''$.

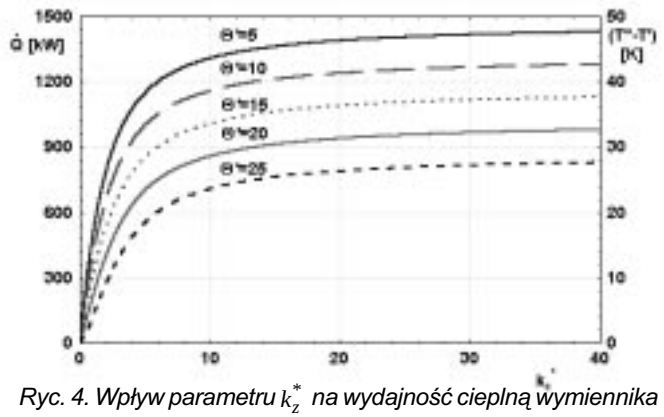
Relation (9) is as follows:

$$\Theta'' = -\frac{E^*}{k_z^*} + \left(\Theta' + \frac{E^*}{k_z^*}\right) e^{-k_z^*} \qquad (10)$$

or

$$T'' = E^* + F - \frac{E^*}{k_z^*} + \left(\Theta' + \frac{E^*}{k_z^*}\right) e^{-k_z^*}. \qquad (11)$$

The flow of heat transmitted from a deposit is determined by the following relation:



Ryc. 4. Wpływ parametru k_z^* na wydajność cieplną wymiennika typu "rura w rurze" dla wybranych wartości Θ' ($\dot{W} = 30000\,W/K,\ E^* = 54\,°C$)

Fig. 4. Influence of parameter k_z^* on heat extraction rate of chosen model of exchanger of Field type for chosen values of Θ' ($\dot{W} = 30000\,W/K,\ E^* = 54\,°C$).

$$\dot{Q} = \dot{W}\left(T'' - T'\right) . \qquad (12)$$

Wykorzystując zależności (1-11) i wykonując szereg przekształceń jesteśmy wstanie określić:

- odległość x_o przy której temperatura czynnika jest równa temperaturze gruntu

$$x_o = \ln\left[\frac{\left(\Theta'/E^*\right)}{\left(1/k_z^*\right)} + 1\right]^{\left(1/k_z^*\right)} , \qquad (13)$$

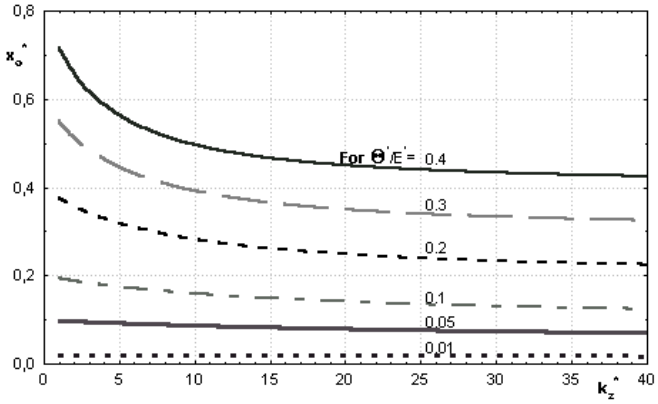
- odległość x_o^* przy której temperatura czynnika osiąga tę samą wartość, co przy $x = 0$

$$x_o^* = \left(\frac{\Theta'}{E^*} + \frac{1}{k_z^*}\right)\left(1 - \mathrm{e}^{-k_z^* x_o^*}\right) . \qquad (14)$$

Wyprowadzone zależności pozwoliły na opracowanie przykładowych wykresów (ryc. 3, 4 i 5) służących do wstępnej oceny stosowania danego rozwiązania wymiennika gruntowego.

WNIOSKI

Z przedstawionego na ryc. 3 wykresu uzyskujemy informację, jak zmienia się strumień wydobywanego ciepła geotermicznego ze zmianą parametru E^* (parametr odpowiedzialny za wartość temperatury złoża na głębokości $x = 0$), k_z^* oraz Θ'. Ze wzrostem Θ' strumień wydobywanego ciepła maleje, natomiast rośnie



Ryc. 5. Wpływ parametru k_z^* na odległość x_o^* przy której temperatura czynnika osiąga tę samą wartość, co przy $x = 0$

Fig. 5. Influence of parameter k_z^* on length x_o^* at which temperature of fluid reaches the same value as at length $x = 0$.

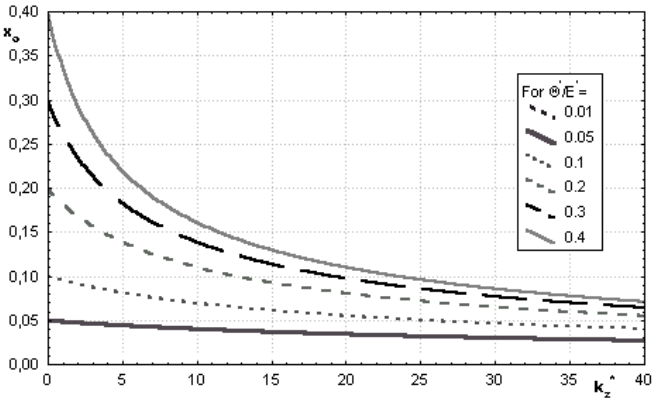
$$\dot{Q} = \dot{W}\left(T'' - T'\right) . \qquad (12)$$

Using equations (1) to (11), and after a series of transformations, it is possible to determine:

- length x_o at which the temperature of the fluid equals the temperature of the ground

$$x_o = \ln\left[\frac{\left(\Theta'/E^*\right)}{\left(1/k_z^*\right)} + 1\right]^{\left(1/k_z^*\right)} , \qquad (13)$$

- length x_o^* at which the temperature of the fluid reaches the same value as at $x = 0$



Ryc. 6. Wpływ parametru k_z^* na odległość x_o przy której temperatura czynnika jest równa temperaturze gruntu (do osiągnięcia wartości x_o zatłaczana woda oddaje ciepło do gruntu, po czym ciepło jest pobierane z gruntu do wody)

Fig. 6. Influence of parameter k_z^* on length x_o at which temperature of fluid equals temperature of the ground (to reach value x_o injected water transfers heat into ground, and then water removes heat from the ground).

ze zwiększaniem się parametru k_z^*. Przy Θ' równym 10, 15, 20 i 25 K dla pewnego obszaru wartości E^* i k_z^* strumień wydobywanego ciepła ma wartości ujemne, co oznacza, że woda na wyjściu z wymiennika gruntowego ma temperaturę niższą od temperatury zatłaczanej wody: zamiast pozyskiwać energię z gruntu doprowadzamy ją do ziemi.
Na ryc. 4 przedstawiono jak zmienia się ilość pobieranego ciepła i różnica temperatur czynnika w funkcji k_z^* dla wybranych wartości Θ' (przy $E^* = 54$ °C i $\dot{W} = 30000$ W/m). Zauważa się, że przy stałej wartości Θ' wzrost k_z^* powyżej wartości 20 nie powoduje zmiany strumienia pobieranego ciepła. Ocenę strumienia wydobywanego ciepła (temperatury wody na wyjściu z wymiennika) jesteśmy wstanie przeprowadzić po przeanalizowaniu: zmienności odległości x_o^* przy której temperatura czynnika osiąga tę samą wartość, co przy $x = 0$ (ryc. 5) i odległości x_o przy której temperatura czynnika jest równa temperaturze gruntu (ryc. 6). Im mniejsza jest wartość x_o^* i x_o, tym dłuższa jest droga $\left(1 - x_o^*\right)$ odbioru ciepła zatłaczanej wody od gruntu. Dla stałej wartości k_z^* wzrost stosunku Θ'/E^* wpływa niekorzystnie na osiągi cieplne wymiennika gruntowego.

OZNACZENIA

A - powierzchnia wymiany ciepła, [m^2]
C - stała
c_p - średnie ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu, [J/(kgK)]
D - średnica, [m]
E^*, F - stałe, [°C]
k_z - zastępczy współczynnik przenikania ciepła, [W/(m2K)]
k_z^* - obliczeniowy współczynnik przenikania ciepła, [W/(m2K)]
L - długość wymiennika, [m]
$\dot{m}$ - strumień masy, [kg/s]
T - temperatura, [°C]
X - współrzędna, [m]
x - współrzędna zredukowana
Θ - różnica temperatur, [K]

$$x_o^* = \left(\frac{\Theta'}{E^*} + \frac{1}{k_z^*}\right)\left(1 - \mathrm{e}^{-k_z^* x_o^*}\right) . \qquad (14)$$

These derived relations were used to prepare the examples shown in Figs. 3--5. These figures may be used to estimate a heat exchanger's performance given the conditions stated in the figures.

CONCLUSIONS

Figure 3 shows how the net heat transfer rate changes with the change of parameter E^* (this parameter is responsible for the value of the temperature of the deposit at a depth of $x = 0$, k_z^* and Θ'). When Θ' increases, the net heat transfer rate into the fluid decreases, but it increases when parameter k_z^* increases. When Θ' equals 10, 15, 20 and 25K for certain fields of E^* and k_z^*, the heat transfer rates have negative values. This means that the temperature of water exiting the ground exchanger is lower than the temperature of the water entering; heat is pumped into the ground instead of being drawn out.
Figure 4 presents how the amount of drawn-out heat changes. It also shows the change of fluid temperature as a function of k_z^* for the chosen values of Θ' (at $E^* = 54$ °C and $\dot{W} = 30000$ W/K). It is noticed that at a steady Θ', increasing k_z^* above 20 does not result in further increases in heat output. Estimation of the flow of drawn-out heat (temperature on output of an exchanger) is possible after analysis: Fig. 5 shows the variability of length x_o^* at which the temperature of the fluid reaches the same value as at $x = 0$, and Fig. 6 shows the length x_o at which the temperature of the fluid equals the temperature of the ground. The smaller the values of x_o^* and x_o, the greater the length $\left(1 - x_o^*\right)$ of heat extraction. When k_z^* is steady, the increase of the relation Θ'/E^* disadvantageously influences the performance of a ground exchanger.

NOTATION

A - surface of heat transfer [m^2]
C - constant
c_p - heat capacity at constant pressure per unit mass [J/(kg K)]
D - diameter [m]

$\dot{W}$ - strumień pojemności cieplnej czynnika, [W/K]

$\dot{Q}$ - strumień pozyskiwanego ciepła [W or kW]

LITERATURA / REFERENCES

1. Chmura K.: Analiza ziemskiego strumienia ciepła na przykładzie kopalni "Borynia", Przegląd Górniczy, nr 12, Katowice 1975, s. 480-489
2. Diad'kin, Ju.D., Giendler, S.G.: Prociessy teplomassopierienosa pri izwlecenii gieotiermalnoj eniergii, Leningrad 1985
3. Karwasiecka M.: Atlas geotermiczny Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1996
4. Karwasiecka M.: Perspektywy pozyskania energii geotermicznej w obszarze GZW, Technika Poszukiwań Geologicznych Geosynoptyka i Geotermia, nr 3-4, Kraków 1996, s. 28-32
5. Kubski P.: Analiza możliwości wykorzystania energii wód kopalnianych do celów grzewczych, Materiały Polskiej Szkoły Geotermalnej, Kraków 1996, s. 281-286
6. Kujawa T., Nowak W.: Vertical geothermal probes as influence on work of geothermal vertical probe, EUROTHERM '59: Thermodynamics, Heat and Mass Transfer of Refrigeration Machines and Heat Pumps, Francje 1998, Editors: H.Auracher., M.Feidt., G.Tsatsaronis, pp. 385-392
7. Kujawa T., Nowak W.: Wärmeleistung von geothermalen vertikalsonden in ein-und zweibohrungssystemen, IV Internationale Tagung der Fachhochscule Stralsund und der Technischen Universität Gdańsk, Stralsund 1998, pp. 21-31
8. Kujawa T., Nowak W.: Modified thermal calculations of a geothermal double-pipe heat exchanger insulation immersed into geothermal deposit, Editors: B. Sunden & C.A. Brebbia, International Conference Advanced Computational Methods in Heat Transfer VI, Madrid 2000, WIT Press, pp. 467-476
9. Kujawa T., Nowak W.: Modified thermal calculations of a geothermal double-pipe heat exchanger immersed into geothermal deposit, Renewable Energy, Editor: A.A.M. Sayigh, WREC 2000, Brighton 2000, Pergamon, Part I, pp. 314-317
10. Małolepszy Z.: Geosynoptyczny model pola geotermicznego Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, Technika Poszukiwań Geologicznych Geosynoptyka i Geotermia, nr 3, Kraków 2000, s. 3-33
11. Nowak W., Sobański R., Kabat M., Kujawa T.: Systemy pozyskiwania i wykorzystania energii geotermicznej, Wyd. Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2000
12. Ostaficzuk S.: Wybrane aspekty energii geotermalnej w Polsce, przegląd Geologiczny, vol. 44, nr 3, Warszawa 1996, s. 249-254

E^*, F - constants [°C]

k_z -overall heat transfer coefficient [W/(m^2 K)]

k_z^* - computational heat transfer coefficient [W/(m^2 K)]

L - length of exchanger [m]

$\dot{m}$ - mass flow rate [kg/s]

T - temperature [°C]

X - coordinate [m]

x - reduced coordinate

Θ - difference of temperature [K]

$\dot{W}$ - thermal capacity of heat flow [W/K]

$\dot{Q}$ - heat extraction rate [W or kW]