

УДК 621.565.93

ОБОСНОВАНИЕ ДЛИНЫ И ДИАМЕТРА ГРУНТОВОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

А.С. Ковязин, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., докторант¹

Д.А. Долгих, аспирант²

ННЦ «Институт механизации и электрификации
сельского хозяйства» НААН

Визначені діапазони раціональної довжини й діаметра ґрунтового теплообмінника.

Ключові слова: ґрунтовий теплообмінник, діаметр, довжина, ефективна теплова потужність, економічна ефективність.

Проблема. 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]. Без соблюдения оптимального микроклимата в помещениях, влияние которого состоит из совокупных действий температуры, влажности, газового состава воздуха, загрязнения воздуха, невозможно получить дешевую и качественную продукцию в короткие сроки. Результаты многочисленных исследований свидетельствуют, что хозяйства, где содержат животных в помещениях с воздухом, в котором концентрация аммиака, сероводорода, углекислого газа, больше допустимой, несут значительные потери от снижения продуктивности животных, повышения уровня смертности, а также перерасхода кормов на единицу продукции [2].

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 вен-

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

²Научный руководитель – Ковязин А. С., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

© А.С. Ковязин, Д.А. Долгих.

Механізація та електрифікація сільського господарства. Вип. 97. 2013.

тиляції являються ґрунтові теплообмінники. Для ефективного використання геотермальної вентиляції необхідно обосновати довжину ґрунтового теплообмінника.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботі [3] определена мощность, необходимая для прокачивания воздуха через ґрунтовой теплообмінник. Работа [4] была посвящена определению тепловой мощности ґрунтового теплообмінника. Эта статья является логичным продолжением этих работ.

Цель. Обосновать длину и диаметр ґрунтового теплообмінника путем обеспечения энергетической и экономической эффективности использования геотермальной вентиляции.

Материалы и методы. Тепловая мощность ґрунтового теплообмінника определялась с использованием уравнения нестационарной теплопроводности. Потери давления в ґрунтовой теплообміннике определялись методами аэродинамики. Для аппроксимации данных, полученных в результате теоретических экспериментов, использовался метод наименьших квадратов. Для упрощения полученных выражений и математического моделирования применялись специальные компьютерные программы.

Результаты исследований. Рассмотрим расчетную схему (рис. 1).

Для полноценного использования теплового потенциала ґрунта через ґрунтовой теплообмінник необходимо прокачивать определенное количество воздуха. При завышенной подаче мы не обеспечим существенного эффекта в виде охлаждения (нагрева) прокачиваемого воздуха, а будем лишь затрачивать энергию на прокачивание воздуха через ґрунтовой теплообмінник, которая даже может превысить получаемую тепловую энергию от теплообмінника. При заниженной подаче воздуха тепловой потенциал ґрунта будет использован не в полной мере.

Таким образом, с увеличением длины теплообмінника должно увеличиваться и количество воздуха, прокачиваемое через него. В первом приближении будем считать, что подача воздуха связана с длиной теплообмінника линейной зависимостью вида:

$$Q = H k_Q, \quad (1)$$

где H – длина теплообмінника, м; k_Q – коэффициент подачи, м²/ч,

$$k_Q = \frac{3600 q}{\Delta T C_g \rho_g}, \quad (2)$$

где q – удельная тепловая мощность грунтового теплообменника, Вт/м; DT – разность температур на входе и на выходе из теплообменника, которая может быть обеспечена на всем диапазоне функционирования геотермальной вентиляции К; C_e – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг×К); r_e – плотность воздуха, кг/м³.

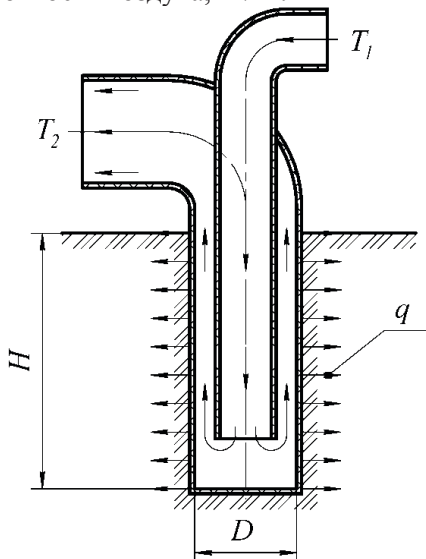


Рис. 1. Грунтовый теплообменник с основными параметрами

На основе работы [4] при времени функционирования геотермальной вентиляции $t = 10^7$ с (это время соответствует среднему диапазону использования геотермальной вентиляции на одном из режимов – нагрев или охлаждение) и разности температур $DT = 8$ К (принятая средняя разность температур на основе наших предварительных экспериментальных исследований) была составлена табл. 1.

Тепловая мощность грунтового теплообменника

$$P_m = q H . \quad (3)$$

В работе [3] была разработана математическая модель, позволяющая определять P_n – мощность, необходимую для прокачивания воздуха через грунтовый теплообменник как функцию геометрических параметров теплообменника, шероховатости стенок воздуховода, а также температур воздуха на входе и на выходе из теплообменника.

Таблиця 1. Удельная тепловая мощность грунтового теплообменника при различных диаметрах грунтового теплообменника D и времени функционирования геотермальной вентиляции $t = 10^7$ с, а также разности температур $\Delta T = 8$ К

D , м	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	1,0
q , Вт/м	53,8	62,5	68,7	74,2	84,0	99,8

Эффективная тепловая мощность грунтового теплообменника

$$P_{эф.м} = P_m - P_n \quad (4)$$

Была разработана программа в среде компьютерной математики, позволяющая определять эффективную тепловую мощность грунтового теплообменника в зависимости от его диаметра и длины. Результаты расчетов представлены в табл. 2 и на рис. 2.

Таблиця 2. Эффективная тепловая мощность грунтового теплообменника при его различных диаметрах и длинах

H , м	D , м					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	1,0
5	228,7	309,5	342,8	370,7	419,9	499,0
10	81,9	595,0	680,2	739,5	839,4	997,9
15	-1178,2	817,3	1004,5	1103,8	1257,6	1496,5
20	-4682,1	920,9	1304,9	1460,0	1674,0	1994,9
25	-11953,4	834,1	1568,5	1804,1	2087,5	2492,7
30	-24908,0	469,3	1779,5	2131,1	2497,1	2989,8
35	-45854,8	-277,2	1919,8	2435,6	2901,6	3486,0
40	-77495,3	-1525,1	1968,4	2711,1	3300,0	3981,2
45	-122923	-3410,4	1902,1	2950,9	3690,0	4475,1
50	-185626	-6084,8	1695,0	3147,1	4071,0	4967,5

Как видно из рис. 2, от определенного диаметра грунтового теплообменника возможно получить лишь определенное максимальное значение эффективной тепловой мощности при некоторой длине теплообменника, которую назовем критической. Превышение критической длины теплообменника приводит к уменьшению эффективной тепловой мощности вследствие увеличения мощности, требуемой на прокачивание воздуха через теплообменник.

Аппроксимируя данные табл. 2 для каждого диаметра теплообмен-

ника полиномами четвертой степени и исследуя полученные функции на экстремум, получили критические длины грунтового теплообменника при различных его диаметрах. Результаты расчетов оформили в виде табл. 3 и рис. 3.

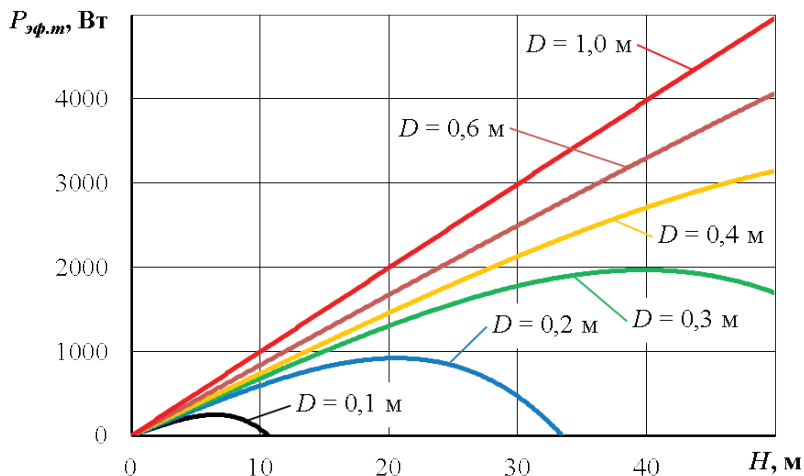


Рис. 2. Графики зависимости эффективной тепловой мощности от длины грунтового теплообменника при его различных диаметрах

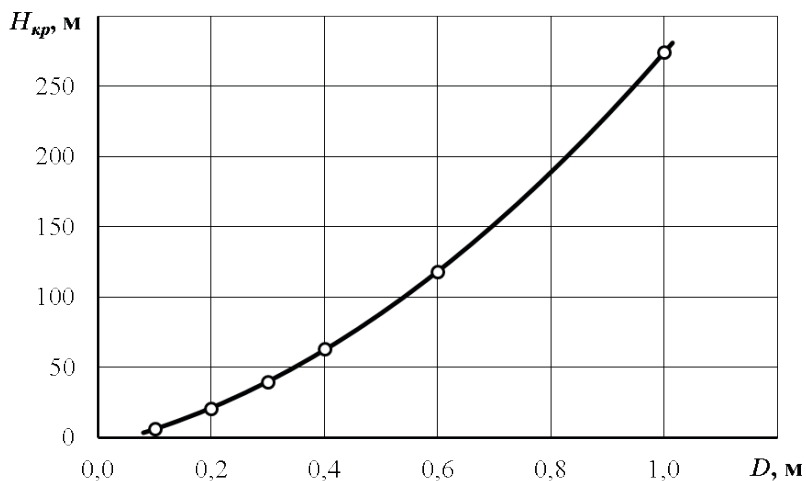


Рис. 3. График зависимости критической длины грунтового теплообменника от его диаметра

Таблиця 3. Критическая длина грунтового теплообменника $H_{кр}$ при различных диаметрах грунтового теплообменника D

D , м	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	1,0
$H_{кр}$, м	6,5	20,6	39,8	63,3	117,9	274,0

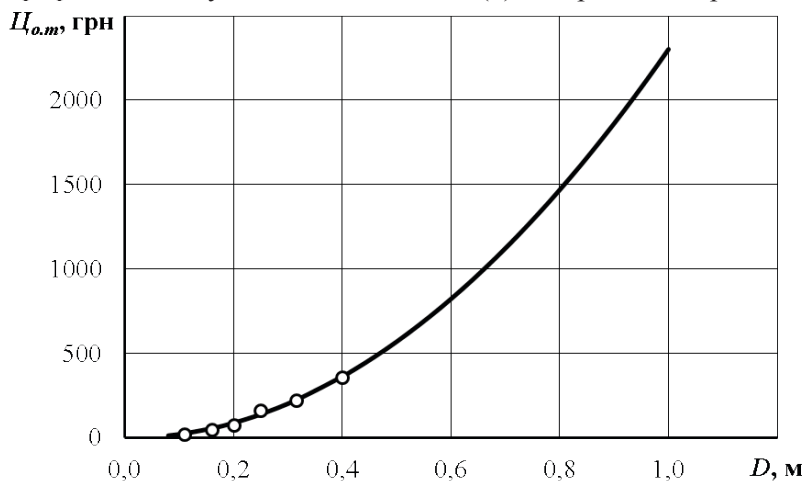
В результате получили следующую функциональную зависимость критической длины грунтового теплообменника от его диаметра:

$$H_{кр} = -5,252 + 95,869D + 183,35D^2 . \quad (5)$$

Используя [5], получили зависимость цены одного погонного метра обсадной трубы грунтового теплообменника от ее диаметра

$$C_{o.m} = -2,388 \cdot 10^{-2} D + 2,327 \cdot 10^{-3} D^2 . \quad (6)$$

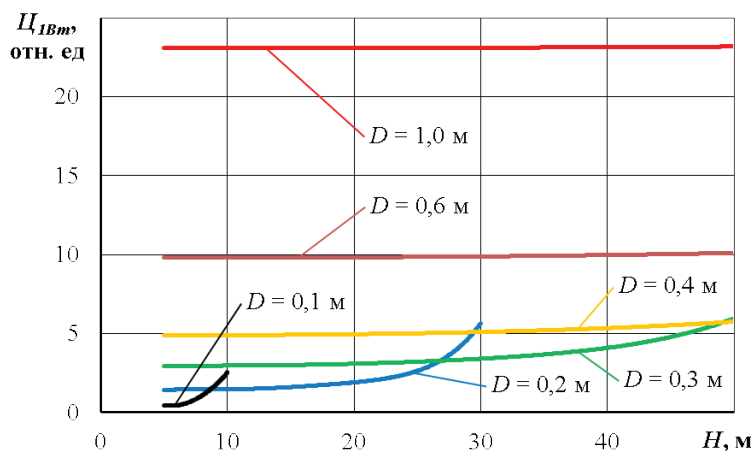
Графически полученная зависимость (6) изображена на рис. 4.

**Рис. 4.** График зависимости цены одного погонного метра обсадной трубы грунтового теплообменника от ее диаметра

Принимая, что цена бурения скважины под грунтовой теплообменник и прочие расходы пропорциональны цене обсадной трубы, становится возможным определить цену 1 Вт эффективной тепловой мощности C_{1Bm} , получаемой от геотермальной вентиляции, которая выражается в относительных единицах и характеризует экономическую эффективность использования геотермальной вентиляции. Полученные результаты представлены в табл. 4 и на рис. 5.

Таблица 4. Цена 1 Вт эффективной тепловой мощности грунтового теплообменника при его различных диаметрах и длинах

$H, \text{ м}$	$D, \text{ м}$					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	1,0
5	0,46	1,43	2,95	4,89	9,80	23,07
10	2,55	1,48	2,97	4,90	9,81	23,08
15	-	1,62	3,02	4,93	9,82	23,08
20	-	1,92	3,10	4,97	9,84	23,09
25	-	2,65	3,22	5,03	9,86	23,09
30	-	5,64	3,41	5,11	9,89	23,11
35	-	-	3,69	5,21	9,93	23,12
40	-	-	4,11	5,35	9,98	23,14
45	-	-	4,78	5,53	10,04	23,15
50	-	-	5,97	5,76	10,11	23,18

**Рис. 5.** Графики зависимости цены 1 Вт эффективной тепловой мощности от длины грунтового теплообменника при его различных диаметрах

Как видно из рис. 5, при превышении критической длины грунтового теплообменника (см. табл. 3) цена 1 Вт эффективной тепловой мощности резко возрастает. Это особенно хорошо видно для диаметра теплообменника $D = 0,2$ м. Так до критической длины, которая для этого диаметра составляет 20,6 м, цена 1 Вт эффективной тепловой

мощности практически линейно зависит от длины теплообменника. С превышением критической длины цена 1 Вт эффективной тепловой мощности уже квадратично зависит от длины теплообменника.

Поэтому превышать критическую длину теплообменника не только энергетически невыгодно, но и экономически.

Увеличение длины грунтовых теплообменников:

- уменьшает влияние сезонных изменений температур грунта, которые достигают глубины 15-20 м [6], что приводит к увеличению удельной тепловой мощности теплообменника и повышению эффективности использования геотермальной вентиляции;

- уменьшает взаимовлияние теплообменников, поскольку уменьшается количество теплообменников, необходимых для энергообеспечения животноводческого помещения и увеличивается расстояние между ними [7], что также повышает эффективность использования геотермальной вентиляции;

- требует применения обсадных труб большего диаметра, что повышает стоимость геотермальной вентиляции, как видно из рис. 5;

- связано с определенными техническими трудностями, что также повышает стоимость геотермальной вентиляции.

Одним из самых распространенных способов бурения скважин в настоящее время является шнековое бурение благодаря ряду технологических преимуществ (совмещение бурения с транспортировкой породы из скважины без применения промывки или продувки; отсутствие потребности в подаче охлаждающей среды (воды, воздуха и т. д.), так как долото достаточно эффективно охлаждается непосредственно грунтом, в который оно внедряется) и, как следствие, высокой производительностью и меньшим затратам на бурение. Этот способ применяют для получения скважин глубиной до 30 м [8, 9].

Поэтому длина теплообменника должна находиться в диапазоне 20-30 м. Нижняя граница этого диапазона обусловлена стремлением к уменьшению влияния сезонных изменений температур грунта и уменьшению взаимовлияния теплообменников для повышения эффективности использования геотермальной вентиляции. Верхняя граница диапазона обусловлена возможностями технических средств, реализующих высокопроизводительный и малозатратный шнековый способ бурения скважин под грунтовые теплообменники.

Из уравнения (5) для этого диапазона длин был определен диапазон диаметров грунтового теплообменника 0,193-0,249 м.

Выводы. Введено понятие критической длины грунтового те-

плообменника – длина теплообменника, обеспечивающая максимальное значение эффективной тепловой мощности при определенном диаметре теплообменника. Превышение критической длины теплообменника приводит к уменьшению эффективной тепловой мощности вследствие увеличения мощности, требуемой на прокачивание воздуха через теплообменник. Превышать критическую длину теплообменника также экономически невыгодно, так как при превышении критической длины грунтового теплообменника цена 1 Вт эффективной тепловой мощности резко возрастает. Получена функциональная зависимость критической длины грунтового теплообменника от его диаметра в виде уравнения (5).

Длина теплообменника должна находиться в диапазоне 20-30 м. Нижняя граница этого диапазона обусловлена стремлением к уменьшению влияния сезонных изменений температур грунта и уменьшению взаимовлияния теплообменников для повышения эффективности использования геотермальной вентиляции. Верхняя граница диапазона обусловлена возможностями технических средств, реализующих высокопроизводительный и малозатратный шнековый способ бурения скважин под грунтовые теплообменники.

Из уравнения (5) для этого диапазона длин был определен диапазон диаметров грунтового теплообменника 0,193-0,249 м.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. *Розробити* проект свинарського підприємства на 12000 голів відгодівлі в 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. *Бугаєвський В. М.* Вплив середовища та технології утримання на продуктивність свиней / В. М. Бугаєвський, О. М. Остапенко, М. І. Данильчук // Наукові праці: Науково-методичний журнал. Екологія. – Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2010. – Т. 132. – Вип. 119. – С. 59-61.
3. *Ковязин А. С.* Оптимизация режима работы грунтового теплообменника / А. С. Ковязин, М. Ю. Ковязина // Збірник наукових праць Інституту механізації тваринництва НААН «Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві». – Вип. 1(7). – Запоріжжя, 2011. – С. 114-123.

4. 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». – Вип. 1(9). – Запоріжжя, 2012. – С. 56-63.
5. Прайс-лист на канализационные трубы производства «Инсталпласт-ХВ» Украина (внутренняя и наружная канализация) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://altex.dp.ua/Vodostok/truby_kanalizacija_instalplast_ceny_s_marta_2012_g.pdf.
6. Васильев Г. П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев земли: дис. ... докт. техн. наук: 05.23.03 / Г.П. Васильев. – М., 2006. – 432 с.
7. 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.
8. Стаценко А. С. Технология строительного производства / А. С. Стаценко. – Ростов н/Д: Феникс, 2006. – 416 с.
9. Башкатов Д. Н. Бурение скважин на воду / Д. Н. Башкатов, В. П. Роговой. – М.: Колос, 1976. – 206 с.

ОБОСНОВАНИЕ ДЛИНЫ И ДИАМЕТРА ГРУНТОВОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

Визначені діапазони раціональної довжини й діаметра грунтового теплообменника.

Ключевые слова: *грунтовой теплообменник, диаметр, длина, эффективная тепловая мощность, экономическая эффективность.*

GROUND OF THE LENGTH AND DIAMETER OF THE GROUND HEAT EXCHANGER

Defined ranges of rational length and diameter of the ground heat exchanger.

Key words: *ground heat exchangers, diameter, length, the effective heat capacity, economic efficiency.*