

ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА И ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ОБСАДНОЙ ТРУБЫ ГРУНТОВОГО ТЕПЛООБМЕННИКА НА ТЕПЛООТБОР ИЗ МАССИВА ГРУНТА

© Ковязин А. С., Величко И. Г., 2013

Визначено вплив матеріалу й товщини стінки обсадної труби ґрунтового теплообмінника на тепловідбір з масиву ґрунту.

Ключові слова: масив ґрунту, тепловідбір, обсадна труба ґрунтового теплообмінника, матеріал, товщина стінки.

Influence of the material and casing pipe wall thickness of a ground heat exchanger on heat extraction rate from the soil mass is determined.

Key words: soil mass, heat extraction, casing pipe of ground heat exchanger, material, wall thickness.

Постановка проблеми

Обеспечение оптимального микроклимата в животноводческих помещениях требует значительных затрат энергии. Все отклонения от нормативных параметров воздушной среды негативно влияют на продуктивность животных и эффективность производства. Вследствие постоянно растущей цены энергоносителей во всем мире интенсивно развивается альтернативная энергетика, что свидетельствует об актуальности разработок в данном направлении.

Тепловая энергия поверхностных слоев грунта может использоваться с помощью геотермальной вентиляции, рабочими органами которой являются ґрунтовые теплообменники. При этом материал и толщина стенки обсадной трубы – одни из важных параметров ґрунтовых теплообменников, которые влияют на термическое сопротивление стенки обсадной трубы, теплоотбор из массива ґрунта и, в конечном итоге, определяют эффективность использования геотермальной вентиляции.

Анализ последних исследований и публикаций

В работах [1–3] авторы пренебрегали толщиной стенки обсадной трубы ґрунтового теплообменника. В исследованиях [4] авторы с помощью коэффициента теплообмена между хладоносителем и ґрунтом учитывают термическое сопротивление стенки трубы, а также сопротивление неидеального теплового контакта трубы и ґрунта, однако методика определения этого коэффициента не приводится. В работе [5] авторы задались определенным материалом и толщиной стенки трубы, однако влияние этих параметров не определялось.

Цель – установить влияние материала и толщины стенки обсадной трубы ґрунтового теплообменника на теплоотбор из массива ґрунта.

Основная часть

Принцип действия геотермальной вентиляции с использованием грунтовых теплообменников (рис. 1) 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 теплоотбор грунтового теплообменника из массива грунта.

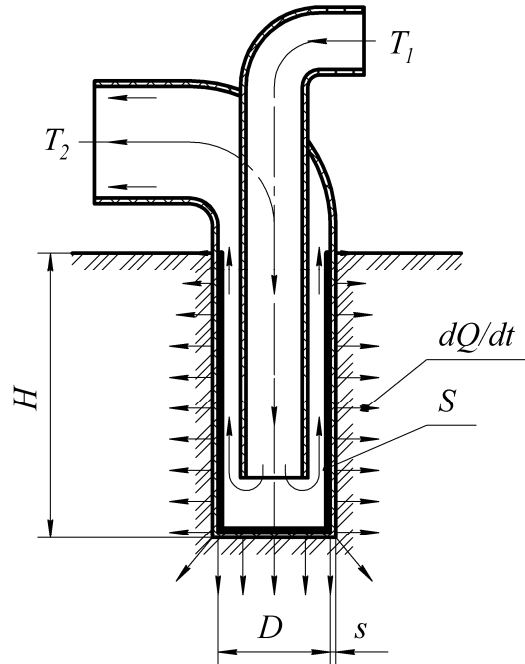


Рис. 1. Грунтовый теплообменник

Введем цилиндрическую систему координат так, чтобы ось OZ была направлена вниз по оси грунтового теплообменника, а координата $z = 0$ соответствовала поверхности земли.

Согласно [6] количество теплоты Q , проходящее за время t через поверхность теплообмена S (на рис. 1 выделена жирной линией) определяется как

$$Q = -\lambda \int_0^t \int_S \frac{\partial T}{\partial n} dS dt, \quad (1)$$

где λ – приведенная теплопроводность системы обсадная труба-массив грунта, Вт/(м·°С); $T(\bar{r}, t)$ – температура в точке грунта, определяемая радиус-вектором \bar{r} в момент времени t , °С; n – нормаль к поверхности S .

Тогда тепловой поток, проходящий через обсадную трубу грунтового теплообменника в заданный момент времени функционирования геотермальной вентиляции можно получить дифференцированием по времени соотношения (1)

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda \int_S \frac{\partial T}{\partial n} dS. \quad (2)$$

Для определения теплового потока необходимо знать поведение функции, описывающей температуру на внутренней поверхности S обсадной трубы. Поскольку температурные поля в обсадной трубе и грунте связаны, то для решения этой задачи предлагается следующая математическая модель, состоящая из дифференциальных уравнений теплопроводности в цилиндрических координатах [6], описывающих нестационарные осесимметричные процессы распространения теп-

лоты в массиве грунта (относительно функции $T(r, z, t)$) и в обсадной трубе (относительно функции $T_m(r, z, t)$), а также начальных и граничных условий, и условий сопряжения. При этом принимаем следующие допущения:

- грунт является однородным и изотропным, а его теплофизические свойства остаются постоянными с изменением температуры;
- температура на внутренней поверхности обсадной трубы по всей ее длине постоянна;
- тепловой контакт обсадной трубы с прилегающим грунтом идеален.

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T, (r, z) \in M_1 \cup M_2, M_1 = [D/2 + s, \infty) \times [0, H], M_2 = [0, \infty) \times [H, \infty), \\ \frac{\partial T_m}{\partial t} = a_m \nabla^2 T_m, (r, z) \in M_3 \cup M_4, M_3 = [D/2, D/2 + s] \times [0, H - s], M_4 = [0, D/2 + s] \times [H - s, H], \end{cases} \quad (3)$$

где $t \in [0, \infty)$ – время от начала процесса теплообмена, с; a, a_m – соответственно температуропроводность грунта и материала обсадной трубы, $\text{м}^2/\text{с}$; $\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$ – оператор Лапласа в цилиндрических координатах; s – толщина стенки обсадной трубы, м; H – длина теплообменника, м.

Начальные условия:

$$T(r, z, 0) = T_{zp}, (r, z) \in M_1 \cup M_2; T_m(r, z, 0) = T_{zp}, (r, z) \in M_3 \cup M_4,$$

где T_{zp} – температура массива грунта и обсадной трубы в начальный момент времени, $^{\circ}\text{C}$.

Граничные условия

$$T_m(D/2, z, t) = T_g, z \in [0, H - s]; T_m(r, H - s, t) = T_g, r \in [0, D/2]; T(r, 0, t) = f(r, t),$$

где T_g – температура на поверхности теплообмена S ; $T(r, 0, t)$ – функция, определяющая температуру на поверхности грунта, зависящая от природно-климатических условий.

Условие равенства плотностей тепловых потоков на внешней стенке обсадной трубы

$$\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial n} = \lambda \frac{\partial T}{\partial n}, (r, z) \in (M_1 \cup M_2) \cap (M_3 \cup M_4),$$

где λ_m, λ – соответственно теплопроводность материала обсадной трубы и массива грунта, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Для упрощения решения задачи введем следующие допущения:

- в расчетном диапазоне глубин температурные поля в грунте и трубе практически не изменяются при изменении z ;
- не учитываем влияние теплового потока на поверхности грунта вследствие солнечной радиации и тепловой поток, проходящий через дно обсадной трубы.

Таким образом, получаем одномерную задачу об определении связанных температурных полей в обсадной трубе и массиве грунта (рис. 2).

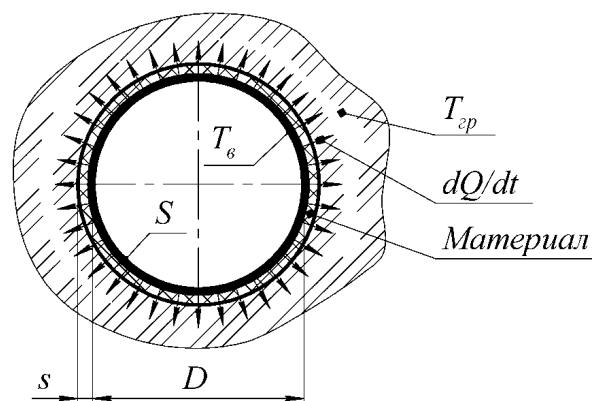


Рис. 2. Горизонтальное сечение грунтового теплообменника

Тогда система (3) при $t \in [0, \infty)$ упрощается и принимает вид

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), & r \in [D/2 + s, \infty), \\ \frac{\partial T_m}{\partial t} = a_m \left(\frac{\partial^2 T_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_m}{\partial r} \right), & r \in [D/2, D/2 + s), \end{cases}$$

где $T(r, t)$, $T_m(r, t)$ – соответственно температуры в точках массива грунта и обсадной трубы, находящиеся на расстоянии r от оси обсадной трубы в момент времени t , °С.

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

- начальное условие $T(r, 0) = T_{zp}$, $r \in [D/2 + s, \infty)$; $T_m(r, 0) = T_{zp}$, $r \in [D/2, D/2 + s)$;
- граничное условие на внутренней границе $T(D/2, t) = T_s$, $t \in [0, \infty)$;
- условие равенства плотностей тепловых потоков на внешней стенке обсадной трубы

$$\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial r}(D/2 + s, t) = \lambda \frac{\partial T}{\partial r}(D/2 + s, t).$$

Для приближенного решения сформулированной задачи была разработана программа, основанная на методе конечных элементов. В результате, для принятых численных значений¹, а также теплофизических характеристик грунта и материалов обсадной трубы теплообменника (табл. 1) определили температурное поле (рис. 3), а, главное, тепловую мощность на единицу длины грунтового теплообменника q как функции времени. Результаты решения оформили в виде рис. 4.

Таблица 1

Принятые теплофизические характеристики грунта и материалов обсадной трубы грунтового теплообменника

Материал	Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)	Удельная теплоемкость C , Дж/(кг·°С)	Плотность ρ , кг/м ³	Температуропроводность a , 10 ⁻⁶ м ² /с
Грунт	2,0	1000	1800	1,11
Полипропилен	0,24	1800	920	0,14
Сталь	60,5	434	7850	17,76

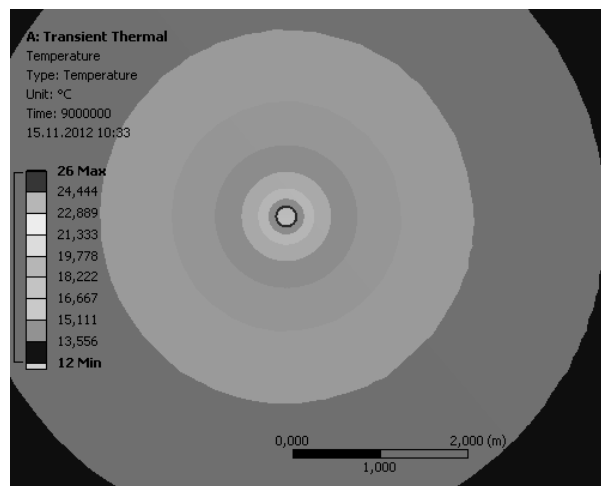


Рис. 3. Температурное поле для обсадной трубы из полипропилена ($s = 0,003$ м) при $t = 9 \cdot 10^6$ с ($\approx 3,5$ месяца)

¹ $T_{zp} = 12$ °С; $T_s = 26$ °С; $D = 0,2$ м.

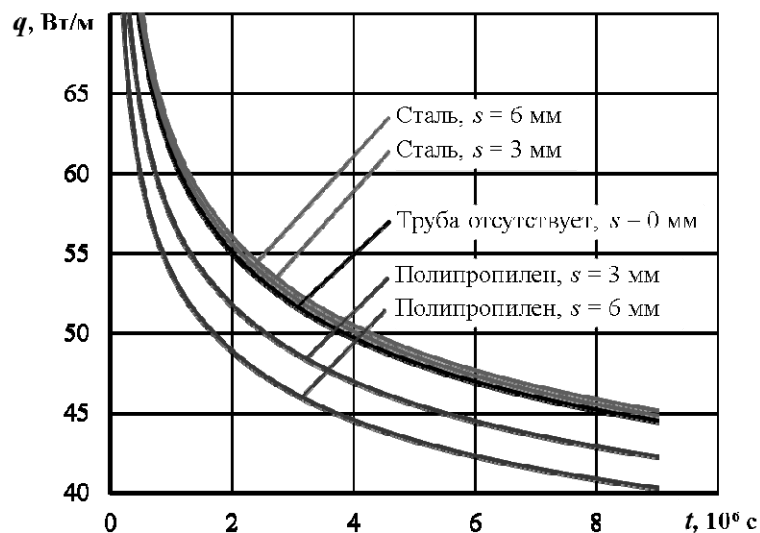


Рис. 4. Зависимость удельной тепловой мощности q от времени функционирования геотермальной вентиляции t при различных материалах и толщинах стенки s обсадной трубы грунтового теплообменника

Как видно из рис. 4, характер влияния толщины стенки и материала обсадной трубы с течением времени практически не изменяется, а тепловая мощность уменьшается с течением времени вследствие истощения теплового потенциала грунта. Для количественной оценки влияния материала и толщины стенки обсадной трубы на теплоотбор была составлена табл. 2.

Таблица 2

Влияние материала и толщины стенки обсадной трубы грунтового теплообменника на удельную тепловую мощность при $t = 9 \cdot 10^6$ с ($\approx 3,5$ месяца)

Материал обсадной трубы грунтового теплообменника	Толщина стенки s , мм	Удельная тепловая мощность q , Вт/м	Изменение удельной тепловой мощности Δq , %
Труба отсутствует	0	44,5	0
Полипропилен	3	42,3	- 5,3
	6	40,3	- 10,4
Сталь	3	44,8	0,7
	6	45,1	1,4

Графическая интерпретация данных табл. 2 представлена на рис. 5.

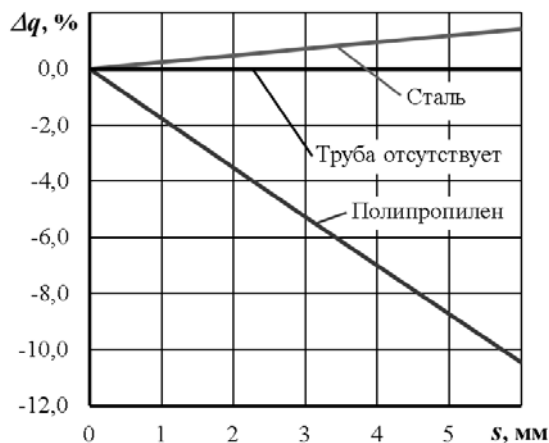


Рис. 5. Зависимость изменения удельной тепловой мощности Δq от материала и толщины стенки s обсадной трубы грунтового теплообменника

Как видно из рис. 5, теплоотбор из массива грунта пропорционален толщине стенки обсадной трубы грунтового теплообменника. Причем коэффициент пропорциональности существенно зависит от материала обсадной трубы.

Обсадная труба, изготовленная из материала со значительно меньшей, чем у грунта, теплопроводностью (например, полипропилена) существенно уменьшает теплоотбор из массива грунта (до 10 % и более, в зависимости от толщины стенки трубы), что следует учитывать при расчетах введением соответствующего коэффициента уменьшения теплоотбора, который можно определять с помощью разработанной математической модели.

Обсадная труба, изготовленная из материала со значительно большей, чем у грунта, теплопроводностью (например, стали) несущественно увеличивает теплоотбор из массива грунта (до 2 %), что, согласно выдвинутой гипотезе, может учитываться исключением из расчетов самого наличия обсадной трубы. То есть в этом случае при расчетах предлагается считать, что обсадная труба отсутствует, а в грунте выполнено отверстие диаметром, равным внешнему диаметру обсадной трубы ($D + 2s$). Это значительно упрощает задачу с расчетной точки зрения, поскольку можно ограничиться расчетом только одного температурного поля грунта. Результаты расчетов для $s = 0-12$ мм подтвердили эту гипотезу.

Выводы

Разработана математическая модель, с помощью которой определено влияние материала и толщины стенки обсадной трубы грунтового теплообменника на теплоотбор из массива грунта.

Установлено, что теплоотбор из массива грунта пропорционален толщине стенки обсадной трубы грунтового теплообменника, а коэффициент пропорциональности существенно зависит от материала обсадной трубы. Обсадная труба, изготовленная из полипропилена, уменьшает теплоотбор из массива грунта до 10 % и более, в зависимости от толщины стенки трубы. Обсадная труба, изготовленная из стали, незначительно (до 2 %) увеличивает теплоотбор из массива грунта.

Для обсадных труб, изготовленных из материалов со значительно меньшей, чем у грунта, теплопроводностью, необходимо введение поправочного коэффициента, учитывающего уменьшение теплоотбора, который можно определять с помощью разработанной математической модели.

Для обсадных труб, изготовленных из материалов со значительно большей, чем у грунта, теплопроводностью, и имеющих толщину стенки $s = 0-12$ мм, возможно исключение из расчетов самого наличия обсадной трубы (предлагается считать, что обсадная труба отсутствует, а в грунте выполнено отверстие диаметром, равным внешнему диаметру обсадной трубы).

1. Ковязин А. С. Теоретическое определение тепловой мощности грунтового теплообменника / А. С. Ковязин, И. Г. Величко, Д. А. Долгих // Збірник наукових праць Інституту механізації тваринництва НААН "Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві". – Вып. 1(9). – Запоріжжя, 2012. – С. 59–66. 2. Ковязин А. С. Влияние основных параметров геотермальной вентиляции на эффективность использования грунтовых теплообменников / А. С. Ковязин, И. Г. Величко, Д. А. Долгих // Матеріали ХХ Міжнародної науково-технічної конференції "Технічний прогрес у сільськогосподарському виробництві" та VII Всеукраїнської конференції-семінару аспірантів, докторантів і здобувачів у галузі аграрної інженерії. – Глеваха, 2012. – С. 128–129. 3. Денисова А. Е. Моделирование тепловых процессов в грунтовой тепловой трубе теплонасосной системы тепло- и хладоснабжения / А. Е. Денисова, А. В. Мармусевич // Труды Одесского политехнического университета. – Вып. 1(25). – Одесса, 2006. – С. 65–69. 4. Костиков А. О. Влияние теплового состояния грунта на эффективность теплонасосной установки с грунтовым теплообменником / А. О. Костиков, Д. Х. Харлампиди // Энергетика: економіка, технології, екологія. – № 1 (24). – 2009. – С. 32–40. 5. Тарасова В. А. Моделирование тепловых режимов совместной работы грунтового теплообменника и теплонасосной установки / В. А. Тарасова, Д. Х. Харлампиди, А. В. Шерстюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – № 5/8 (53). – Харьков: Технологический центр, 2011. – С. 34–40. 6. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.