

Б.В. Моркляник, к. т. н., доцент
(Национальный университет «Львовская политехника»),
В.С. Андреев, к. т. н., доцент
(ДНУЖТ)

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ОСНОВАНИИ U-ОБРАЗНОГО КОЛЛЕКТОРА ТЕПЛООВОГО НАСОСА

В статті представлені результати теоретичних досліджень, спрямованих на виявлення закономірностей зміни теплової енергії в основі U - образного ґрунтового колектора теплового насоса. Зроблено висновок про те, що потік енергії через стінку шпари колектора істотно залежить від її діаметра й теплофізичних властивостей ґрунту, у якому вона влаштована.

CONFORMITIES TO LAW OF CHANGE THERMAL ENERGY ARE IN FOUNDATION OF U- VIVID OF COLLECTOR OF HEAT-PUMP

The results of theoretical researches, directed on the exposure of conformities to law of change thermal energy in foundation of U – vivid ground collector of heat-pump are presented in the article. A conclusion is done that the stream of energy through the wall of mining hole of collector substantially depends on its diameter and thermophysical properties of soil which it is arranged in

При написании настоящей статьи преследовалась цель выполнить теоретические исследования процесса изменения тепловой энергии в ґрунтовом основании U – образного колектора теплового насоса [1, 2, 3].

В данном конкретном случае в первом приближении температурное поле в основании можно представить в виде суперпозиции двух тепловых полей – поля, обусловленного сезонным изменением температуры на дневной поверхности основания и поля, причиной появления которого является теплообмен между U – образным колектором и ґрунтовым основанием.

Первая задача рассмотрена и решена авторами работ.

Вторая задача исследований (рис. 1, 2) была сформулирована так.

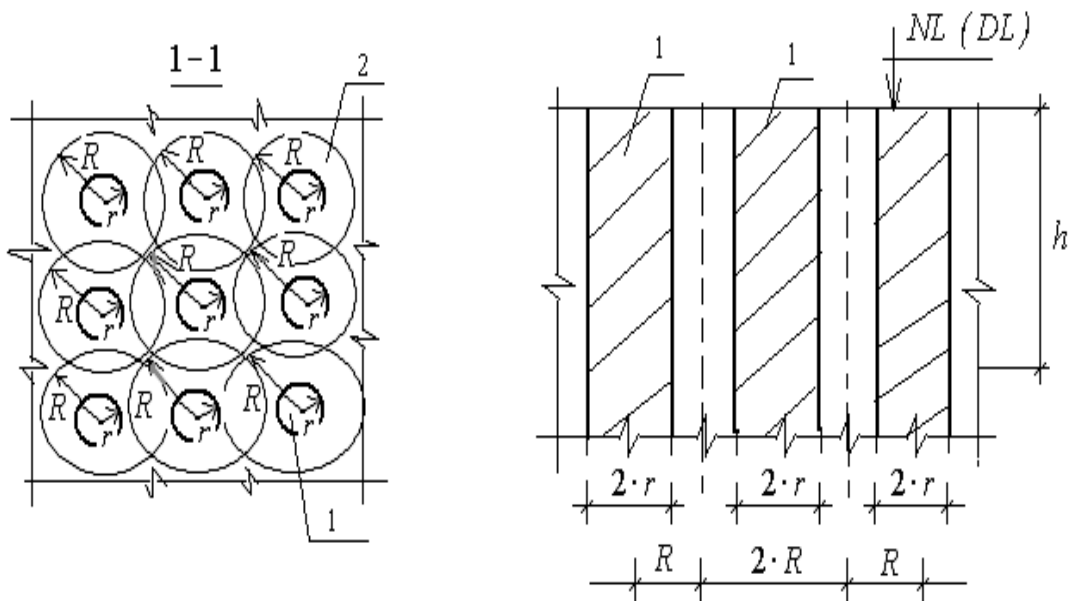
1. Известны радиус скважины U – образного колектора r и радиус зоны влияния R (теоретически радиус зоны влияния для одиночной скважины равен бесконечности).

2. Известна глубина h , на которой требуется определить температуру и тепловую энергию.

3. Известны температуры $T_v(t)$ и $T_r(t)$ соответственно на верхней границе ґрунтового основания и на стенке скважины U – образного колектора (рис.2).

4. На границе зоны влияния (рис.2) температурный градиент $\frac{\partial T(\rho, t)}{\partial \rho} \Big|_{\rho = R} = 0$ равен нулю.

5. Известно распределение температуры в основании по глубине $T_0(z)$ в момент времени $t = 0$ (в том числе, температура при $z = h$, см. рис.2).



1 – скважина коллектора; 2 – зона влияния коллектора; r – радиус скважины коллектора; R – радиус зоны влияния коллектора; h – глубина, на которой определяется температурное поле и изменение тепловой энергии.

Рис. 1 – Расположение скважин коллекторов тепловых насосов в плане (схема).

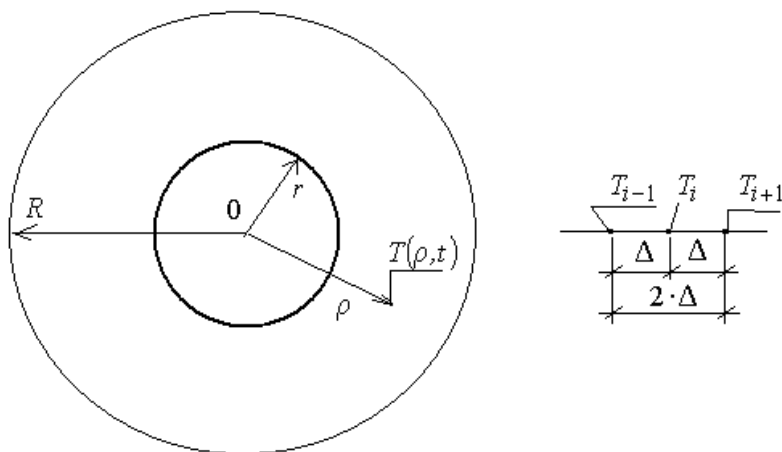


Рис. 2 – К решению задачи об изменении тепловой энергии в грунтовом основании U – образного коллектора теплового насоса (схема).

1. Известны плотность ρ и теплофизические характеристики основания (т.е. его удельная теплоемкость c_p и коэффициент теплопроводности λ).

2. Требуется определить, на сколько за некоторый расчетный период времени t_0 изменится тепловая энергия основания.

Решение имеет вид:

$$T(z, t) = T_0 \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{\sqrt{a \cdot t}}\right) + \frac{1}{2} \cdot \frac{x}{\sqrt{a \cdot \pi}} \cdot \int_0^t \frac{T_v(\xi)}{\sqrt{(t-\xi)^3}} \cdot \exp\left[-\frac{z^2}{4 \cdot a \cdot (t-\tau)}\right] \cdot d\xi,$$

(1)

где $T_v(t) = \sum_{i=0}^4 a_i \cdot T_i^*(\xi)$; $\xi = \frac{t}{12}$, – температура грунтового основания на его

дневной поверхности; $T_i^*(x)$ – смещенные полиномы Чебышева первого рода ; a_i - установленные с использованием метода наименьших квадратов коэффициенты аппроксимации фактических зависимостей “температура дневной поверхности – время” для городов Днепропетровска и Львова. Численные значения коэффициентов представлены в таблице 1. Здесь $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$

Таблица 1 – Коэффициенты a_i

Коэффициенты	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
Днепропетровск	5,377	1,915	-10,393	-6,246	5,319
Львов	7,135	0,359	-9,513	-5,309	4,649

Согласно [2], с математической точки зрения задача исследований сводится к решению уравнения теплопроводности вида

$$a \cdot \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial T}{\partial \rho} \right\} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

при выполнении начального и граничных условий (рис. 2):

$$\left. \begin{aligned} T(r, t) &= T_r(t); \\ \frac{\partial T(\rho, t)}{\partial \rho} \Big|_{\rho=R} &= 0; \\ T(0, \rho) &= T_0 = const, \quad \rho \in (r, R). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Затем следует вычислить интеграл вида

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \lim_{\rho \rightarrow r_0} \int_0^t \lambda(\rho) \cdot \frac{\partial T(\rho, \xi)}{\partial \rho} \cdot d\xi \quad (4)$$

Здесь Q - либо "закачанная" в основание за некоторое время t тепловая энергия при работе теплового насоса в режиме кондиционирования, либо "извлеченная" из него за время t тепловая энергия при работе теплового насоса в режиме отопительного прибора, отнесенная к одному погонному метру скважины коллектора.

В ходе решения (2) при учете граничных условий (3) был использован численный метод коллокации. При этом по формулам

$$\frac{\partial T(\rho, t)}{\partial \rho} \approx \frac{T(\rho_i, t) - T(\rho_{i+1}, t)}{\rho_i - \rho_{i+1}} = \frac{T_{i+1}(t) - T_i(t)}{\Delta \rho};$$

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial T(\rho, t)}{\partial \rho} \approx \frac{2}{\rho_i + \rho_{i+1}} \cdot \frac{T(\rho_i, t) - T(\rho_{i+1}, t)}{\rho_i - \rho_{i+1}} = \frac{2}{\rho_i + \rho_{i+1}} \cdot \frac{T_{i+1}(t) - T_i(t)}{\Delta};$$

$$\text{и } \frac{\partial^2 T(\rho, t)}{\partial \rho^2} \approx \frac{T(\rho_{i+1}, t) - 2 \cdot T(\rho_i, t) + T(\rho_{i-1}, t)}{(\rho_i - \rho_{i+1})^2} = \frac{T_{i+1}(t) - 2 \cdot T_i(t) + T_{i-1}(t)}{\Delta^2}$$

выполнялась дискретизация левой части дифференциального уравнения в частных производных (2), а само уравнение приводилось к системе обыкновенных дифференциальных уравнений в обыкновенных производных вида:

$$\frac{dT_i}{dt} = a \cdot \left[\frac{T_{i+1}(t) - 2 \cdot T_i(t) + T_{i-1}(t)}{\Delta^2} + \frac{2}{\rho_i + \rho_{i+1}} \cdot \frac{T_{i+1}(t) - T_i(t)}{\Delta \rho} \right], \quad (5)$$

для решения которой был использован процесс итерации Пикара [4].

В ходе решения задачи было установлено следующее.

1. Поток тепловой энергии через стенку скважины U – образного коллектора теплового насоса существенно зависит от ее радиуса r .

2. Поток тепловой энергии через стенку скважины U – образного коллектора теплового насоса существенно зависит от радиуса зоны влияния R .

3. Поток тепловой энергии через стенку скважины U – образного коллектора теплового насоса существенно зависит от плотности и теплофизических свойств грунта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черная К. В. Использование конструкций фундаментов глубокого заложения при извлечении геотермальной энергии // Світ геотехніки. – 2006. – №1. – С. 27-31.
2. Шаповал В.Г. Основания и фундаменты тепловых насосов / В.Г. Шаповал, Б.В. Моркляник. – Львов: Сполум. – 2009. – 64 с.
3. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел / Э.М. Карташов. - М.: Высш. шк., 1985. - 480 с.
4. Корн Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. - М.: Наука, 1974. - 840 с.

