

УДК 621.565.93

А. С. Ковязин

Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье

ОБОСНОВАНИЕ ТОЛЩИНЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ВНУТРЕННЕЙ ТРУБЫ ГРУНТОВОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

С помощью разработанной математической модели процесса теплообмена между грунтовым теплообменником и массивом грунта, определена величина охлаждения воздуха в зависимости от толщины теплоизоляции внутренней трубы грунтового теплообменника и обоснована рациональная толщина теплоизоляции.

Ключевые слова: грунтовый теплообменник, внутренняя труба, теплоизоляция, теплопередача, охлаждение воздуха.

Постановка проблемы

Эффективное ведение отрасли животноводства невозможно без полноценного кормления и создания оптимальных условий содержания животных, которые в основном определяются микроклиматом. Обеспечение оптимального микроклимата в животноводческих помещениях требует значительных затрат энергии, на что затрачивается до 15% средств производителей [1]. Охлаждение (нагревание) приточного воздуха для животноводческих помещений может быть осуществлено с помощью геотермальной вентиляции, которая позволяет использовать тепловую энергию поверхностных слоев грунта. Рабочими органами геотермальной вентиляции являются грунтовые теплообменники. Для эффективного использования грунтового теплообменника необходимо обосновать толщину теплоизоляции его внутренней трубы.

Анализ последних исследований

Работы [2–8] посвящены моделированию процессов теплообмена между грунтовыми теплообменниками и массивом грунта, однако в них не исследовалось влияние толщины теплоизоляции внутренней трубы грунтового теплообменника на теплоотбор из массива грунта. Таким образом, в настоящее время проблема не решена.

Цель

Повысить эффективность использования геотермальной вентиляции путем обоснования рациональной толщины теплоизоляции внутренней трубы грунтового теплообменника.

Основная часть

Принцип действия геотермальной вентиляции с использованием грунтовых теплообменников (рис. 1) состоит в том, что воздух, имеющий тем-

пературу 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 животноводческое 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 от массива грунта. Скважина заполнена тампонажным раствором с высокой теплопроводностью, что улучшает теплообмен между обсадной трубой и грунтом. Обсадная труба выполнена из материала с высокой теплопроводностью, например, стали.

Для обоснования толщины теплоизоляции внутренней трубы грунтового теплообменника принимаем следующие допущения: грунт явля-

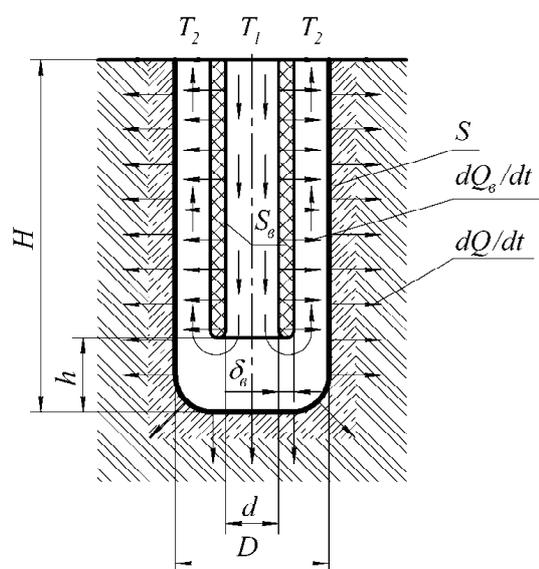


Рис. 1. Продольное сечение грунтового теплообменника

ется однородным и изотропным, а его теплофизические свойства остаются постоянными с изменением температуры; тепловой контакт обсадной трубы с прилегающим грунтом идеален; не учитываем наличие обсадной трубы грунтового теплообменника, то есть, принимаем толщину стенки обсадной трубы $\delta = 0$; не учитываем влияние теплового потока на поверхности грунта, возникающего вследствие действия солнечной радиации и поток радиогенного тепла Земли; вследствие незначительного изменения давления в потоке воздуха при его движении в грунтовом теплообменнике, воздух рассматриваем как несжимаемую жидкость; процесс теплопередачи через стенку внутренней трубы проходит только по ее толщине и мгновенно; так как предполагаемая толщина стенки внутренней трубы мала по сравнению с геометрией расчетной области, используем модель тонкой стенки (Thin Wall) с решением одномерных уравнений теплопроводности сквозь эту границу.

Введем цилиндрическую систему координат так, чтобы ось OZ была направлена вниз по оси грунтового теплообменника, а координата $z = 0$ соответствовала поверхности Земли. Поскольку рассматривается осесимметричная задача, то ни одна из величин не будет зависеть от координаты φ ($0 \leq \varphi < 2\pi$), поэтому координату φ не указываем.

Область, занимаемая грунтом [9]:

$$M_z = M_1 \cup M_2, M_1 = [D/2, \infty) \times [0, H], M_2 = [0, \infty) \times [H, \infty), \quad (1)$$

где D – диаметр обсадной трубы грунтового теплообменника, м;

H – длина грунтового теплообменника.

Область, занимаемая внутренней трубой:

$$M_{me} = [d/2, d/2 + \delta_e] \times [0, H - h], \quad (2)$$

где d – внутренний диаметр внутренней трубы грунтового теплообменника, м;

δ_e – толщина стенки внутренней трубы грунтового теплообменника, м.

Область, занимаемая воздухом:

$$M_e = M_3 / M_{me}, M_3 = [0, D/2] \times [0, H]. \quad (3)$$

Согласно [10, 11] тепловой поток, проходящий через поверхность теплообмена S в заданный момент времени t функционирования грунтового теплообменника:

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda_z \int_S \frac{\partial T_z}{\partial n} dS, \quad (4)$$

где λ_z – теплопроводность грунта, Вт/(м·°C);

$T_z(r, z, t)$ – температура в точке грунта, которая имеет координаты (r, z) в момент времени t , °C;

n – нормаль к поверхности S .

Тепловой поток, проходящий через поверхность внутренней трубы S_e :

$$\frac{dQ_e}{dt} = \pi \int_0^{H-h} k_l(T_1 - T_2) dz, \quad (5)$$

где $k_l(z)$ – местный линейный коэффициент теплопередачи, Вт/(м·°C);

$T_1(z), T_2(z)$ – местные средние по сечениям температуры, имеющие координату z в момент времени t , °C.

Местный линейный коэффициент теплопередачи для однослойной цилиндрической стенки [12]:

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d} + \frac{1}{2\lambda_{me}} \ln \frac{d + 2\delta_e}{d} + \frac{1}{\alpha_2 (d + 2\delta_e)}}, \quad (6)$$

где α_1, α_2 – местные коэффициенты теплоотдачи для потока воздуха, движущегося вниз и вверх соответственно Вт/(м²·°C);

λ_{me} – теплопроводность материала внутренней трубы, Вт/(м·°C).

Уравнение неразрывности, которое отражает факт отсутствия в области, занимаемой воздухом M_e пустот и разрывов, в принятой системе цилиндрических координат и имеющейся осевой симметрии $\bar{v} = \bar{v}(r, z)$ имеет вид [13, 14]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, (r, z) \in M_e, \quad (7)$$

где v_r, v_z – компоненты скорости в направлениях r, z .

Движение воздуха в данном случае описывается уравнениями Навье-Стокса, которые в цилиндрических координатах при осевой симметрии принимают вид:

$$\begin{aligned} \rho \frac{Dv_r}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left(\nabla^2 v_r - \frac{v_r}{r^2} \right), \\ \rho \frac{Dv_z}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 v_z, (r, z) \in M_e, \end{aligned} \quad (8)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³;

p – давление, Па;

μ – динамическая вязкость воздуха, Па·с.

Входящие в уравнения (8) субстанциальные производные выражаются зависимостями:

$$\begin{aligned} \frac{Dv_r}{dt} &= \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z}, \\ \frac{Dv_z}{dt} &= \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z}. \end{aligned} \quad (9)$$

Оператор Лапласа при наличии осевой симметрии в цилиндрической системе координат:

$$\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right). \quad (10)$$

Температурное поле в движущемся потоке воздуха описывается уравнением энергии [13, 15]

$$\frac{DT_g}{dt} = a_g \nabla^2 T_g, \quad (r, z) \in M_g, \quad (11)$$

где $T_g(r, z, t)$ – температура в точке воздуха, которая имеет координаты (r, z) в момент времени t , °С;

a_g – температуропроводность воздуха, м²/с.

Субстанциальная производная, которая входит в уравнение (11) запишется как:

$$\frac{DT_g}{dt} = \frac{\partial T_g}{\partial t} + v_r \frac{\partial T_g}{\partial r} + v_z \frac{\partial T_g}{\partial z}. \quad (12)$$

Температуропроводность материала определяется из выражения [10]:

$$a = \frac{\lambda}{C \rho}, \quad (13)$$

где λ – теплопроводность материала, Вт/(м·°С);

C – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·°С);

ρ – плотность материала, кг/м³.

Температурное поле в массиве грунта описывается следующим уравнением теплопроводности [10, 11]

$$\frac{\partial T_z}{\partial t} = a_z \nabla^2 T_z, \quad (r, z) \in M_z, \quad (14)$$

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

a_z – температуропроводность грунта, м²/с.

Начальные условия:

$$\begin{cases} T_z(r, z, 0) = T_{z0}, \quad (r, z) \in M_z; \\ T_g(r, z, 0) = T_{g0}, \quad (r, z) \in M_g; \\ T_{mg}(r, z, 0) = T_{z0}, \quad (r, z) \in M_{mg}, \end{cases} \quad (15)$$

где T_{z0} – температура массива грунта в начальный момент времени, °С.

Принимаем $T_{z0} = \text{const}$.

Граничное условие:

$$T_g(r, 0, t) = T_1, \quad r \in [0, d/2]. \quad (16)$$

Условие равенства плотностей тепловых потоков на стенке обсадной трубы:

$$\lambda_z \frac{\partial T_z}{\partial n} = -\alpha(T_g - T_z), \quad (r, z) \in M_z \cap M_g, \quad (17)$$

где α – средний коэффициент теплоотдачи на поверхности обсадной трубы, Вт/(м²·°С);

T_g, T_z – средние температуры воздуха и поверхности обсадной трубы, °С.

Дифференциальное уравнение теплоотдачи устанавливает связь между коэффициентом теплоотдачи на поверхности обсадной трубы и температурным полем воздуха [15]:

$$\alpha = -\frac{\lambda_g}{T_g - T_z} \frac{\partial T_g}{\partial n}. \quad (18)$$

Вычислительный эксперимент проводился с использованием пакета вычислительной гидродинамики ANSYS Fluent.

В первом приближении для моделирования, на основании предыдущих исследований [7], принимаем длину грунтового теплообменника $H = 30$ м и диаметр обсадной трубы грунтового теплообменника $D = 0,3$ м. Также предвзятельно принимаем соотношение диаметров внутренней и обсадной трубы $d/D = 0,65$.

Линейное термическое сопротивление теплопроводности при теплопередаче через стенку внутренней трубы [11]:

$$R_{l,\lambda} = \frac{1}{2\lambda_{mg}} \ln \frac{d + 2\delta_g}{d}. \quad (19)$$

Рассмотрим два случая: 1-й случай $R_{l,\lambda} = 0$, он будет иметь место при толщине стенки внутренней трубы $\delta_g = 0$; 2-й случай $R_{l,\lambda} = \infty$, он будет иметь место при использовании гипотетического материала с теплопроводностью $\lambda_{mg} = 0$ Вт/(м·°С).

После моделирования, для принятых численных значений¹ и варианта подачи воздуха во внутреннюю трубу, определили величину охлаждения воздуха ΔT (табл. 1), которая является показателем результативности грунтового теплообменника.

Таблица 1 – Влияние линейного термического сопротивления теплопроводности внутренней трубы грунтового теплообменника на величину охлаждения при различных объемных подачах воздуха

Подача воздуха $V_t, \text{ м}^3/\text{ч}$	Охлаждение воздуха $\Delta T, \text{ }^\circ\text{C}$ при линейном термическом сопротивлении теплопроводности		Увеличение охлаждения при $R_{i,\lambda} = \infty$ $\Delta\Delta T, \text{ }^\circ\text{C}$
	$R_{i,\lambda} = 0$ м·°C/Вт	$R_{i,\lambda} = \infty$ м·°C/Вт	
125	16,23	22,13	5,90
250	14,00	17,38	3,38
500	10,28	11,66	1,38
1000	6,63	7,07	0,44

Как видно из таблицы 1, линейное термическое сопротивление теплопроводности стенки внутренней трубы существенно влияет на величину охлаждения воздуха и для повышения ре-

зультативности грунтового теплообменника его нужно повышать.

В качестве теплоизоляционного материала для дальнейших исследований будем использовать пенополиуретан. Его теплофизические свойства: $\lambda_{\text{ППУ}} = 0,04 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$; $C_{\text{ППУ}} = 1470 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$; $\rho_{\text{ППУ}} = 60 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Таким образом, внутренняя труба будет иметь составную конструкцию, и состоять из двух тонкостенных оцинкованных стальных труб с заполнением пространства между ними пенополиуретаном. При этом наружная труба воспринимает механические нагрузки. Благодаря такой конструкции вследствие гладкой поверхности стальных труб будут уменьшены потери давления на трение [16] по сравнению с вариантом, когда наружная труба отсутствует и воздух движется вдоль поверхности, образованной пенополиуретаном. Также будет исключено возможное выделение вредных паров из пенополиуретана, что может оказывать негативное влияние на организм животных.

Для определения толщины теплоизоляции были проведены исследования (табл. 2).

Для наглядности представления результатов, содержащихся в таблицах 1 и 2, были построены графики (рис. 2).

Таблица 2 – Влияние толщины теплоизоляции внутренней трубы грунтового теплообменника на величину охлаждения при различных объемных подачах воздуха

Подача воздуха $V_t, \text{ м}^3/\text{ч}$	Охлаждение воздуха $\Delta T, \text{ }^\circ\text{C}$ при толщине теплоизоляции, мм				Увеличение охлаждения $\Delta\Delta T, \text{ }^\circ\text{C}$ при толщине теплоизоляции, мм			
	10	25	50	100	10	25	50	100
125	18,29	19,54	20,40	21,04	2,06	3,31	4,17	4,81
250	15,64	16,31	16,70	16,95	1,64	2,31	2,70	2,95
500	11,12	11,35	11,46	11,53	0,84	1,07	1,18	1,25
1000	6,94	7,00	7,02	7,04	0,31	0,37	0,39	0,41

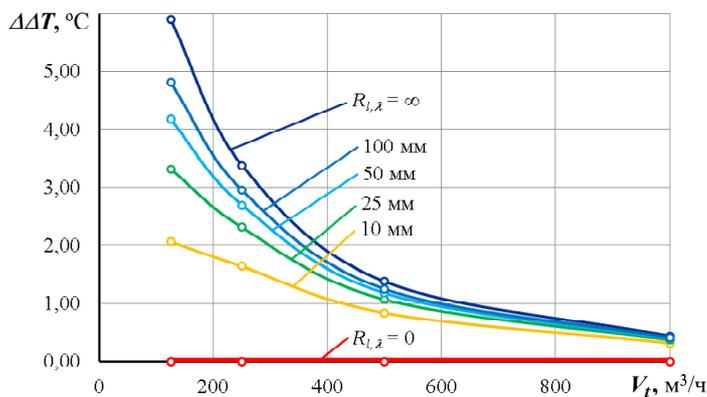


Рис. 2. Графики зависимости увеличения охлаждения при использовании теплоизоляции внутренней трубы по сравнению со стенкой внутренней трубы нулевой толщины для различных объемных подач воздуха

¹ $T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; $t = 4 \cdot 10^6 \text{ с}$; $T_{20} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$; $\lambda_2 = 1,45 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$; $C_2 = 1350 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$; $\rho_2 = 1600 \text{ кг}/\text{м}^3$

Из рис. 2 видно, что при увеличении подачи воздуха эффект от теплоизоляции внутренней трубы снижается. Это можно объяснить уменьшением среднеинтегральной разности температур, входящих в выражение (5), и, как следствие, уменьшением величины охлаждения воздуха ΔT . В свою очередь уменьшение среднеинтегральной разности температур происходит вследствие истощения теплового потенциала грунта, которое имеет место при больших объемных подачах воздуха (рис. 3).

Для определения рациональной толщины теплоизоляции внутренней трубы грунтового теплообменника должна быть решена следующая компромиссная задача. С одной стороны увеличение толщины теплоизоляции повышает энергетическую эффективность грунтового теплообменника (рис. 2). С другой стороны это приводит к повышению стоимости теплообменника вследствие как увеличения стоимости самой теплоизоляции, так и увеличения диаметра обсадной трубы. Исходя из этих соображений, для дальнейших исследований, принимаем толщину теплоизоляции внутренней трубы пенополиуретаном на уровне 50 мм.

Выводы

Для повышения эффективности грунтового теплообменника, его внутреннюю трубу следует теплоизолировать с обеспечением линейного термического сопротивления теплопроводности при

теплопередаче через стенку внутренней трубы на уровне $2,25 \text{ м} \cdot \text{°C}/\text{Вт}$, что достигается толщиной слоя пенополиуретана на уровне 50 мм и обеспечивает экономически целесообразную энергетическую эффективность.

Список литературы

1. Розробити проект свинарського підприємства на 12000 голів відгодівлі на рік з використанням альтернативних джерел енергії та енергоощадного технологічного обладнання : звіт про НДР (заключний): № ДР 0111U004422 / кер. О. С. Ковязін, вик. О. В. Парієва, О. Д. Потапенко // Інститут механізації тваринництва НААН. – Запоріжжя. – 2011. – 105 с. – Інв. № 0212U006519.
2. Денисова А. Е. Моделирование тепловых процессов в грунтовой тепловой трубе теплососной системы тепло- и хладоснабжения / А. Е. Денисова, А. В. Мармусевич // Труды Одесского политехнического университета. – Одесса, 2006. – Вып. 1(25). – С. 65–69.
3. Ковязин А. С. Влияние материала и толщины стенки обсадной трубы грунтового теплообменника на теплоотбор из массива грунта / А. С. Ковязин, И. Г. Величко // Вісник національного університету «Львівська політехніка» «Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація». – № 758. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2013. – С. 57–62.

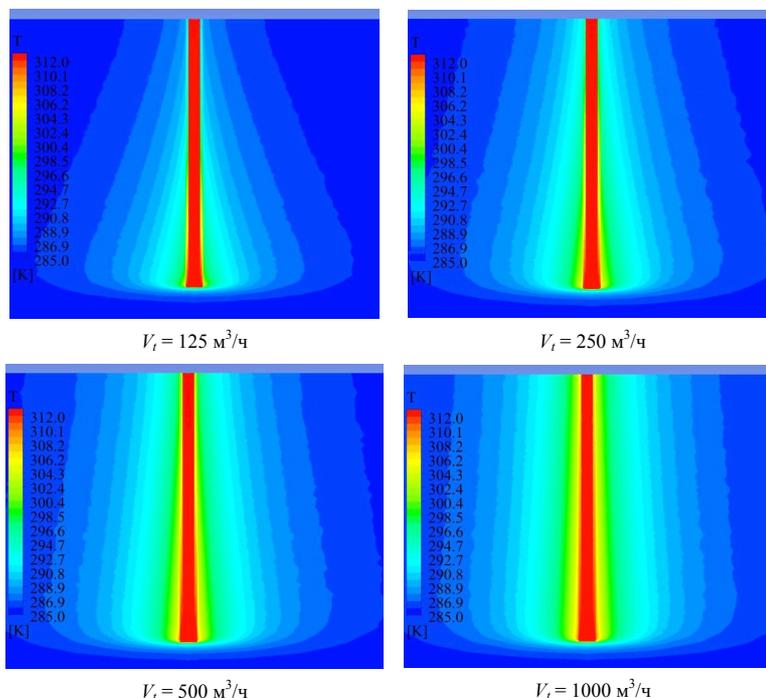


Рис. 3. Температурные поля воздуха, движущегося в грунтовом теплообменнике и массива грунта при различных объемных подачах воздуха для внутренней трубы с линейным термическим сопротивлением теплопроводности $R_{l,\lambda} = \infty$

4. Ковязин А. С. Влияние на энергосъем формы поперечного сечения грунтового теплообменника / А. С. Ковязин // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка «Технічні системи і технології тваринництва». – № 132. – Харків, 2013. – С. 251–255.
5. 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.
6. Шевченко И. Моделирование природного температурного поля поверхностных слоев Земли / Игорь Шевченко, Алексей Ковязин // An international journal on operation of farm and agri-food industry machinery: Motrol. Comission of motorizatin and energetics in agriculture. – Vol. 15. – № 3. – Lublin-Rzeszyv, 2013. – С. 228–234.
7. Ковязин А. С. Обоснование длины и диаметра грунтового теплообменника / А. С. Ковязин, Д. А. Долгих // Механізація та електрифікація сільського господарства. – Вип. 98. – Т. 2. – Глеваха, 2013. – С. 96–105.
8. 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. – Харьков : Технологический центр, 2011. – № 5/8 (53). – С. 34–40.
9. Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Наука, 1986. – 544 с.
10. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высш. шк., 1967. – 600 с.
11. Крейт Ф. Основы теплопередачи / Ф. Крейт, У. Блэк. – М. : Мир, 1983. – 512 с.
12. Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок / В. Л. Иванов, А. И. Леонтьев, Э. А. Манушин, М. И. Осипов; Под ред. А. И. Леонтьева. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 592 с.
13. Ковальногов Н. Н. Основы гидравлики / Н. Н. Ковальногов, Е. Н. Коврижных. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2004. – 86 с.
14. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М. : Дрофа, 2003. – 840 с.
15. Орлов М. Е. Теоретические основы теплотехники. Тепломассообмен / М. Е. Орлов. – Ульяновск : УлГТУ, 2013. – 204 с.
16. Талиев В. Н. Аэродинамика вентиляции / В. Н. Талиев. – М. : Стройиздат, 1979. – 295 с.

Поступила в редакцию 10.12.2016

Ковязин О.С. Обґрунтування товщини теплоізоляції внутрішньої труби грунтового теплообмінника

За допомогою розробленої математичної моделі процесу теплообміну між теплообмінником і масивом ґрунту, визначено величину охолодження повітря в залежності від товщини теплоізоляції внутрішньої труби грунтового теплообмінника і обґрунтовано раціональну товщину теплоізоляції.

Ключові слова: *ґрунтовий теплообмінник, внутрішня труба, теплоізоляція, теплопередача, охолодження повітря.*

Koviazin A. The rationale for the thickness of the thermal insulation the inner tube of ground heat exchanger

Using the developed mathematical model of heat transfer between the ground heat exchanger and soil mass, cooling air depending on the thickness of the thermal insulation of the inner tube of ground heat exchanger is determined and rational thickness of thermal insulation is explain.

Key words: *ground heat exchanger, inner tube, thermal insulation, heat transfer, cooling air.*