

ВЛИЯНИЕ НА ЭНЕРГОСЪЕМ ФОРМЫ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ГРУНТОВОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

Ковязин А. С., канд. техн. наук, ст. науч. сотр., докторант¹
(ННЦ «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства» НААН)

С помощью разработанной математической модели процесса теплообмена между грунтовым теплообменником и массивом грунта, определен тепловой поток в зависимости от формы поперечного сечения грунтового теплообменника, а также времени функционирования геотермальной вентиляции и установлено, что круглая форма поперечного сечения грунтового теплообменника является энергетически оптимальной.

Принцип действия геотермальной вентиляции с использованием грунтовых теплообменников (рис. 1а) состоит в том, что воздух, имеющий температуру T_1 , подается на вход грунтового теплообменника и отдает (отбирает) тепло грунту, в результате чего воздух охлаждается (нагревается), приобретая температуру T_2 и подается в помещение. При этом между внутренней поверхностью обсадной трубы грунтового теплообменника, имеющей внутренний диаметр D , и массивом грунта возникает тепловой поток dQ/dt , величина которого определяет энергосъем грунтового теплообменника от массива грунта.

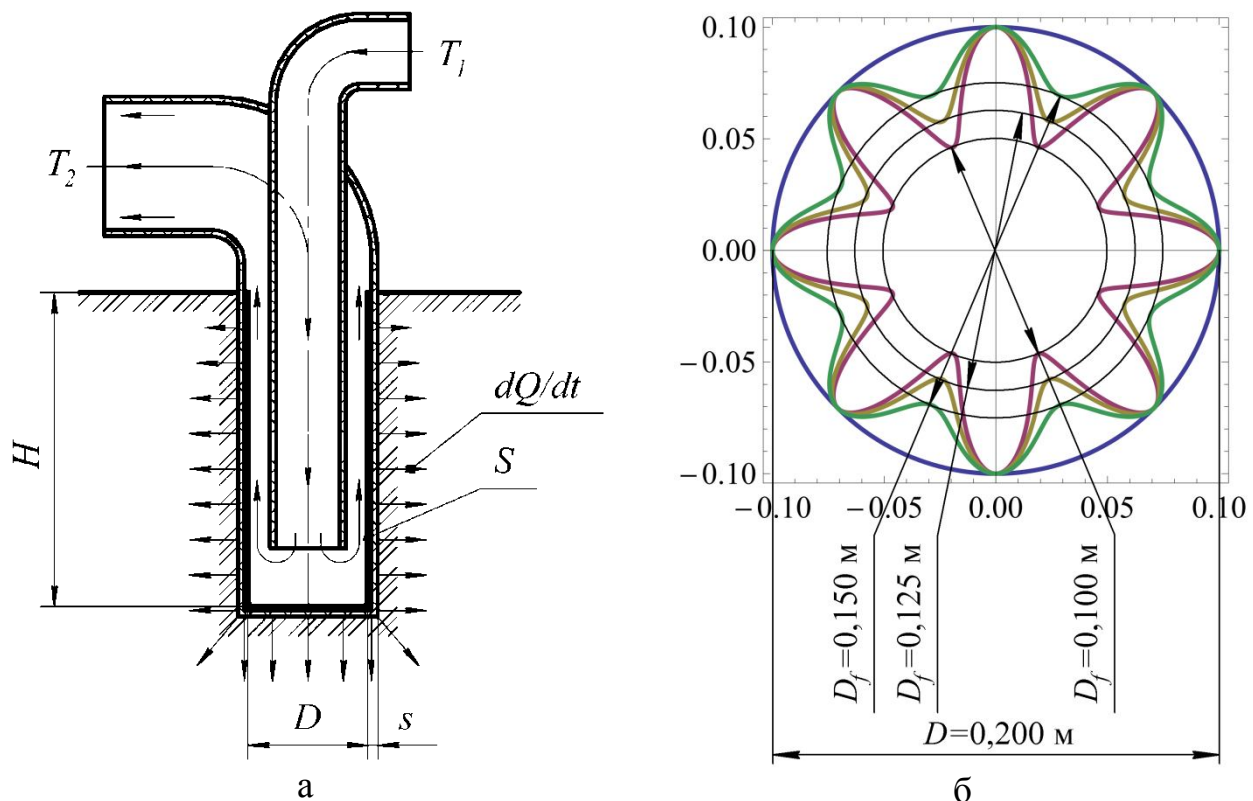


Рисунок 1 – Продольное (а) и поперечное (б) сечение грунтового теплообменника

¹ Научный консультант – Шевченко И. А., д-р техн. наук, чл.-кор. НААН, проф.

Для исследования принимаем волнистую форму поперечного сечения грунтового теплообменника (рис. 1б), которую описывает следующее уравнение в полярных координатах

$$\rho = \frac{1}{4}[D + D_f + (D - D_f)\cos(n\varphi)] = \rho(\varphi), \quad (1)$$

где ρ – полярный радиус, м;
 D – диаметр вершин волн, м;
 D_f – диаметр впадин волн, м;
 n – количество волн, шт;
 φ – полярный угол, рад.

Принимаем следующие допущения:

- грунт является однородным и изотропным, а его теплофизические свойства остаются постоянными с изменением температуры;
- температура на внутренней поверхности обсадной трубы T_S по всей ее длине постоянна;
- тепловой контакт обсадной трубы с прилегающим грунтом идеален;
- не учитываем наличие обсадной трубы грунтового теплообменника, то есть принимаем толщину стенки обсадной трубы $s = 0$;
- в расчетном диапазоне глубин температурные поля в грунте не изменяются;
- не учитываем влияние теплового потока на поверхности грунта, возникающего вследствие действия солнечной радиации и тепловой поток, проходящий через дно обсадной трубы и ниже глубины H .

Таким образом, получаем двумерную задачу об определении температурного поля в массиве грунта, а дифференциальное уравнение теплопроводности в полярных координатах [1], описывающее нестационарный осесимметричный процесс распространения теплоты в массиве грунта имеет вид:

$$\frac{\partial T_z}{\partial t} = a_2 \nabla^2 T_z, \quad r \in [\rho(\varphi), \infty), \quad (2)$$

где $T_z(r, t)$ – температура в точке грунта, которая находится на расстоянии r от оси грунтового теплообменника в момент времени t , °С;

$t \in [0, \infty)$ – время от начала процесса теплообмена, с;

a_2 – температуропроводность грунта, м²/с,

$$a_2 = \frac{\lambda_2}{C_2 \rho_2}, \quad (3)$$

где λ_2 – теплопроводность грунта, Вт/(м·°С);

C_2 – удельная теплоемкость грунта, Дж/(кг·°С);

ρ_2 – плотность грунта, кг/м³;

∇^2 – оператор Лапласа, для полярных координат

$$\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right), \quad (4)$$

r – расстояние от рассматриваемой точки массива грунта до оси грунтового теплообменника, м.

Для получения однозначного решения необходимо задать краевые условия. В рамках принятой модели они будут иметь вид:

- начальное условие $T_z(r,0) = T_{z0}$, $r \in [\rho(\varphi), \infty)$, где T_{z0} – температура массива грунта и обсадной трубы в начальный момент времени, °С;

- граничное условие на внутренней границе $T_z(\rho(\varphi),t) = T_s$, $t \in [0, \infty)$.

Для приближенного решения сформулированной задачи была разработана программа, основанная на методе конечных элементов. В результате, для принятых численных значений², определили температурное поле, поле плотности теплового потока, а, главное, тепловой поток на единицу длины грунтового теплообменника q в зависимости от формы поперечного сечения грунтового теплообменника и времени функционирования геотермальной вентиляции. Результаты решения оформили в виде рис. 2.

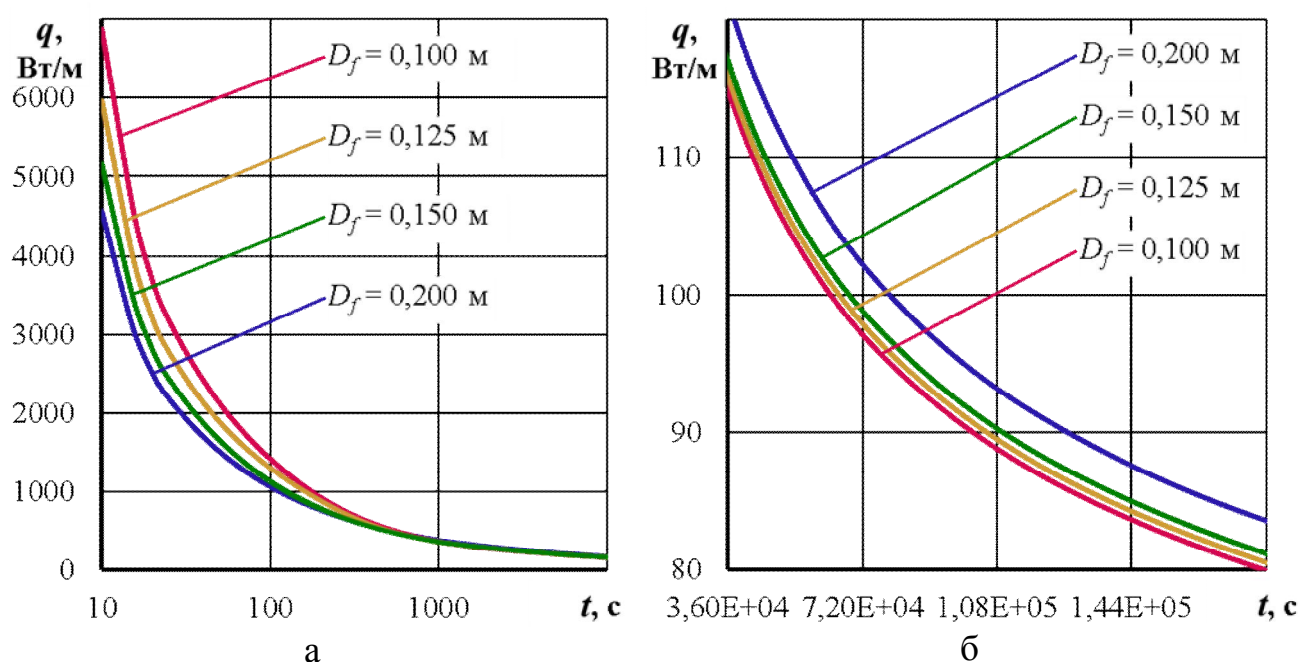


Рисунок 2 – Удельный тепловой поток q при различной форме поперечного сечения грунтового теплообменника для начального этапа (а) и установившегося режима (б) функционирования геотермальной вентиляции

Как видно из рис. 2а, на начальном этапе функционирования геотермальной вентиляции от увеличения площади теплообмена из-за применения волнистой формы поперечного сечения теплообменника есть ощутимый эффект в виде увеличения теплового потока. Однако эффект от применения волнистой формы поперечного сечения теплообменника с течением времени уменьшается и при $t \approx 1000$ с вообще пропадает. Таким образом, начальный этап функционирования геотермальной вентиляции имеет очень непродолжительное значение и характеризуется резким снижением эффекта от применения волнистой формы поперечного сечения теплообменника.

² $T_{z0} = 12$ °С; $T_s = 26$ °С; $D = 0,2$ м; $\lambda_z = 2$ Вт/(м·°С); $C_z = 1000$ Дж/(кг·°С); $\rho_z = 1800$ кг/м³.

На установившемся режиме функционирования геотермальной вентиляции (рис. 2б) тепловой поток от теплообменника, имеющего круглую форму поперечного сечения, превышает тепловой поток от теплообменников, имеющих волнистую форму. Это можно объяснить тем, что в теплообмене с грунтом полноценно участвуют лишь вершины волн. Остальная же часть волнистой поверхности практически не участвует в теплообмене. Таким образом, в данном случае от применения волнистой формы поперечного сечения грунтового теплообменника получен отрицательный эффект и любое отклонение формы поперечного сечения грунтового теплообменника от круга будет приводить к снижению теплового потока.

Таким образом, установлено, что круглая форма поперечного сечения грунтового теплообменника является оптимальной, поскольку отклонение формы поперечного сечения грунтового теплообменника от круга приводит к снижению теплового потока в установившемся режиме функционирования геотермальной вентиляции.

Список литературы:

1. *Лыков А. В.* Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высш. шк., 1967. – 600 с.
2. *Бронштейн И. Н.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Наука, 1986. – 544 с.

Анотація

Вплив на енергозняття форми поперечного перетину грунтового теплообмінника Ковязін О. С.

За допомогою розробленої математичної моделі процесу теплообміну між грунтовим теплообмінником і масивом ґрунту, визначено тепловий потік в залежності від форми поперечного перетину грунтового теплообмінника, а також часу функціонування геотермальної вентиляції та встановлено, що кругла форма поперечного перетину грунтового теплообмінника є енергетично оптимальною.

Abstract

Influence of the cross-section shape of a ground heat exchanger on energy extraction rate A. Kovyazin

The heat transfer rate depending on cross-section shape of ground heat exchanger and the time of geothermal ventilation activity have been determined using the developed mathematical model of heat transfer between the ground heat ex-

changer and the soil mass. It has also been established that the round cross-section shape of a ground heat exchanger is energy-optimal.