

УДК 519.673:621.577

**А. Бомба¹, докт. техн. наук; Б.Сидорчук², канд. техн. наук;
О. Присяжнюк³**

¹Рівненський державний гуманітарний університет
²Національний університет водного господарства та природокористування

МОДЕЛЬНІ СИНГУЛЯРНО ЗБУРЕНІ ЗАДАЧІ ПРОЦЕСІВ ВІДБОРУ ҐРУНТОВОГО ТЕПЛА

Резюме. Побудовано математичну модель двовимірного нестационарного процесу конвективно-дифузійного поширення тепла в трубі ґрунтового теплообмінника за умови превалювання конвективних його складових над дифузійними, яка дозволяє отримати розподіл температури теплоносія вздовж трубки теплообмінника та всередині самої трубки. Розвинуто числово-асимптотичний метод для розв'язання відповідної сингулярно збуреної задачі з умовою третього роду на бічній границі. Наведено результати комп'ютерних розрахунків, здійснено їх аналіз.

Ключові слова: асимптотичний метод, конвективний теплообмін, ґрунтовий теплообмінник.

A. Bomba, B. Sydorчук, O. Prisyazhnyuk

MODEL SINGULARLY PERTURBED PROBLEMS OF THE SOIL HEAT SELECTION

Summary. In this paper we considered mathematical modeling of groundwater heat selection using the ground heat exchanger tubes, which has important applications for the solution of design problems of modern heating systems using renewable energy sources. We built a mathematical model of the two-dimensional unsteady convection - diffusion process of heat in a heat exchanger tube soil, under conditions of the prevalence of convective its components over diffusive ones. This let us get the temperature distribution of the coolant along the heat exchanger tubes and within the tube. Thus we assumed homogeneity of the soil structure, the lack of thermal resistance of the wall and ground heat exchanger pressure loss in the tube bends. This model allows to describe processes of heat transfer in both horizontal and vertical heat exchanger.

We built asymptotic expansion of the solution of the corresponding singularly perturbed problem with the condition of the third kind on the side of the boundary (surface of the tube), in which the tube describes the interaction of the heat exchanger with an array of the ground, which laid up. Application of the asymptotic method allowed to split a complex process into its component parts and stand-alone supplement to the convective component solution amendments on the exit from the tube and side adjustments that take into account the influence of ambient temperature.

We performed a series of computer experiments on the results of which we can conclude that the effectiveness of screening low potential ground heat using heat exchanger through the soil for its further use for heating. The fact that the water content of the soil yield a greater increase in heat energy compared with dry sand and clay using horizontal heat exchangers was confirmed. Besides, it was confirmed that vertical heat exchanger is effective for all types of soil, but significant problem is the loss of heat accumulated in depth during the rise of the coolant in the heat exchanger tube through the upper cool layers of the soil.

Key words: asymptotic method, convective heat transfer, soil heat exchanger.

Постановка проблеми. Останні роки довели необхідність використання альтернативних джерел енергопостачання, одними із яких є геотермальні теплові насоси, які дозволяють використовувати пасивну енергію сонця, що акумульована на рівні низькопотенційного тепла 5 – 20⁰ С у ґрунтових водах, водоймах, ґрунті, річках, з перетворенням на вищий енергетичний рівень 50 – 70⁰ С, придатного для потреб опалення та гарячого водопостачання. Ґрунтові теплообмінники використовуються як джерело теплової енергії для геотермальних теплових насосів. Для збору тепла рідина (як правило, водний розчин етиленгліколю) тече по трубі, розташованій у ґрунті або водоймі, і надходить до теплового насосу. Відбір тепла з ґрунту у випадку

горизонтального ґрунтового теплообмінника здійснюється за допомогою прокладеної в ґрунті системи пластикових труб на глибині 1,5–3 метри, а у випадку вертикального – за допомогою довгої U-подібної трубки або кількох таких трубок, що закладені у вертикальну свердловину.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процеси передавання теплової енергії від ґрунту до теплоносія ґрунтового теплообмінника досліджували багато авторів. У більшості випадків труба представляється у вигляді лінійного джерела (приймача) тепла, а розподіл температури описується осесиметричним рівнянням теплопровідності [1–3]. Зокрема, в роботі [2] розглянуто задачу визначення температурного поля масиву ґрунту поблизу горизонтального ґрунтового теплообмінника при його експлуатації, в [3] досліджено вплив кількості і взаємного розміщення труб горизонтального теплообмінника на ефективність відбору ґрунтового тепла. Співвідношення для визначення температури ґрунту за глибиною протягом року, а також модель роботи вертикального ґрунтового теплообмінника запропоновано в роботі [4], а в [5] описана математична модель теплового режиму системи збору низькопотенціального тепла ґрунту, що враховує фазові переходи парової вологи в ґрунті при багаторічній експлуатації.

Оскільки конвективне перенесення тепла в ґрунтовому теплообміннику превалює над дифузійним, що призводить до появи малого параметра при відповідних членах рівняння конвективно-дифузійного теплоперенесення [6], ефективним є застосування асимптотичного методу Вішика-Люстерника [7-8] в модифікації [9-10]. В даній роботі змодельовано сингулярно збурений процес відбору ґрунтового тепла для геотермального теплового насосу.

Мета роботи полягає у побудові асимптотичного розв'язку розв'язків сингулярно збуреної крайової задачі конвективно-дифузійного перенесення тепла з умовою третього роду на бічній границі.

Постановка задачі. Для побудови моделі та задавання початкових і граничних умов ґрунтовий теплообмінник «розігнемо» в пряму.

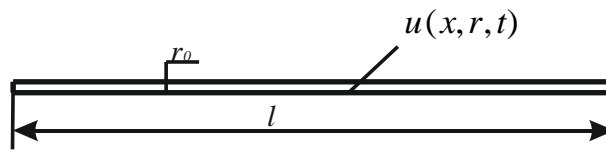


Рисунок 1. Теплообмінник

Figure 1. Heat Exchanger

При цьому приймемо такі припущення: структура ґрунту однорідна в радіальному та вертикальному напрямках; термічним опором стінки ґрунтового теплообмінника нехтуємо; втрати тиску на згинах трубки не враховуємо.

В трубці довжиною l та радіусом r_0 ($r_0 \ll l$) розглядаємо конвективно-дифузійний процес поширення тепла, який описується модельною задачею

$$\varepsilon \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right) - v(x) \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (1)$$

$$u(x, r, t) \Big|_{t=0} = u_0^0(x, r), \quad u(0, r, t) = u_*(r, t), \quad (2)$$

$$\frac{\partial u(x, r, t)}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0, \quad \frac{\partial u(x, r, t)}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad \frac{\partial u(x, r, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = -\alpha(u(x, r_0, t) - u_*(x, t)), \quad (3)$$

де $u(x, r, t)$ – температура в точці з координатою (x, r) відповідної області в момент часу t ; $v(x)$ – швидкість конвективного перенесення; $\varepsilon = a$ – коефіцієнт температуропровідності теплоносія ($a = \frac{\lambda}{\rho c}$, λ – коефіцієнт теплопровідності; ρ – густина; c – теплоємність); ($0 < \varepsilon \ll v^* < v(x)$); $\alpha = \alpha^* \varepsilon^{-1/2}$ – коефіцієнт тепловіддачі; $u_*(x, t)$ – температура зовнішнього середовища. Вважаємо, що всі функції, які фігурують в умовах (2)–(3), є достатньо гладкими та узгодженими між собою вздовж ребер та кутових точок області $D = \{(x, r, t) : 0 \leq x \leq l, 0 \leq r \leq r_0, 0 \leq t \leq T < \infty\}$. Розв’язок отримано у вигляді асимптотичного ряду [9]

$$u(x, r, t) = u_0(x, r, t) + \varepsilon u_1(x, r, t) + \dots + \varepsilon^n u_n(x, r, t) + \Pi_0(\xi, r, t) + \varepsilon \Pi_1(\xi, r, t) + \dots + \varepsilon^{n+1} \Pi_{n+1}(\xi, r, t) + P_0(x, \mu, t) + \dots + \varepsilon^{i/2} P_{i/2}(x, \mu, t) + \dots + \varepsilon^{n+1} P_{n+1}(x, \mu, t) + \Gamma_0(x, \eta, t) + \dots + \varepsilon^{i/2} \Gamma_{i/2}(x, \eta, t) + \dots + \varepsilon^{n+1} \Gamma_{n+1}(x, \eta, t) + R_n(x, r, t, \varepsilon), \quad (4)$$

де $u_i(x, r, t)$ ($i = \overline{0, n}$) – члени відповідних регулярних частин асимптотики, $\Pi_i(\xi, r, t)$ ($i = \overline{0, n+1}$) – функції типу примежового шару в околі $x=l$ (поправки на виході фільтраційної течії із даного пласта G_z); $P_{i/2}(x, \mu, t)$, $\Gamma_{i/2}(x, \eta, t)$ ($i = \overline{0, 2n+1}$) – функції типу примежового шару відповідно в околах $r=0$ та $r=r_0$, $\xi = (l-x) \cdot \varepsilon^{-1}$, $\mu = r \cdot \varepsilon^{\frac{1}{2}}$, $\eta = (r_0 - r) \cdot \varepsilon^{\frac{1}{2}}$ – відповідні регуляризуючі перетворення; R_n – залишковий член.

Підставляючи (4) в (1)–(3) та прирівнявши коефіцієнти при однакових степенях ε , отримуємо задачі для знаходження регулярних частин асимптотики

$$\begin{cases} v(x)u_{i_x}(x, r, t) + u_{i_t}(x, r, t) = g_i(x, r, t), \\ u_i(x, r, 0) = w_i^1(x, r), \quad u_i(0, r, t) = w_i^2(r, t), \end{cases} \quad (5)$$

$$g_0(x, r, t) = 0, \quad w_0^1(x, r) = u_0^0(x, r), \quad w_0^2(r, t) = u_*(r, t), \quad g_i(x, r, t) = u_{i-1,xx}(x, r, t) + u_{i-1,rr}(x, r, t) + \frac{1}{r} u_{i-1,r}(x, r, t), \quad w_i^1(x, r) = 0, \quad w_i^2(r, t) = 0 \quad (i = \overline{1, n}).$$

Розв'язки цих задач, аналогічно до [9], отримуємо у вигляді

$$u_0(x, r, t) = \begin{cases} u_0^0(f^{-1}(f(x)-t), r), & t < f(x), \\ u_*(r, t - f(x)), & t \geq f(x), \end{cases}$$

$$u_i(x, r, t) = \begin{cases} \int_0^t g_i(f^{-1}(f(x)-t+\tilde{t}), r, \tilde{t}) d\tilde{t}, & t < f(x), \\ \int_0^x \frac{g_i(\tilde{x}, r, f(\tilde{x})+t-f(x))}{v(\tilde{x})} d\tilde{x}, & t \geq f(x), \end{cases}$$

де $f(x) = \int_0^x \frac{d\tilde{x}}{v(\tilde{x})}$, $f^{-1}(x)$ – функція, обернена до $f(x)$, яка існує так як підінтегральна функція; $v^{-1}(\tilde{x})$ – неперервно диференційована, обмежена, додатньо визначена.

З метою задовольнити другу із крайових умов будується зовнішня примежова функція $\Pi(\xi, r, t) = \sum_{i=0}^{n+1} \varepsilon^i \Pi_i(\xi, r, t)$ в околі $x=l$ таким чином, щоб функція $u(x, r, t)$ з точністю до $O(\varepsilon^{n+1})$ задовольняла як дане рівняння, так і всі крайові умови. Для цього вводиться заміна (розтяг) $\xi = \varepsilon^{-1}(l-x)$, $x = l - \varepsilon\xi$. Врахувавши співвідношення $\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\frac{1}{\varepsilon}\right)$, $\frac{\partial^2}{\partial x^2} = \frac{1}{\varepsilon^2} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2}$ та розклад функції $v(l - \varepsilon\xi)$ в ряд Тейлора в околі $x=l$, перепишемо оператор $L\Pi = \varepsilon\Delta\Pi - v(l - \varepsilon\xi)\Pi_x - \Pi_t$ у вигляді:

$L\Pi = \varepsilon^{-1}\Pi_{\xi\xi} - \Pi_t + \varepsilon\left[\Pi_{rr} + \frac{1}{r}\Pi_r\right] + v(l - \varepsilon\xi)\varepsilon^{-1}\Pi_\xi$. Прирівнявши в рівності $L(\Pi_0 + \varepsilon\Pi_1 + \dots + \varepsilon^{n+1}\Pi_{n+1})=0$ коефіцієнти при однакових степенях ε , отримаємо рівняння з відповідними умовами для визначення Π_i :

$$\begin{cases} \Pi_{i\xi\xi}(\xi, r, t) + v(l)\Pi_{i\xi}(\xi, r, t) = d_i(\xi, r, t), \\ \Pi_{i\xi}(0, r, t) = v_i(r, t), \Pi_i(\xi, r, t)\Big|_{\xi \rightarrow \infty} \rightarrow 0, \end{cases} \quad (6)$$

$$d_0(\xi, r, t) = 0, \quad d_i(\xi, r, t) = \Pi_{(i-1)t}(\xi, r, t) + \sum_{k=1}^i \frac{(-1)^{i-1}}{i!} \xi^i v^{(i)}(l) \Pi_{(k-i)\xi}(\xi, r, t) \quad (i = \overline{1, n+1}),$$

$$v_i(r, t) = -u_{i\xi}(l, r, t) \quad (i = \overline{0, n}), \quad v_{n+1}(r, t) = 0.$$

Розв'язавши їх, отримаємо

$$\begin{aligned} \Pi_0(\xi, r, t) &= \frac{u_{0\xi}(l, r, t)}{v(l)} e^{-v(l)\xi}, \\ \Pi_1(\xi, r, t) &= \left(\frac{v'(l)u_{0\xi}(l, y, t)}{v^3(l)} - \frac{u_{0\xi t}(l, y, t)}{v^2(l)} + \frac{u_{0\xi}(l, r, t)}{v(l)} \right) e^{-v(l)\xi} + \\ &+ \left(\frac{v'(l)u_{0\xi}(l, r, t)}{2v(l)} \xi^2 + \frac{v'(l)u_{0\xi}(l, r, t)}{v^2(l)} \xi - \frac{u_{0\xi t}(l, r, t)}{v^2(l)} \xi \right) e^{-v(l)\xi}. \end{aligned}$$

З метою задовольнити умови другу і третю з умов (3) будують зовнішні примежові функції $P = \sum_{i=0}^{2n+1} \varepsilon^{i/2} P_{i/2}(x, \mu, t)$ та $\Gamma = \sum_{i=0}^{2n+1} \varepsilon^{i/2} \Gamma_{i/2}(x, \eta, t)$ відповідно. Для цього вводять заміни $\mu = r \cdot \varepsilon^{\frac{1}{2}}$ та $\eta = (r_0 - r) \cdot \varepsilon^{\frac{1}{2}}$. Задачі для знаходження цих функцій отримують аналогічно до того, як це було зроблено для примежової функції Π :

$$\begin{cases} P_{i/2t}(x, \mu, t) = P_{i/2\mu\mu}(x, \mu, t) - v(x)P_{i/2x}(x, \mu, t) + \gamma_{i/2}^1(x, \mu, t), \\ P_{i/2}(x, \mu, 0) = 0, P_{i/2}(0, \mu, t) = 0, P_{i/2\mu}(x, 0, t) = \vartheta_{i/2}^1(x, t), P_{i/2}(x, \mu, t)\Big|_{\mu \rightarrow \infty} = 0, \end{cases} \quad (7)$$

де $\gamma_0^1(x, \mu, t) = 0$, $\gamma_{\frac{1}{2}}^1(x, \mu, t) = 0$, $\gamma_i^1(x, \mu, t) = -P_{\frac{i}{2}-1, xx}(x, \mu, t) - \frac{1}{\mu} P_{\frac{i}{2}-1, \mu}(x, \mu, t)$,

$$i = \overline{2, 2n+1}, \quad \vartheta_{\frac{i}{2}}^1(x, t) = \begin{cases} 0, \text{ якщо } i \text{ непарне,} \\ -u_{\frac{i}{2}}(x, 0, t), \text{ якщо } i \text{ парне; } \vartheta_{n+1}^1(x, t) = 0. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Gamma_{i/2t}(x, \eta, t) = \Gamma_{i/2\eta\eta}(x, \eta, t) - v(x)\Gamma_{i/2x}(x, \eta, t) + \gamma_{i/2}^2(x, \eta, t), \\ \Gamma_{i/2}(x, \eta, 0) = 0, \Gamma_{i/2}(0, \eta, t) = 0, \Gamma_{i/2\eta}(x, 0, t) = \vartheta_{i/2}^2(x, t), \Gamma_{i/2\eta}(x, \eta, t)\Big|_{\eta \rightarrow \infty} = 0, \end{cases} \quad (8)$$

де $\gamma_0^2(x, \eta, t) = 0$, $\gamma_1^2(x, \eta, t) = \frac{1}{r_0} \Gamma_{0\eta}(x, \eta, t)$, $\gamma_i^2(x, \eta, t) = \sum_{k=1}^i \frac{(-1)^k \mu^k}{r_0^{k+1}} \Gamma_{\left(\frac{i-k}{2}\right)\eta}(x, \eta, t) -$
 $- \Gamma_{\left(\frac{i-1}{2}\right)x}(x, \eta, t)$, $i = \overline{2, 2n+1}$, $\vartheta_0^2(x, t) = \alpha^*(u_0(x, r_0, t) + \Gamma_0(x, 0, t) - u_*(x, t)) - u_{0\eta}(x, r_0, t)$,

$$\vartheta_i^2(x, t) = \begin{cases} \alpha^* \left(\Gamma_i(x, 0, t) \right), \text{ якщо } i \text{ не парне,} \\ \alpha^* \left(u_i(x, r_0, t) + \Gamma_i(x, 0, t) \right) - u_i(x, r_0, t), \text{ } i \text{ парне;} \end{cases} \quad \vartheta_{n+1}^2(x, t) = \alpha \Gamma_{n+1}(x, 0, t).$$

Наведемо схему знаходження поправки $\Gamma_0(x, \eta, t)$. Введемо в області $\left\{ (x, \eta, t) : 0 \leq x \leq l, 0 \leq \eta \leq \frac{r_0}{\sqrt{\varepsilon}}, 0 \leq t \leq T \right\}$ рівномірну сітку $\left\{ (x_j, \eta_m, t_k) : x_j = j \cdot \Delta x; \eta_m = m \cdot \Delta \eta; t_k = k \cdot \Delta t \right\}$, де $\Delta x = \frac{l}{N}$, $\Delta \eta = \frac{r_0}{M \sqrt{\varepsilon}}$, $\Delta t = \frac{T}{K}$, $j = \overline{1, N}$, $m = \overline{1, M}$, $k = \overline{1, K}$. Після цього застосуємо до задачі (8) апроксимацію за різницевою схемою

$$\begin{cases} \Gamma_{j,1}^k - (1 + \alpha \Delta \eta) \Gamma_{j,0}^k = -\delta(x_j, t_k), \Gamma_{j,M}^k - \Gamma_{j,M-1}^k = 0, \Gamma_{j,m}^0 = 0, \Gamma_{0,m}^k = 0, \\ \frac{\Gamma_{j,m}^k - \Gamma_{j,m}^{k-1}}{\Delta t} = \frac{\Gamma_{j,m+1}^k - 2\Gamma_{j,m}^k + \Gamma_{j,m-1}^k}{(\Delta \eta)^2} - v(x_j) \frac{\Gamma_{j,m}^k - \Gamma_{j-1,m}^k}{\Delta x}, \end{cases}$$

де $\Gamma_{j,m}^k = \Gamma_0(x_j, \eta_m, t_k)$, $\delta(x_j, t_k) = \square \eta \alpha^*(u_0(x_j, r_0, t_k) - u_*(x_j, t_k)) - u_{0\eta}(x_j, r_0, t_k)$, $j = \overline{1, N}$, $m = \overline{1, M}$, $k = \overline{1, K}$.

Результати числових розрахунків. Наведемо результати комп'ютерного експерименту, вважаючи, що трубка ґрунтового теплообмінника радіусом $r_0 = 0,02$ м заповнена водним розчином етиленгліколю, властивості якого: коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 0,43$ Вт/м·с, густина $\rho = 1060$ кг/м³, теплоємність $c = 3,31$ кДж/кг. Отже, $\varepsilon = a = 0,12 \cdot 10^{-3}$ м²/с. Швидкість перенесення теплоносія в трубці теплообмінника $v(x) = 1$ м/с. Прийmemo, що початковий розподіл температури в трубці $u_0^0(x, r) = 0^\circ\text{C}$, а на вході надходить теплоносій з температурою $u_*(r, t) = 0^\circ\text{C}$.

У випадку горизонтального теплообмінника, розташованого нижче глибини промерзання ґрунту, розрахунки проводили за температури ґрунту $u_*^* = 6^\circ\text{C}$.

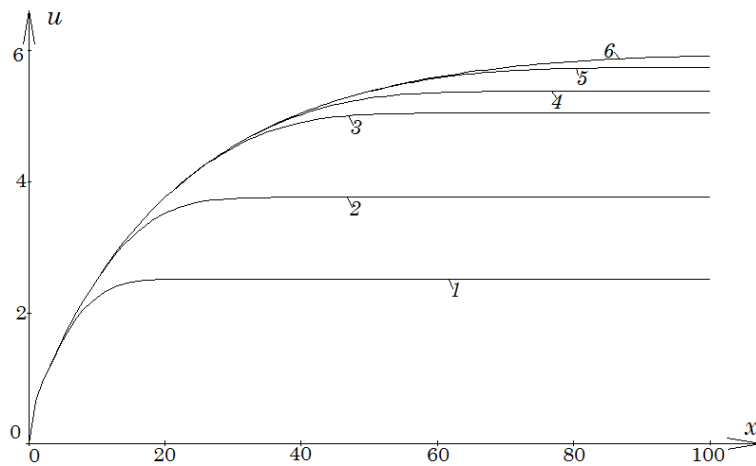


Рисунок 2. Розподіл температури на поверхні трубки горизонтального теплообмінника

Figure 2. Temperature distribution on the surface of a tube of the horizontal heat exchanger

Зростання температури $u(x, r_0, t)$ горизонтального теплообмінника довжиною $l = 100$ м за рахунок відбору ґрунтового тепла в моменти часу 10 с, 20 с, 40 с, 50 с, 70 с та 100 с (криві 1–6 відповідно) при $\alpha = 10 \text{ Вт/м}^2$ (сухий піщаний ґрунт) зображено на рис.2.

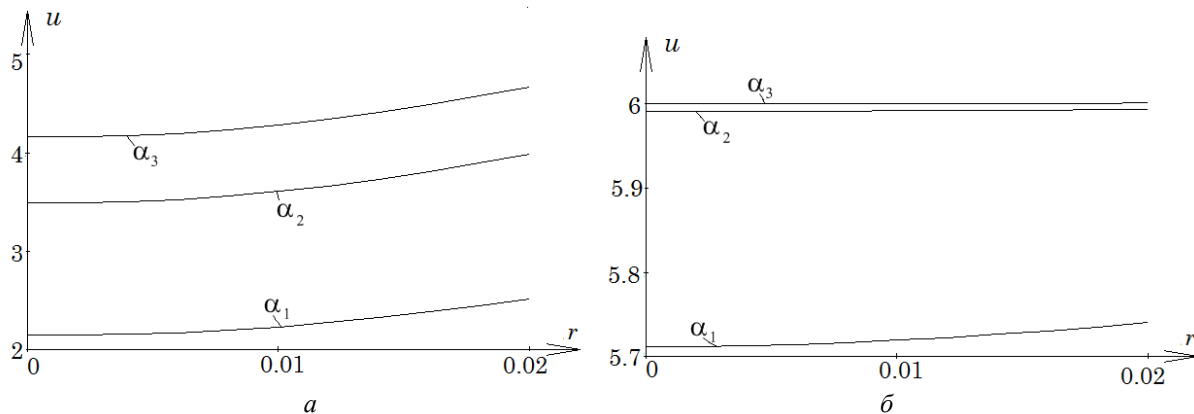


Рисунок 3. Залежність розподілу температури від коефіцієнта тепловіддачі

Figure 3. Dependence of the temperature distribution on the heat transfer coefficient

На рис.3. проілюстровано розподіл температури вздовж радіальної координати трубки теплообмінника на виході в моменти часу $t = 2$ с (рис.3,а) та $t = 40$ с (рис.3,б) для різних типів ґрунтів, яким відповідають різні коефіцієнти тепловіддачі: $\alpha_1 = 10-15 \text{ Вт/м}^2$ – сухий піщаний ґрунт, $\alpha_2 = 20-25 \text{ Вт/м}^2$ – сухий глинястий ґрунт, $\alpha_3 = 30-35 \text{ Вт/м}^2$ – ґрунт з ґрунтовими водами.

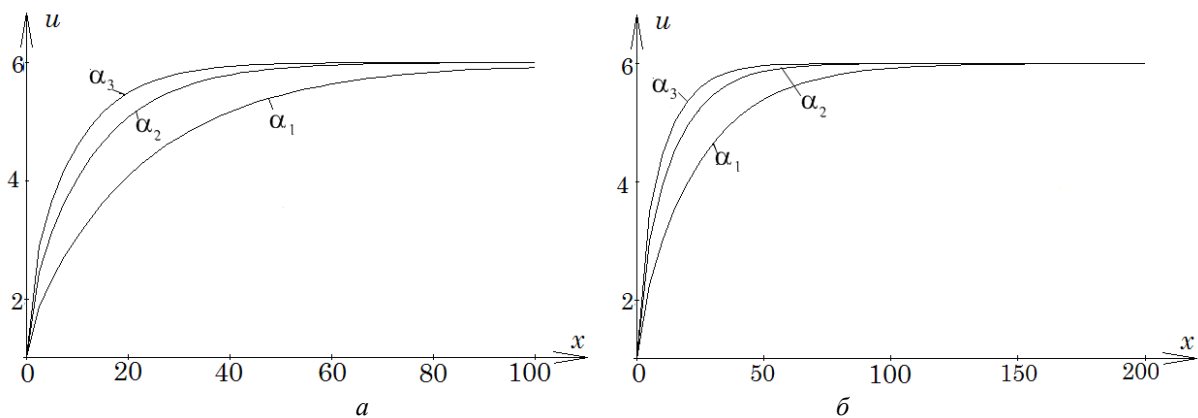


Рисунок 4. Розподіл температури в трубках різної довжини

Figure 4. Temperature distribution in tubes of different length

Розподіл температури на поверхні трубки теплообмінника довжиною $l = 100$ м (рис.4 а) та $l = 200$ м (рис.4 б) для різних типів ґрунтів проілюстровано на рис.4. Як бачимо з графіків, збільшення приросту теплової енергії є суттєвим на ділянці трубки до 100–120 м залежно від типу ґрунту (чим вища теплопровідність ґрунту, тим меншої довжини теплообмінник потрібно використовувати). В ґрунті з ґрунтовими водами теплоносій у трубці встигає прогрітися при довжині теплообмінника 50–60 м.

У випадку вертикального теплообмінника необхідно задати співвідношення для визначення температури ґрунту за глибиною в конкретний момент часу, як це зроблено, наприклад, в [1,4]. Прийнемо, що функція залежності температури ґрунту від глибини у визначений день року описується законом $u_*^*(x) = \beta_0 + \beta_1 x(l-x) + \beta_3 x^3(l-x)^3 + \dots + \beta_{2i+1} (x(l-x))^{(2i+1)} + \dots$, де β_i визначаються шляхом апроксимації експериментальних даних вимірювання температури ґрунту. Розрахунки проводили при таких значеннях: $\beta_0 = 2$, $\beta_1 = 2 \cdot 10^{-3}$, $\beta_3 = 2 \cdot 10^{-5}$, $\beta_5 = \dots = \beta_{2i+1} = \dots = 0$ (рис.5) в припущенні відсутності теплообміну між частинами трубки, що розташовані поряд.

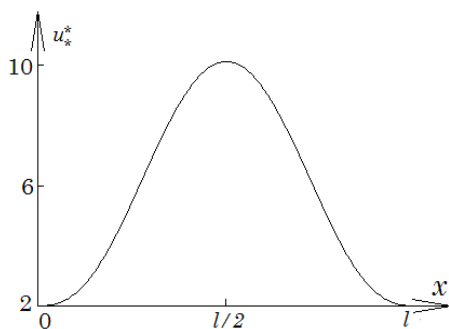


Рисунок 5. Функція визначення температури ґрунту за глибиною

Figure 5. The function of determining the temperature according to the soil depth

На рис.6 наведено розподіл температури $u(x, r_0, t)$ вертикального теплообмінника довжиною $l = 100$ м в моменти часу 10 с, 20 с, 40 с, 50 с, 70 с та 100 с (криві 1–6 відповідно) при $\alpha = 10$ (Bm / m^2).

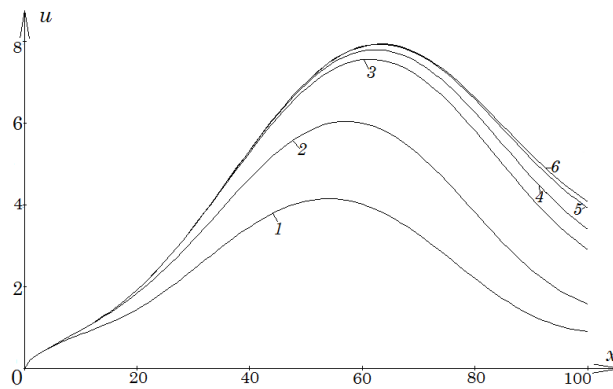


Рисунок 6. Розподіл температури на поверхні трубки вертикального теплообмінника

Figure 6. Temperature distribution on the surface of the vertical heat exchanger tube

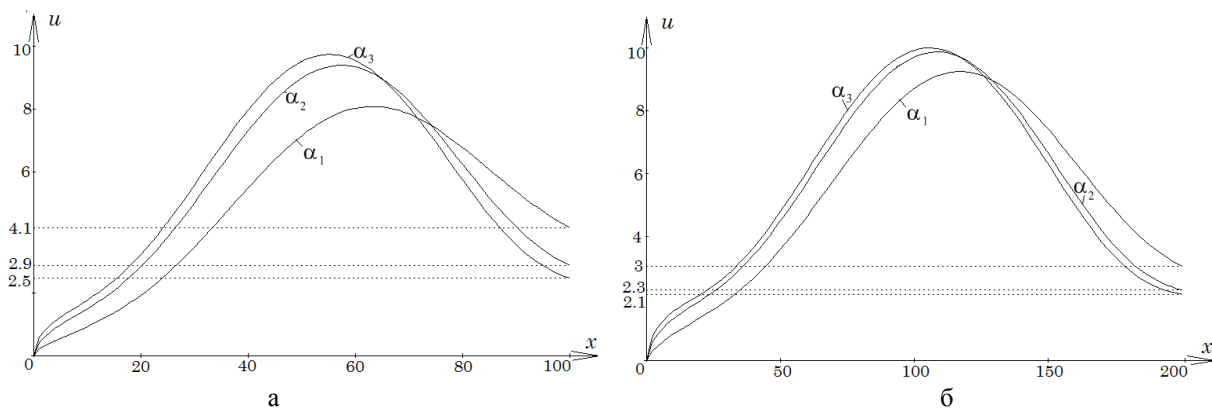


Рисунок 7. Розподіл температури в трубках вертикального теплообмінника різної глибини

Figure 7. Temperature distribution in the tubes of vertical heat exchanger of different depth

Якщо у випадку горизонтального теплообмінника високе значення тепловіддачі ґрунту дає більшу температуру теплоносія на виході, то у випадку ґрунтового теплообмінника вертикального типу кращі показники ефективності відбору ґрунтового тепла у теплообмінника меншої глибини (рис.7,а), закладеного в ґрунт з меншою провідністю, оскільки при підйомі нагрітого на глибині теплоносія через холодні верхні шари ґрунту частина тепла віддається теплообмінником назад у зовнішнє середовище. Оскільки глибина проникнення сезонних коливань температури складає близько 10–15 м, ефективним вирішенням цієї проблеми може бути теплоізоляція трубки теплообмінника у верхніх шарах ґрунту.

Висновки. Побудовано математичну модель, яка дозволяє розрахувати розподіл температури в трубці теплообмінника з урахуванням конвективно-дифузійного процесу поширення тепла. За результатами чисельних розрахунків отримано, як і очікувалося, що ґрунти з умістом води дозволяють отримати більший приріст теплової енергії порівняно із сухими піщаними та глинястими. Зі збільшенням довжини трубки горизонтального теплообмінника відбувається приріст теплової енергії, але при перевищенні деякого критичного значення суттєвого приросту не спостерігається, однак збільшуються витрати електричної енергії на перекачування рідини по трубці. Вертикальний теплообмінник є ефективним у всіх типах ґрунтів, однак суттєвою проблемою є втрата накопиченого на глибині тепла під час підйому теплоносія по трубці теплообмінника через верхні холодні шари ґрунту.

Conclusions. The mathematical model that allows us to calculate the temperature distribution in a tube of heat exchanger considering convection – diffusion process of heat has been analysed in the paper. Basing on the results of the numerical calculations it was testified as it was expected, that the water content of the soil yield a greater increase in heat energy compared with dry sand and clay. With the increase of the horizontal heat exchanger tube

length there occurs heat gain, but when a certain critical value is exceeded, substantial increase wasn't observed, but the cost of electricity for pumping the fluid through the tube is increased. Vertical heat exchanger is effective for all types of soil, but significant problem is the loss of heat accumulated in depth during the rise of the coolant in the heat exchanger tube through the upper cool layers of the soil.

Список використаної літератури

1. Костиков, А.О. Влияние теплового состояния грунта на эффективность теплонасосной установки с грунтовым теплообменником [Текст] / А.О. Костиков, Д.Х. Харлампиди // Энергетика: економія, технологія, екологія – №1. – 2009. – С.32–40.
2. Тарасова, В.А. Моделирование тепловых режимов совместной работы грунтового теплообменника и теплонасосной установки [Текст] / В.А. Тарасова, Д.Х. Харлампиди, А.В. Шерстюк // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 5/8 (53). – С. 34–40.
3. Тарасов, О.І. Вплив кроку між трубами колектора на ефективність горизонтального грунтового теплообмінника [Текст] / О.І. Тарасов, В.О. Тарасова, І. В. Добрянська // Вісник НТУ «ХПІ». – 2011. – №53. – С.133–139.
4. Кідрук, М.І. Моделювання та оптимізація систем тепlopостачання будівель з використанням відновних джерел енергії. Частина 1: Моделювання теплового режиму будинку [Текст] / М.І. Кідрук. // Нова тема. – 2007. – №4. – С. 13–16.
5. Васильев, Г.П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергией поверхностных слоёв земли [Текст] / Г.П. Васильев. – М.: Граница, 2006. – 176 с.
6. Bobisud, L.E. Parabolic Equations with a Small Parameter and discontinuous Data / L.E. Bobisud // Journal of mathematical analysis and applications. – 1969 – Vol. 26 – P. 208–220.
7. Вишик, М.И. Регулярное вырождение и пограничный слой для линейных дифференциальных уравнений с малым параметром [Текст] / М.И. Вишик, Л.Я. Люстерник // Успехи математических наук. – 1957. – №12 – Вып. 5. – С.3–122.
8. Васильева, А.Б. Асимптотические методы в теории сингулярных возмущений [Текст] / А.Б. Васильева, В.Ф. Бутузов. – М.: Высшая школа, 1980. – 208с.
9. Бомба, А.Я. Нелінійні сингулярно збурені задачі типу «конвекція-дифузія» [Текст] / А.Я. Бомба, С.В. Барановський І.М. Присяжнюк.– Рівне: НУВГП, 2008. – 254 с.
10. Бомба, А.Я. Об асимптотическом методе приближенного решения одной задачи массопереноса при фильтрации в пористой среде [Текст] / А. Я. Бомба // Укр. матем. журн. – 1982. – Т.4, №4. – С. 493–496.

Отримано 07.02.2014