

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В ГРУНТОВОМ ОСНОВАНИИ U-ОБРАЗНОГО КОЛЛЕКТОРА ТЕПЛООВОГО НАСОСА

Моркляник Б.В.

Национальный университет «Львовская политехника»
г. Львов, Украина

Андреев В.С.

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта

Шаповал В.Г., Фартушный А.С.

Государственное Высшее учебное заведение «Национальный горный университет»
г. Днепропетровск, Украина

АННОТАЦИЯ: У статті представлено результати теоретичних досліджень, направлених на виявлення закономірностей розподілу теплових полів в ґрунтовій основі U - образних зондів теплових насосів. Показано що в даному випадку в теплообмін вволікаються значні об'єми ґранту. Цей факт слід враховувати при проектуванні основ будинків і споруд.

АННОТАЦИЯ: В статье представлены результаты теоретических исследований, направленных на выявление закономерностей сезонного изменения тепловых полей в грунтовом основании U - образных зондов тепловых насосов. Показано, что при этом в теплообмен вовлекаются значительные объемы грунта. Этот факт обязательно следует учитывать при проектировании оснований фундаментов зданий и сооружений

ABSTRACT: The results of theoretical researches, directed on the exposure of conformities to law of seasonal change of the thermal fields in the ground foundation are presented in the article. It is rotined that the calculation values of temperatures on the different depths of the ground layer have good accordance with their actual values.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Насос, коллектор, тепловое поле.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В последнее время в промышленно-развитых странах происходит бурное развитие технологии отопления зданий и сооружений с использованием т.н. грунтовых тепловых насосов, коллекторы которых размещают либо в основаниях, либо в фундаментах. Об актуальности данного направления свидетельствует тот факт, что пленарный доклад на указанную тему на 14 дунайской европейской конференции был доложен первым [1].

При написании настоящей статьи преследовалась цель установить закономерности распределения тепловых полей в грунтовом основании U - образных зондов тепловых насосов.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ, В КОТОРЫХ ПОЛОЖЕНО НАЧАЛО РЕШЕНИЮ ДАННОЙ ПРОБЛЕМЫ

U-образные зонды грунтовых тепловых насосов являются одним из основных типов теплообменников [2]. В этой связи в литературе имеется большое число публикаций, посвященных исследованию тепловых в их основании [3, 4]. При этом при их определении с использованием методов математического моделирования был использован метод сеток (конечных разностей) [5]. Недостатком этого подхода для решения практических задач является проблема удовлетворения граничным условиям на бесконечности. В этой связи представляет интерес решения рассматриваемой задачи с использованием метода источников [6].

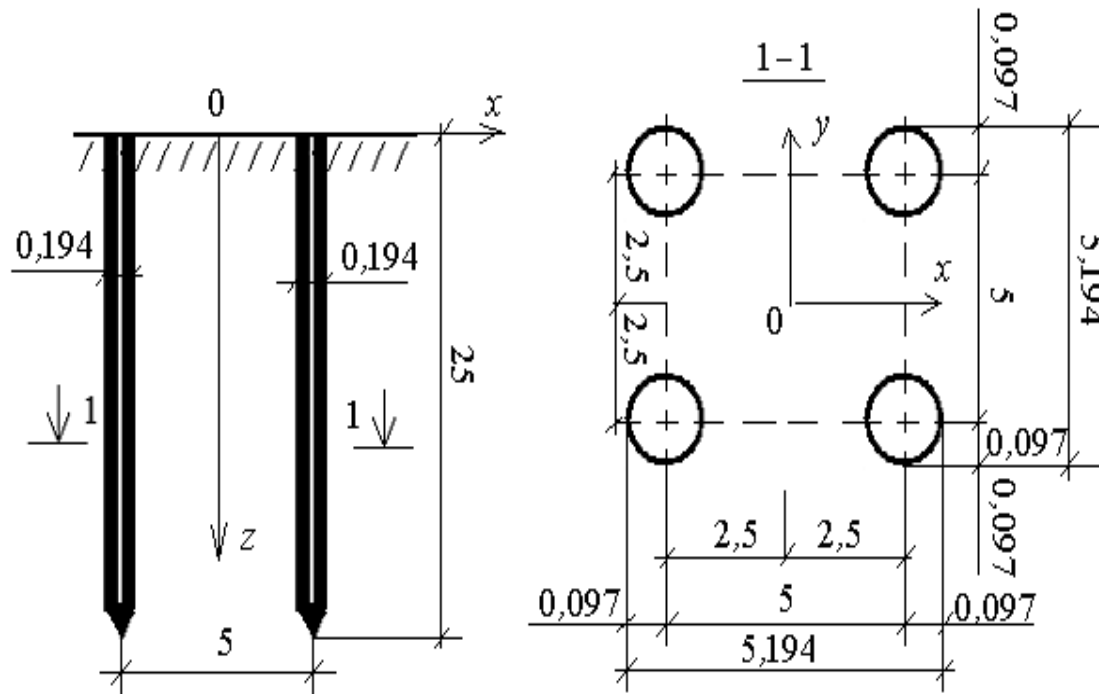
На решение очерченной проблемы и направлены изложенные ниже материалы теоретических исследований.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Задача исследований была сформулирована так. Известен закон изменения во времени температуры основания, обусловленный ее сезонными колебаниями [7, 8].

Известно распределение температуры в основании по глубине $T_0(z)$ в момент времени $t=0$. Известны плотность ρ и теплофизические характеристики основания (т.е. его удельная теплоемкость c_p и коэффициент теплопроводности λ , табл. 1).

Известны количество и размеры коллекторов тепловых насосов, а также их расположение в плане и по глубине (рис. 1).



Примечание. Размеры даны в метрах.

Рис. 1. К расчету теплового поля в основании четырех u-образных зондов

Цель работы - требуется определить теоретический закон распределения температуры в грунтовом основании.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим задачу о распределении температурных полей в основании четырех U-образных коллекторов, длина которых равна 25 метров, работающего в режимах кондиционирования, отопления а также в реверсном режиме плоского теплового насоса (рис. 1). В качестве исходных примем изложенные в табл. 1 данные.

Таблица 1

Значения теплофизических свойств основания

№ пп.	Удельный вес $\gamma \frac{\kappa H}{\text{м}^3}$	Удельная теплоем- кость $c_p, \frac{\kappa Дж}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	Кoeff. теплопровод- ности $\lambda, \frac{\text{вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$
1	15,50...20,00	0,50...2,00	0,50...2,00

Далее рассчитаем тепловое поле в грунтовом основании U-образного зонда длиной h и радиусом R . При этом не будем учитывать обусловленные природными условиями колебания температуры. В качестве фундаментального используем полученное нами решение (формула (64) в работе [8]).

Далее положим в (64) $dQ = q_w(\tau) \cdot r_1 \cdot dr_1 \cdot d\xi$, а вместо радиуса r подставим разность расстояний между радиусом r_1 , на расстоянии которого от центра находится рассматриваемая точка и радиусом r , на расстоянии которого от центра производится расчет температурного поля. После этого проинтегрируем полученное таким образом выражение в пределах $\xi \in (0, h)$ и $r_1 \in (0, R)$. Имеем:

$$T_U(r, z, t) = \int_0^h \left\langle \int_0^R \int_0^t \left\{ k(\tau) \cdot f_0 \cdot [f_1 - f_2] \cdot d\tau \right\} \cdot r_1 \cdot dr_1 \right\rangle d\xi; \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} f_0 &= \exp \left[-\frac{(r - r_1)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right]; \quad f_1 = \exp \left[-\frac{(z - \xi)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right]; \\ f_2 &= \exp \left[-\frac{(z + \xi)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right]; \quad k(\tau) = \frac{q_w(\tau)}{\rho \cdot c_p \cdot \sqrt{(\pi \cdot a \cdot t)^3}}. \end{aligned} \right\}$$

Выполнив в (1) процедуру интегрирования, найдем:

$$T_U(r, z, t) = \int_0^t k(t, \tau) \cdot [f_1 \cdot (f_2 + f_3) + f_4 \cdot (f_5 + f_6)] \cdot (f_6 + f_6 + f_6) d\tau; \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= 2 \cdot a \cdot (t - \tau); \quad f_2 = \exp\left(-\frac{r^2}{a_1}\right); \quad f_3 = -\exp\left[-\frac{(R-r)^2}{a_1}\right]; \\ f_4 &= r \cdot \sqrt{\pi \cdot a \cdot (t - \tau)}; \quad f_5 = \operatorname{erf}\left(\frac{r}{\sqrt{a_1}}\right); \quad f_6 = \operatorname{erf}\left(\frac{R-r}{\sqrt{a_1}}\right); \\ f_7 &= -\operatorname{erf}\left(\frac{z-h}{\sqrt{a_1}}\right); \quad f_8 = -\operatorname{erf}\left(\frac{z+h}{\sqrt{a_1}}\right); \quad f_9 = \operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{a_1}}\right); \\ a_1 &= 4 \cdot a \cdot (t - \tau); \quad k(t, \tau) = \frac{q_w(\tau)}{8 \cdot \rho \cdot c_p \cdot a \cdot (t - \tau) \sqrt{\pi}}. \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Далее перейдем к декартовой системе координат. Для этого положим в (2) $r = \sqrt{x^2 + y^2}$. Имеем:

$$\left. \begin{aligned} T_U(x, y, z, t) &= \int_0^t k(t, \tau) \cdot \left[\begin{aligned} &f_1 \cdot (f_2 + f_3) + \\ &+ f_4 \cdot (f_5 + f_6) \end{aligned} \right] \cdot (f_7 + f_8 + f_9) d\tau; \\ f_1 &= 2 \cdot a \cdot (t - \tau); \quad f_2 = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{a_1}\right); \\ f_3 &= -\exp\left[-\frac{\left(R - \sqrt{x^2 + y^2}\right)^2}{a_1}\right]; \\ f_4 &= r \cdot \sqrt{\pi \cdot a \cdot (t - \tau)}; \quad f_5 = \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{a_1}}\right); \\ f_6 &= \operatorname{erf}\left(\frac{R - \sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{a_1}}\right); \quad f_7 = -\operatorname{erf}\left(\frac{z-h}{\sqrt{a_1}}\right); \\ f_8 &= -\operatorname{erf}\left(\frac{z+h}{\sqrt{a_1}}\right); \quad f_9 = \operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{a_1}}\right); \quad a_1 = 4 \cdot a \cdot (t - \tau); \\ k(t, \tau) &= \frac{q_w(\tau)}{8 \cdot \rho \cdot c_p \cdot a \cdot (t - \tau) \sqrt{\pi}}. \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Температуру основания в расчетной точке основания с координатами (x, y, z) найдем как сумму

$$T(x, y, z, t) = T_U(x, y, z, t) + T(z, t). \quad (4)$$

Здесь $T_U(x, y, z, t)$ – температура в точке основания с координатами (x, y, z) в момент времени t , обусловленная теплообменом основания с U-образным зондом (ее следует рассчитывать с использованием рекомендаций [7, 8]), а $T(z, t)$ – температура на глубине z в момент времени t , обусловленная теплообменом основания с окружающей средой.

На основе полученных таким образом данных нами были построены изополя температур в грунтовом основании для таких вариантов использования тепловых насосов:

- тепловой насос работает только лишь в режиме кондиционирования три месяца с начала июня по конец августа (рис. 2-а);
- тепловой насос работает только лишь в режиме отопления шесть месяцев с начала ноября по конец марта (рис. 2-б);
- тепловой насос работает в реверсном режиме (т.е. в режиме кондиционирования три месяца с начала июня по конец августа и в режиме отопления – шесть месяцев с начала ноября по конец марта рис. 2-в).

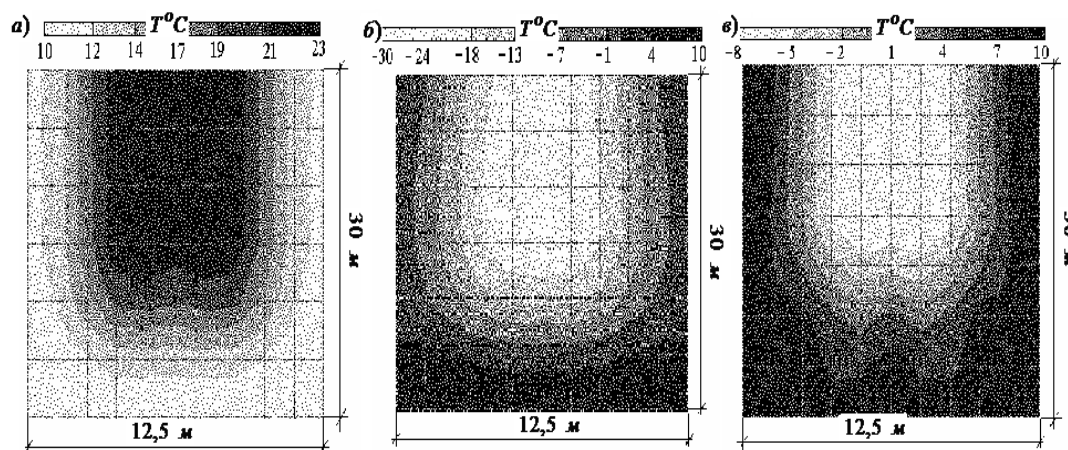


Рис. 2. Температурное поле в грунтовом основании, обусловленное теплообменом четырех U-образных зондов с основанием:

- а) при работе теплового насоса в режиме кондиционирования в течение 3 месяцев;
- б) при работе теплового насоса в режиме отопления в течение 6 месяцев; в) - при работе теплового насоса в режиме кондиционирования в течение 3 месяцев и в режиме отопления в течение 6 месяцев

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика расчета температурных полей, обусловленных теплообменом между U-образными зондами тепловых насосов и грунтовыми основаниями при учете сезонных изменений температуры на поверхности основания.
2. Показано, что при работе теплового насоса в режиме кондиционирования температура основания может превышать ее природные сезонные значения (рис. 2-а).
3. Установлено, что при работе теплового насоса в режиме отопления температура основания может быть ниже температуры замерзания воды (рис. 2-б). Этот факт имеет важное значение при проектировании фундаментов и подземных сооружений в связи с явлением морозного пучения грунта.
4. Выявлено, что тепловые поля при работе теплового насоса в режиме отопления и в реверсном режиме отличаются друг от друга (рис. 2 - б и 2 - в).
5. Установлено, что при функционировании U-образных зондов в теплообмен вовлекаются значительные объемы грунта. Этот факт обязательно следует учитывать при проектировании оснований фундаментов зданий и сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кривошеев П.И. Звіт за результатами участі делегації України в 14 Дунайській європейській конференції з проблем механіки ґрунтів та геотехніки (14DECGE) в м. Братіслава. - Киев, 2010. - С. 4.
2. Шаповал В.Г. Основания и фундаменты тепловых насосов / Шаповал В.Г., Моркляник Б.В. - Львов: Сполом, 2009. – 64 с.
3. Brandl H. Energy foundation and other thermo- active ground structures / Brandl H. // Geotechnique 56, 2006.- P. 81-122.
4. Brandl H. Energy piles and diaphragm walls for heat transfer form and into the ground / Brandl H. // Prociiding of the 3-h international Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles. Ghent. Technical University, Vienna, Austria, 1998. - P. 38-60.
5. Корн Г. Справочник по математике / Корн Г., Корн Т. - М.: Наука, 1974. - 840 с.
6. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел / Карташов Э.М. - М.: Высшая школа, 1985. - 480 с.
7. Шаповал В.Г. Закономерности изменения во времени температуры на дневной поверхности грунтовых оснований / Шаповал В.Г., Моркляник Б.В. // зб. наук. праць (галузеve машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2010. - №28.- С. 298-302.
8. Шаповал В.Г. Температурные поля в основаниях тепловых насосов: монографія / Шаповал В.Г., Моркляник Б.В. - Днепропетровск: Пороги, 2011.- 123 с.

Статья поступила в редакцию 15.03.2013 г.