

CYFROWA SYMULACJA WYDAJNOŚCI CIEPLNEJ GŁOWICY GEOTERMALNEGO WYMIENNIKA W SYSTEMIE JEDNOOTWOROWYM

NUMERICAL SIMULATION OF HEAT EXTRACTION IN THE GEOTHERMAL PART OF THE EXCHANGER IN ONE-HOLE SYSTEM

STRESZCZENIE

Przy pozyskiwaniu energii geotermalnej w ciepłowniach i elektrociepłowniach, w przypadku zmineralizowanych wód geotermalnych, stosowane są dwu i jednootworowe systemy wydobywczo-zatłaczające. W tym ostatnim przypadku zastosowanie znajduje pionowa sonda geotermalna, to jest wymiennik składający się z dwóch części. Jedną część wymiennika umieszczona jest w złożu geotermalnym, w której przepływający nośnik energii pobiera ciepło od wody geotermalnej. Drugą jego część - wymiennik typu "rura w rurze" znajduje się w nieprzepuszczalnym masywie skalnym. Nośnik energii, kanałem pierścieniowym, doprowadzany jest do części geotermalnej wymiennika, gdzie dalej podwyższa swoją temperaturę. Wypływ nośnika energii na powierzchnię ziemi odbywa się rurą wewnętrzną. Wprawdzie wymiana ciepła odbywa się w obu częściach sondy geotermalnej, jednak istotny wpływ na wielkość pozyskiwanej energii geotermicznej ma ta część wymiennika, która umieszczona jest w złożu geotermalnym. Rodzaj zastosowanego wymiennika ma istotny wpływ na ilość pozyskiwanego ciepła geotermalnego. Dlatego też w referacie autorzy przedstawili wyniki obliczeń wydajności cieplnej dla dwóch rodzajów wymienników (Fielda i śrubowego). Obliczenia przeprowadzone zostały przy zastosowaniu dwóch modeli obliczeniowych. W pierwszym przyjęto założenie, że znane jest pole temperatury oraz zastępczy współczynnik przenikania ciepła. W drugim przypadku wymiennik ten traktuje się jako wymiennik krzyżowoprądowy z jednym niemieszającym się czynnikiem. Przyjęto także, że znane jest pole temperatury oraz współczynnik przenikania ciepła. W obu przypadkach przyjęto, że pole temperatury w złożu geotermalnym zmienia się liniowo, podobnie jak w masywie skalnym.

Aby uprościć obliczenia, we wszystkich porównywanych wariantach, przyjęto takie same warunki wymiany ciepła w drugiej części wymiennika typu rura w rurze, przy założeniu, że rura wewnętrzna jest doskonale zaizolowana. Porównanie wyników obliczeń wydajności cieplnej dla wymienników: Fielda i śrubowego uzyskanych przy zastosowaniu obu modeli obliczeniowych, przedstawione zostały w formie odpowiednich wykresów ilustrujących wpływ współczynnika przenikania ciepła oraz pojemności cieplnej czynników.

* * *

ABSTRACT

Geothermal plants and power stations can work as one-hole systems with an injection and production well, or as two-hole systems. The one-hole system operates using a vertical geothermal probe. It is an exchanger that has two parts. One part is immersed in a geothermal deposit, where the heat extraction medium takes heat from geothermal water. The other part of the exchanger, a double-pipe exchanger, is located in the impermeable rock massif. The extraction medium is conducted through a rig-shaped channel to the geothermal part of the exchanger, where its temperature rises. The heat extraction medium flows up to the ground through the inner pipe. However, the heat exchange takes place in both parts of the exchanger, and the part of the exchanger located in the geothermal deposit has a considerable impact on the amount of geothermal energy gained. The type of exchanger also influences the amount of heat extracted. The results of exchanger calculations on heat extraction for two types of exchanger (Field's * exchanger and a spiral-tube exchanger) are presented. The calculations were carried out using two computational models. In the first model it was assumed that the temperature field and the overall heat transfer coefficient were known. In the second, the exchanger was considered to be a cross-counter-flow heat exchanger with a single non-mixing fluid. It was also assumed that the temperature field and the overall heat transfer coefficient were known in this case too. In both cases, it was assumed that the temperature field in a geothermal deposit changes linearly in a vertical direction, as is the case in a rock massif.

To simplify the calculations, in all the cases the same conditions for the double-pipe heat exchanger part were taken into account. Also, it was assumed that the inner pipe was perfectly insulated. Comparisons of the results of the heat extraction calculations for the Field exchanger and the spiral-tube exchanger, obtained using both computational models, are presented as graphs. The graphs illustrate the impact of the overall heat transfer coefficients and heat extraction rates.

* * *

* The geothermal Field exchanger, shown in Figs. 1 and 3, is part of the system used to pump out hot water from the rock under the Earth's crust.

Ciepłownie geotermalne najczęściej pracują w układach dwuotworowych z otworami wydobywczym i zatłaczającym. W takich układach na podstawie znanych modeli obliczeniowych [1,2,3,4,5] można w stosunkowo prosty sposób, z dostateczną dokładnością, określić temperaturę wody geotermalnej wydobywanej na powierzchnię ziemi, lub temperaturę zatłaczanej wody geotermalnej na poziomie złoża. Przy dużych strumieniach masy wydobywanej wody zmiany temperatury wody geotermalnej w przewodzie wydobywczym i zatłaczającym są stosunkowo małe. Jednak wadą tych rozwiązań jest stosunkowo wysoki udział kosztów wiercenia otworów w stosunku do całkowitych kosztów inwestycyjnych.

Wielkość tych kosztów inwestycyjnych można odpowiednio zmniejszyć stosując jednootworowe systemy wydobywczo-zatłaczające, ograniczając się do wiercenia jednego otworu. Najkorzystniej jest, jeżeli wykorzysta się istniejące już pojedyncze otwory, które wykonane zostały przy poszukiwaniu ropy naftowej lub gazu ziemnego. W tym celu do takiego otworu wprowadza się geotermalny wymiennik ciepła. Wymiennik ten składa się z dwóch części. Jedna część wymiennika typu rura w rurze znajduje się w nieprzepuszczalnym masywie skalnym, którego temperatura zmienia się liniowo, zaś część druga (głowica wymiennika geotermalnego) jest zanurzona w złożu geotermalnym, od którego pobiera ciepło.

W pracach [1,2,3,4] podane zostały modele obliczeniowe sond geotermalnych, umożliwiające określenie strumienia odbieranego ciepła, dla dwóch różnych rozwiązań zanurzonej części wymiennika w złożu geotermalnym przedstawionych na ryc. 1 i 2.

W rozpatrywanych rozwiązaniach zanurzonej części wymiennika (rura Fielda, wymiennik śrubowy) nie uwzględniono wpływu pojemności cieplnej strumienia wody geotermalnej, przyjmując w obu przypadkach, że znane jest pole temperatury wody geotermalnej, które zmienia się liniowo oraz znany jest współczynnik przenikania ciepła od złoża geotermalnego do nośnika ciepła.

W pracy przedstawione zostaną dwa modele obliczeniowe, jeżeli części zanurzone - głowice (rura Fielda i wymiennik śrubowy) - traktowane są jako odpowiednie wymienniki krzyżowoprądowe.

We wszystkich omawianych przypadkach istnieje także możliwość uwzględnienia wpływu warunków wymiany ciepła w pozostałej części wymiennika typu rura w rurze na temperaturę nośnika ciepła na wypływie z sondy. W tym celu należy wykorzystać model matematyczny opisujący wymianę ciepła w wymienniku typu rura w rurze podany w pracy [3].

KRZYŻOWOPRĄDOWY WYMIENNIK FIELDA

Schemat krzyżowoprądowego wymiennika Fielda oraz pole temperatury nośnika odbierającego ciepło ze złoża

Geothermal heat plants operate in two-hole systems with injection and production wells in most cases. In systems of this kind, the temperature of the geothermal water extracted to the ground surface, as well as the temperature of the injected water in the geothermal part, may be estimated precisely enough with the help of known computational models in a relatively simply manner [1-5]. When the flow rates of drawn-out water are great, the changes of temperature of geothermal water in the injection and production wells are relatively small. However, the high cost of drilling the wells is a negative aspect of using this method for obtaining thermal energy. Employing the one-hole injection system may reduce the initial cost. The use of existing holes, drilled for oil or gas exploration, as heat exchangers is most efficient from an economic point of view.

The exchangers studied here have two parts. One, which is a double-pipe heat exchanger, is immersed in an impervious rock massif in which the temperature changes linearly in a vertical direction. The other part (the head of a geothermal exchanger) is immersed in a geothermal deposit from which it extracts heat.

In several works [1-4], we have presented computational models of geothermal heat exchangers. Considering two different configurations of the immersed part of the exchanger in a geothermal deposit, the models allow us to predict the amount of extracted heat. The configurations are presented in Figs. 1 and 2.

For these cases (Field's pipe and the spiral-tube heat exchanger), we did not take into account the effect of a geothermal water flow, because the temperature profile and the coefficient of heat transfer from a deposit into the heat extraction medium are assumed to be known. The changes in the temperature profile are assumed to be linear in a vertical direction.

In the present work, we present two computational models for the cases where the immersed parts' heads (Field's heat exchanger and spiral-tube heat exchanger) are considered as relative cross-current heat exchangers.

In all described cases, it is possible to take into account the effect of heat exchange conditions, in the residual part of a double-pipe heat exchanger, on the temperature of a heat extraction medium and on the output of the exchanger. For this purpose, a mathematical model describing heat exchange in a double-pipe heat exchanger [3] should be used.

CROSS-CURRENT HEAT EXCHANGER (FIELD TYPE)

Figure 3 presents the scheme of a cross-current heat exchanger (Field type) and the temperature field of a heat extraction medium taking heat from a geothermal deposit. The temperature of fluid 1 with thermal capacity

geotermalnego z odpowiednimi oznaczeniami podano na ryc. 3. Temperatura czynnika 1, o pojemności cieplnej $\dot{W}_1$, wzrasta od T_1' do T_1'' . Dla każdej temperatury pośredniej $T_1(x)$, temperatura czynnika grzejącego (wody geotermalnej) o pojemności cieplnej $\dot{W}_3$, zmienia się między dwoma wartościami skrajnymi. Przed wymiennikiem ciepła temperatura wody geotermalnej zmienia się liniowo według zależności: $T_3' = Ex + F$ natomiast za wymiennikiem ciepła temperatura określona jest funkcją $T_3''(x)$. W związku z tym wymianę ciepła między czynnikami 3 i 1 na elementarnej powierzchni można traktować jak w rekuperatorze krzyżowoprądowym z jednym nie mieszającym się czynnikiem dla którego obowiązuje zależność [6,7]:

$$T_3' - T_3'' = (T_3' - T_1)\phi \quad (1)$$

gdzie: $\phi = 1 - e^{-N_1}$, $N_1 = \frac{k_{3-1}A_{3-1}}{\dot{W}_3}$.

Jeżeli uwzględnimy także wymianę ciepła między czynnikami 1 i 2, to wymianę ciepła w rozpatrywanym przypadku można opisać przy pomocy niżej podanego układu równań [5]

$$\frac{d\Theta_1}{dx} = -\frac{N_2 + \phi}{R} \Theta_1 + \frac{N_2}{R} \Theta_2 + E, \quad (2)$$

$$\frac{d\Theta_2}{dx} = \frac{N_2}{R} \Theta_2 + \frac{N_2}{R} \Theta_1 + E. \quad (3)$$

gdzie: $\Theta_2 = T_3' - T_2$, $\Theta_1 = T_3' = T_1$, $R = \frac{\dot{W}_2}{\dot{W}_3}$,

where $\phi = 1 - e^{-N_1}$, $N_1 = \frac{k_{3-1}A_{3-1}}{\dot{W}_3}$.

If also taking into account the heat exchange between fluids 1 and 2, the heat exchange in the case under consideration may be described by the following system of equations [5]:

where $\Theta_2 = T_3' - T_2$, $\Theta_1 = T_3' = T_1$, $R = \frac{\dot{W}_2}{\dot{W}_3}$,

$$N_2 = \frac{K_{2-3}A_{2-1}}{\dot{W}_3}.$$

Jeżeli określone z zależności (3) wyrażenia na Θ_1 i $d\Theta_1/dx$ podstawimy do wzoru (2), to po wykonaniu odpowiednich przekształceń otrzyma się równanie różniczkowe rzędu drugiego:

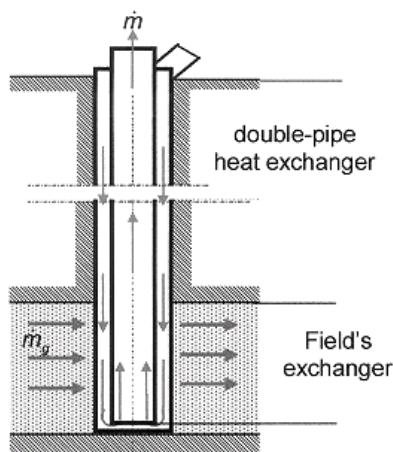
If we put Θ_1 and $d\Theta_1/dx$ determined from relation (3) in relation (2), performing some re-arrangements we obtain the following differential second-order equation:

$$\frac{d^2\Theta_2}{dx^2} + \frac{\phi}{R} \frac{d\Theta_2}{dx} - \frac{\phi N_2}{R^2} \Theta_2 - \frac{\phi}{R} E = 0, \quad (4)$$

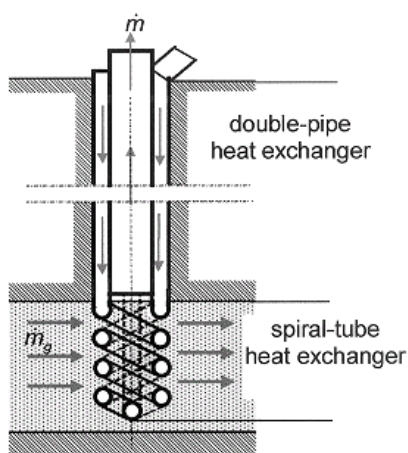
którego rozwiązaniem jest funkcja:

where the following function is its solution:

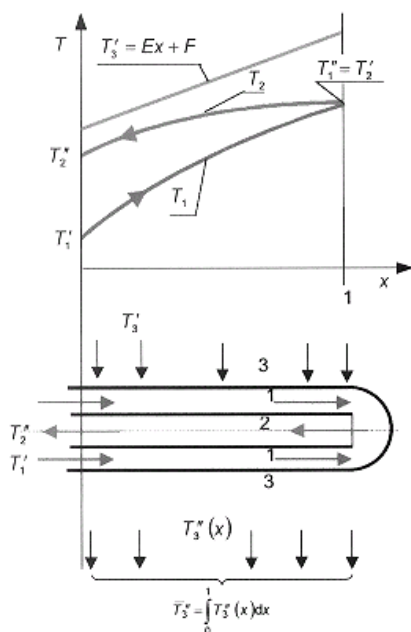
$$\Theta_2 = C_1 \exp(\alpha_1 x) + C_2 \exp(\alpha_2 x) - \frac{R}{N_2} E, \quad (5)$$



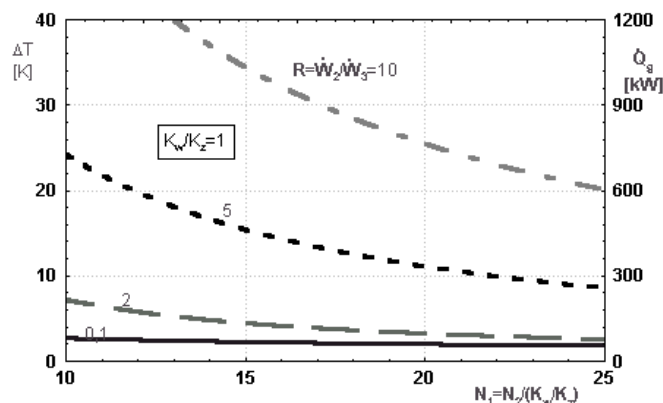
Ryc. 1. Schemat pionowego gruntowego wymiennika ciepła typu "rura w rurze" z głowicą Fielda.
Fig. 1. Scheme of the vertical double-pipe heat exchanger with a Field-type heat exchanger.



Ryc. 2. Schemat pionowego gruntowego wymiennika ciepła typu "rura w rurze" z głowicą śrubową.
Fig. 2. Scheme of the vertical double-pipe heat exchanger with a spiral-tube part.

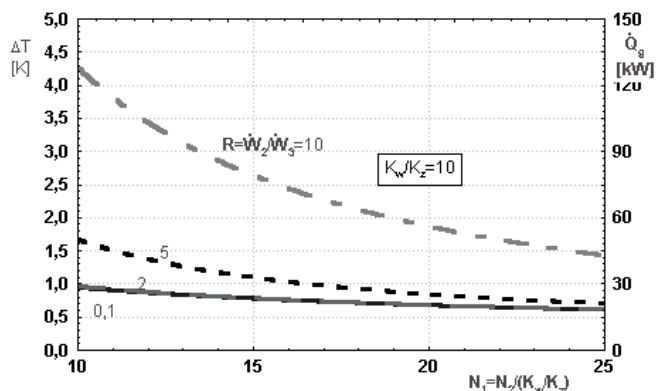


Ryc. 3. Schemat krzyżowoprądowego wymiennika Fielda.
Fig. 3. Scheme of the cross-current Field-type heat exchanger.



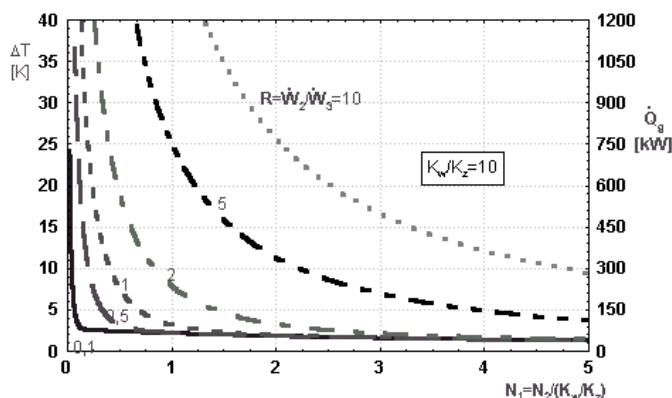
Ryc. 4. Przyrost temperatury oraz strumień ciepła uzyskiwany z krzyżowoprądowego wymiennika ciepła typu Fielda dla $K_w/K_z = 1$

Fig. 4. Increase (increment) of temperature and heat flow gained from a cross-current-flow heat exchanger of Field type for $K_w/K_z = 1$.



Ryc. 5. Przyrost temperatury oraz strumień ciepła uzyskiwany z krzyżowoprądowego wymiennika ciepła typu Fielda dla $K_w/K_z = 10$ i $N_1 = (10-25)$.

Fig. 5. Increase (increment) of temperature and heat flow gained from a cross-current-flow heat exchanger of Field type for $K_w/K_z = 10$ and $N_1 = (10-25)$.



Ryc. 6. Przyrost temperatury oraz strumień ciepła uzyskiwany z krzyżowoprądowego wymiennika ciepła typu Fielda dla $K_w/K_z = 10$ i $N_1 = (0-5)$.

Fig. 6. Increase (increment) of temperature and heat flow gained from a cross-current-flow heat exchanger of Field type for $K_w/K_z = 10$ and $N_1 = (0-5)$.

gdzie:

where

$$\alpha_{1,2} = -\frac{\phi}{2R} \left(1 \mp \sqrt{1 + \frac{4N_2}{\phi}} \right) \quad (6)$$

Korzystając z zależności (3) i (5) różnicę temperatur Θ_1 można określić ze wzoru:

Using relations (3) and (5), the difference of temperatures Θ_1 is determined from the following relation:

$$\Theta_3 = r_1 C_1 \exp(\alpha_1 x) + r_2 C_2 \exp(\alpha_2 x), \quad (7)$$

gdzie: $r_1 = 1 - \frac{R}{N_2} \alpha_1$, $r_2 = 1 - \frac{R}{N_2} \alpha_2$.

where $r_1 = 1 - \frac{R}{N_2} \alpha_1$, $r_2 = 1 - \frac{R}{N_2} \alpha_2$.

Aby określić strumień przejętego ciepła w złożu geotermalnym ze wzoru:

In order to determine the heat taken over from a geothermal deposit from the following relation:

$$\dot{Q}_g = \dot{W}_2 (T_2'' - T_1') = \dot{W}_2 (\Theta_1' - \Theta_2''), \quad (8)$$

należy określić przyrost temperatury nośnika ciepła $T_2'' - T_1'$. W tym celu wykorzystane zostaną niżej podane warunki brzegowe pozwalające na określenie stałych całkowania C_1 i C_2 :

the rise in temperature of a heat extraction medium $T_2'' - T_1'$ must be estimated. For this purpose, the following boundary conditions can be used to determine the integration constants C_1 and C_2 :

$$\begin{aligned} \text{jeżeli } x=0 \text{ to } \Theta_1(0) &= \Theta_1' \text{ oraz} & \text{if } x=0 \text{ to } \Theta_1(0) &= \Theta_1' \text{ and} \\ \text{jeżeli } x=1 \text{ to } \Theta_1''(1) &= \Theta_2''(1). & \text{if } x=1 \text{ to } \Theta_1''(1) &= \Theta_2''(1). \end{aligned} \quad (9)$$

Po wykorzystaniu warunków brzegowych (9) stałe całkowania wynoszą:

Using boundary conditions (9) the integration constants are as follows:

$$C_1 = \frac{Er_2 + \Theta_1' \alpha_2 \exp(\alpha_2)}{\alpha_2 \exp(\alpha_1) - \alpha_1 \exp(\alpha_2)}, \quad (10)$$

$$C_2 = \frac{-Er_1 - \Theta_1' \alpha_1 \exp(\alpha_1)}{\alpha_2 \exp(\alpha_1) - \alpha_1 \exp(\alpha_2)}. \quad (11)$$

Po wykorzystaniu zależności (5), (7), (8), (10) i (11) przyrost temperatury określa zależność:

Using relations (5), (7), (8), (10) and (11), the temperature rise is determined from the following equation:

$$T_2'' - T_1' = \Theta_1' - \Theta_2'' = \frac{R}{N_2} \frac{E \left(\frac{1}{\alpha_1} - \frac{1}{\alpha_2} \right) + \Theta_1' [\exp(\alpha_1) - \exp(\alpha_2)]}{\frac{1}{\alpha_1} \exp(\alpha_1) - \frac{1}{\alpha_2} \exp(\alpha_2)}. \quad (12)$$

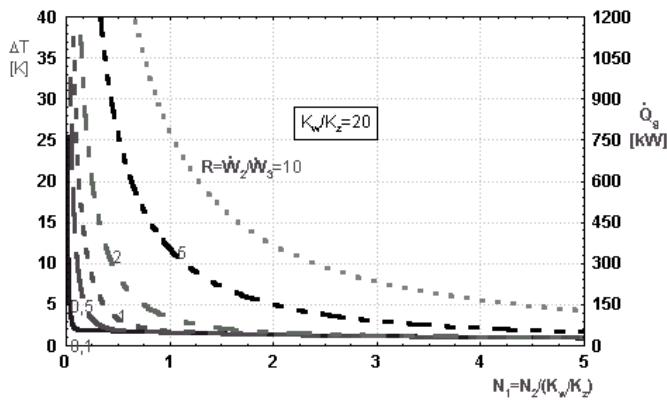
Przykładowe wykresy dla tego typu wymiennika przedstawiają ryc. 4-8.

CROSS-CURRENT HEAT EXCHANGER WITH A SPIRAL TUBE

KRZYŻOWOPRĄDOWY WYMIENNIK ŚRUBOWY

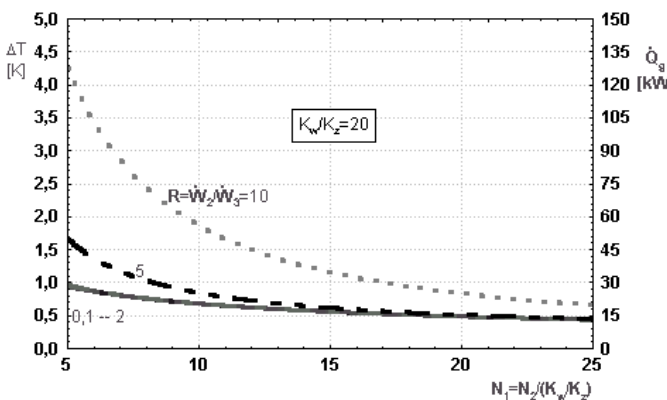
Schemat śrubowego krzyżowoprądowego wymiennika ciepła oraz pole temperatury nośnika odbierającego ze złoża geotermalnego z odpowiednimi oznaczeniami, przy założeniu że pomija się wymianę ciepła na odcinku rury prostej powrotnej, przedstawiono na ryc.9.

The scheme of a cross-current heat exchanger with a spiral tube and the temperature profile of the heat extraction medium drawing heat from a geothermal deposit are presented in Fig. 4. The scheme assumes that heat exchange in the straight return pipe is omitted. Equations of energy balance for this case may be



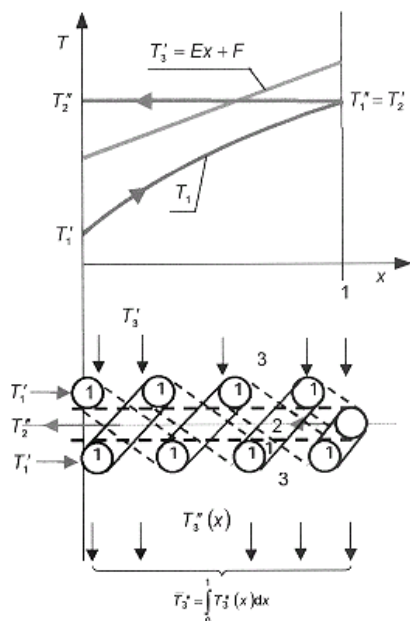
Ryc. 7. Przyrost temperatury oraz strumień ciepła uzyskiwany z krzyżowoprądowego wymiennika ciepła typu Fielda dla $K_w/K_z = 20$ i $N_1 = (0-5)$.

Fig. 7. Increase (increment) of temperature and heat flow gained from a cross-current-flow heat exchanger of Field type for $K_w/K_z = 20$ and $N_1 = (0-5)$.

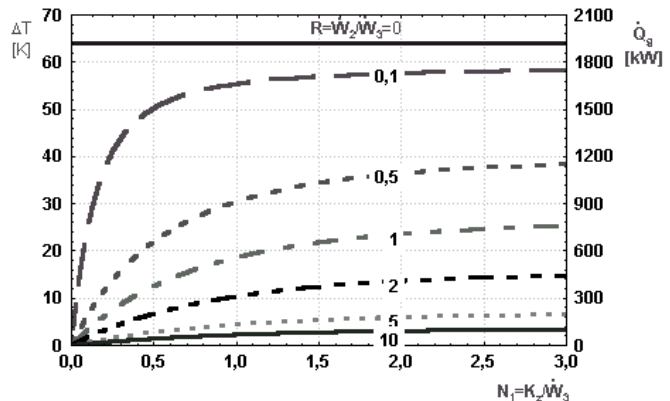


Ryc. 8. Przyrost temperatury oraz strumień ciepła uzyskiwany z krzyżowoprądowego wymiennika ciepła typu Fielda dla $K_w/K_z = 20$ i $N_1 = (5-25)$.

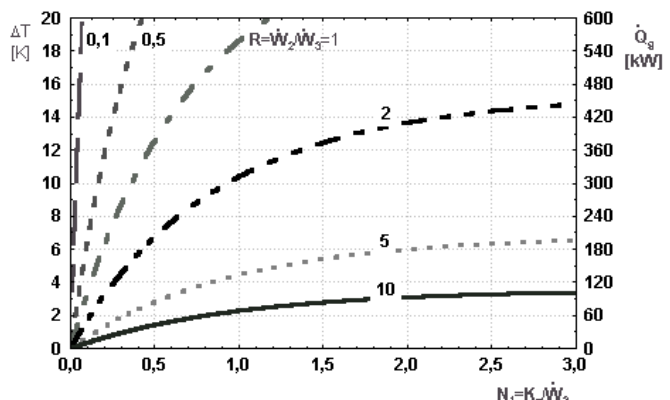
Fig. 8. Increase (increment) of temperature and heat flow gained from a cross-current-flow heat exchanger of Field type for $K_w/K_z = 20$ and $N_1 = (5-25)$.



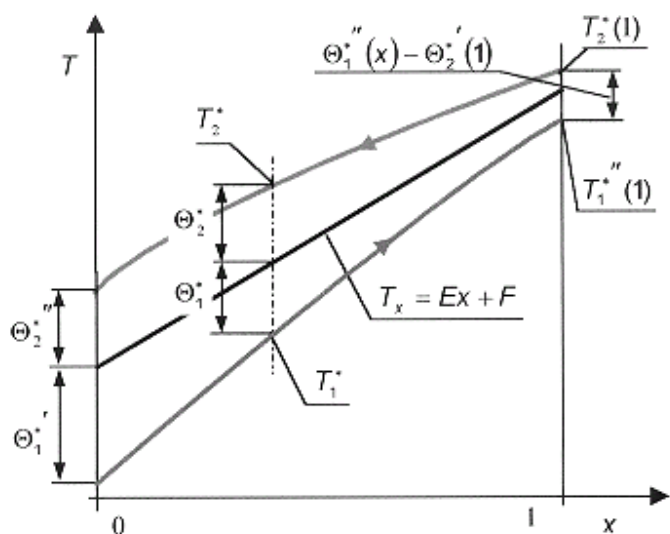
Ryc. 9. Schemat krzyżowoprądowego wymiennika śrubowego
Fig. 9. Scheme of a cross-current heat exchanger with a spiral tube.



Ryc. 10. Przyrost temperatury oraz strumień ciepła uzyskiwany z krzyżowoprądowego śrubowego wymiennika ciepła
Fig. 10. Increase (increment) of temperature and heat flow gained from a cross-current-flow spiral-tube heat exchanger for $\Delta T = (0-70)$ K.



Ryc. 11. Przyrost temperatury oraz strumień ciepła uzyskiwany z krzyżowoprądowego śrubowego wymiennika ciepła
Fig. 11. Increase (increment) of temperature and heat flow gained from a cross-current-flow spiral-tube heat exchanger for $\Delta T = (0-20)$ K.



Ryc. 12. Pole temperatury w wymienniku typu "rura w rurze"
Fig. 12. Temperature profile in double-pipe heat exchanger.

Równania bilansu energii dla rozpatrywanego przypadku można zapisać następująco: written as follows:

$$\dot{W}_1 dT_1 = \dot{W}_3 [T_3'(x) - T_3''(x)] dx \quad (13)$$

Po uwzględnieniu wyrażenia (1) oraz po wprowadzeniu oznaczeń

On the basis of relation (1), and introducing the following signs:

$$R = \frac{\dot{W}_1}{\dot{W}_3} \quad \Theta_1 = T_3' - T_1,$$

wyrażenie (13) przyjmie postać równania różniczkowego rzędu pierwszego

relation (13) is written as the following differential first-order equation:

$$\frac{d\Theta_1}{dx} = -\frac{\phi}{R} \Theta_1 + E \quad (14)$$

z następującym rozwiązaniem ogólnym:

of which the general solution is written as follows:

$$\Theta_1 = C e^{-\frac{\phi}{R} x + E \frac{R}{\phi}} \quad (15)$$

Po wyznaczeniu stałej C z warunku brzegowego, że dla

Determining constant C from the following boundary condition for:

$$x = 0 \quad \Theta_1(o) = T_3^P(o) - T_1'(o) = \Theta_1'$$

zależność (15) przyjmie postać:

relation (15) is written in the following way:

$$\Theta_1 = E \frac{R}{\phi} + \left(\Theta_1' - E \frac{R}{\phi} \right) e^{-\frac{\phi}{R} x} \quad (16)$$

Po prostych przekształceniach zależności (16) można określić przyrost temperatury $T_1'' - T_1'$ co umożliwia określenie strumienia przyjętego ciepła od wody geotermalnej z zależności:

Performing some simple transformations of relation (16), it is possible to determine the temperature rise $T_1'' - T_1'$ that allows, on the basis of the following relation, estimation of the flow of heat taken from geothermal water:

$$\dot{Q}_g = \dot{W}_1 (T_1'' - T_1') = \dot{W}_1 \left[E + \left(\Theta_1' - E \frac{R}{\phi} \right) \left(1 - e^{-\frac{\phi}{R} x} \right) \right] \quad (17)$$

Przykładowe wykresy dla tego typu wymiennika przedstawia ryc. 10 i 11.

Results of the calculations (for this exchanger) are shown in graphs in Figs. 4-8.

WYMIENNIK TYPU RURA W RURZE

DOUBLE-PIPE HEAT EXCHANGER

Istotną, interesującą wielkością jest jednak temperatura nośnika ciepła na wypływie z sondy geotermalnej. Dlatego też należy uwzględnić wymianę ciepła w wymienniku typu rura w rurze, przy pomocy którego nośnik ciepła wydobywany jest na powierzchnię. Rozwiązanie tego zagadnienia przedstawiono w pracy [4].

Układ równań opisujący wymianę ciepła w takim wymienniku (ryc. 12) można zapisać następująco:

The temperature of a heat extraction medium at the outlet of a geothermal heat exchanger is a very interesting parameter. Hence, heat exchange in a double-pipe heat exchanger in which the medium flows up to the surface should be taken into account. The configuration of that case is presented in Fig. 9. The system of equations describing heat exchange in an exchanger of this type (Fig. 10) may be written as follows:

$$\frac{d\Theta_1^*}{dx} = -b\Theta_1^* - a\Theta_2^* + E^* \quad (18)$$

$$\frac{d\Theta_2^*}{dx} = a\Theta_2^* + b\Theta_1^* - E^* \quad (19)$$

Rozwiązanie tego układu równań po zastosowaniu metody d'Alemberta ma postać:

Using d'Alembert's method, the solution of the system of equations is as follows:

$$\Theta_1^* = -C_3 \exp(v_2^2 x) + C_4 \exp(v_1^2 x) \quad (20)$$

$$\Theta_2^* = C_3 \exp(v_2^2 x) - C_4 \exp(v_1^2 x) + \frac{E^*}{a} \quad (21)$$

gdzie:

where

$$v_{1,2}^2 = 0,5 \left(\frac{K_z^*}{\dot{W}_2} \right) \left[-1 + \sqrt{1 + 4 \left(\frac{K_w^*}{K_z^*} \right)} \right], \left(\frac{q}{p} \right)_{1,2} = - (v_{1,2}^2 + b) / a, a = \frac{K_w^*}{\dot{W}_2}, b = \frac{K_z^* + K_w^*}{\dot{W}_2},$$

$$K_z^* = k_z A_z, K_w^* = k_w A_w.$$

Dla określenia pola temperatury w wymienniku typu rura w rurze należy wyznaczyć stałe całkowania C_3 i C_4 wykorzystując zależność (12) przy zapisie niżej podanych warunków brzegowych:

To determine a temperature field in a double-pipe heat exchanger, it is essential to calculate the integration constants C_3 and C_4 . Relation (12) is used to write the following boundary conditions:

· jeżeli $x = 0$ to $\Theta_1^*(0) = \Theta_1^*$

· if $x = 0$, $\Theta_1^*(0) = \Theta_1^*$

· jeżeli $x = 1$ to

· if $x = 1$,

$$T_2^{*'}(1) - T_1^{*''}(1) = \Theta_1^{*'}(1) - \Theta_2^{*''}(1) = \Theta_1^{*'}(0) - \Theta_2^{*''}(0).$$

Strumień ciepła odbieranego przez cały wymiennik ciepła określa zależność:

The following relation determines the heat extracted by the entire heat exchanger:

$$\dot{Q}_g + \dot{W}_2 [\Theta_1^{*'}(0) - \Theta_2^{*''}(0)] = \dot{W}_2 [T_2^{*''}(0) - T_1^{*'}(0)] \quad (22)$$

Results of the calculations (for this exchanger) are shown in graphs in Figs. 11 and 12.

WNIOSKI

CONCLUSIONS

Przedstawione modele obliczeniowe poza, określeniem pola temperatury nośnika ciepła, umożliwiają bezpośrednie porównanie strumienia odbieranego ciepła geotermalnego w samym złożu geotermalnym. Można także przeprowadzić porównanie efektywności pozyskiwania energii geotermalnej z uwzględnieniem warunków wymiany ciepła w wymienniku typu rura w rurze umieszczonym w nieprzepuszczalnym masywie skalnym.

These computational models allow us to compute geothermal heat flows in a deposit in a direct manner. With these models it is possible to determine the temperature profile of a heat extraction medium. Taking into account conditions of heat exchange in a double-pipe heat exchanger immersed in an impervious rock massif, we can also compute the efficiency of heat extraction.

W tym ostatnim przypadku można także przeprowadzić analizę wpływu istotnych parametrów złoża geotermalnego na ilość pozyskiwanej energii geotermalnej z uwzględnieniem parametrów pracy wymiennika znajdującego się na powierzchni Ziemi.

In the last case, computing the influence of the important parameters of a geothermal deposit on the amount of gained geothermal heat is also possible. However, then we should take into account work parameters of the exchanger on the ground surface.

OZNACZENIA

NOTATION

A - powierzchnia wymiany ciepła, [m²]
 $a, b, C, n, q, p, r, R, \phi$ - stałe
 E, F - stałe, [°C]
 k - współczynnik przenikania ciepła, [W/(m²K)]
 T - temperatura, [°C]
 x - współrzędna zredukowana
 α, v - pierwiastki równania algebraicznego
 Θ - różnica temperatur, [K]

A - surface of heat transfer [m²]
 $a, b, C, n, q, p, r, R, \phi$ - constants
 E, F - constants [°C]
 k - heat transfer coefficient [W/(m²K)]
 T - temperature [°C]
 x - reduced coordinate
 α, v - root of an algebraic equation
 Θ - difference of temperature [K]

$\dot{W}$ - strumień pojemności cieplnej czynnika, [W/K]
 $\dot{Q}$ - strumień pozyskiwanego ciepła, [W or kW]

$\dot{W}$ - thermal capacity of heat flow [W/K]
 $\dot{Q}$ - heat extraction rate [W or kW]

LITERATURA

1. Kujawa T., Nowak W., Szaflik W.: Wpływ sposobu rozwiązania geotermalnej sondy pionowej na jej wydajność cieplną, Materiały Konferencyjne X Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998, 551-558
2. Kujawa T., Nowak W.: One-hole systems with injection and production well thermal calculations of heat utilisation. In: Proc. of the Fifth World Renewable Energy Congress, ed. A.A.M. Sayigh, Part IV, pp. 2469-2472, 1998
3. Kujawa T., Nowak W., Szaflik W.: Mathematical model of a geothermal Field exchanger, Archives of Thermodynamics, 20, No. 1-2, 39-50, 1999
4. Kujawa T., Nowak W.: Thermal calculations of geothermal heat utilising one-hole systems with injection and production well, Proceedings of the World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, May 28-June 10, 2000, Editors: Eduardo Iglesias, David Blackwell, Trevor Hunt, John Lund and Shiro Tamanyo, CD Materials, ISBN 0-473-06811-7, pp. 3483-3488

REFERENCES

5. Kujawa T., Nowak W.: Model obliczeniowy geotermalnego krzyżowoprądowego wymiennika Fielda, Materiały Konferencyjne Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej nt Problemy Inżynierii Środowiska - u progu nowego tysiąclecia -, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław-Szklarska Poręba, 5-7 października 2000
6. Madejski J.: Teoria wymiany ciepła, Wyd. Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1998
7. Nowak W.: Obliczanie rekuperatorów z uwzględnieniem strat do otoczenia, Zeszyty naukowe Politechniki Szczecińskiej, Nr 114, Prace monograficzne nr 56, Wyd. Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1969