

УДК 621.565.93

ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕОРЕТИЧНИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РОБОТИ ПОВІТРЯНОГО ҐРУНТОВОГО ТЕПЛООБМІННИКА

Д.О. Долгіх, аспірант¹,

О.С. Ковязін, канд. техн. наук, докторант²,

Є.О. Ренсевич, ст. наук. співр.

ННЦ «ІМЕСГ»

Виконано порівняння теоретичних і експериментальних досліджень роботи повітряного ґрунтового теплообмінника.

Ключові слова: геотермальна вентиляція, математична модель, теплова потужність.

Проблема. Забезпечення оптимального мікроклімату в тваринницьких приміщеннях вимагає значних витрат енергії. Усі відхилення від нормативних параметрів повітряного середовища негативно впливають на продуктивність тварин та ефективність виробництва. Внаслідок постійно зростаючої ціни енергоносіїв у всьому світі інтенсивно розвивається альтернативна енергетика: вітрова, сонячна, біогазова, геотермальна і т.д., що свідчить про актуальність розробок у цьому напрямку. Робочими органами геотермальної вентиляції є ґрунтові теплообмінники, що дають можливість використовувати теплову енергію поверхневих шарів ґрунту. Для обґрунтування параметрів геотермальної вентиляції теоретично було визначено теплову потужність ґрунтового теплообмінника [1], а також геометричні параметри [2]. Експериментальне визначення теплової потужності вимагає досить тривалих дослідів у часі, тому, з цієї метою була створена експериментальна установка, що дає змогу у повному обсязі провести експериментальні дослідження, результат роботи якої з високою точністю відображає процес тепловідбору з масиву ґрунту [4].

¹ Науковий керівник — Ковязін О. С., канд. техн. наук, ст. наук. співр.

² Науковий консультант — Шевченко І. А., д-р техн. наук, чл.-кор. НААН, проф.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботі [1] було отримано рівняння нестационарного температурного поля в оточуючому ґрунті при заданій інтенсивності процесу відводу теплоти. Однак, складність застосування цієї формули при розрахунках вимагає спрощення, і у зв'язку з цим була розроблена програма для наближеного рішення задачі, заснована на методі кінцевих елементів. У результаті, для прийнятих чисельних значень, визначили температурне поле, а головне, теплову потужність на одиницю довжини ґрунтового теплообмінника для різних його діаметрів як функцію часу. В роботі [2] автори визначили питому теплову потужність ґрунтового теплообмінника при різних його діаметрах. Була визначена ефективна теплова потужність ґрунтового теплообмінника при різних його діаметрах і довжини. Введено поняття критичної довжини ґрунтового теплообмінника. Обґрунтовано функціональну залежність критичної довжини ґрунтового теплообмінника від діаметра. Обумовлено довжину і діаметр ґрунтового теплообмінника. В роботі [3] проведений чисельний експеримент і отримані дані про ефективність використання ґрунтових теплообмінників для різного часу функціонування геотермальної вентиляції t , діаметра теплообмінників D , відстані між їх осями b , відстані теплообмінників і їх розташування $i \times j$. В роботі [4] авторами було висвітлено експериментальні дослідження функціонування повітряного ґрунтового теплообмінника, визначено оптимальні робочі параметри ґрунтового теплообмінника, визначено експериментальним шляхом ефективну теплову потужність повітряного ґрунтового теплообмінника.

Мета дослідження. Порівняти теоретичні і експериментальні дослідження роботи повітряного ґрунтового теплообмінника. Визначити відсоток розбіжності отриманих теоретичних і експериментальних результатів роботи повітряного ґрунтового теплообмінника.

Матеріали і методи. Теоретичні дослідження проводились за допомогою комп'ютерних програм «EXCEL», «ANSYS», та «MATHEMATICA». Експериментальні дослідження проводились на лабораторній установці в приміщенні кролеферми відділу біоекотехнічних систем у тваринництві, розташованому на о. Хортиця. Дані отримані з багатоканального пристрою моніторингу температури оброблялись за допомогою комп'ютерних програм «Excel» та «Mathematica». Термін проведення досліджень — 1.05.2013–1.09.2013. Температура зовнішнього повітря — 18–34°C. Тип ґрунту — суглинистий. Вологість ґрунту — 7,4 %. Щільність ґрунту — 1800 кг/м³.

Результати досліджень. Для повноцінного використання теплового потенціалу ґрунту через ґрунтовий теплообмінник необхідно прокачувати певну кількість повітря. При завищеній подачі ми не забезпечимо суттєвого ефекту у вигляді охолодження (нагрівання) прокачуваного повітря, а будемо лише витрачати енергію на прокачування повітря через ґрунтовий теплообмінник, яка навіть може перевищувати отримувану теплову енергію від теплообмінника. При заниженій подачі повітря тепловий потенціал ґрунту буде використовуватись не в повній мірі (рис. 1).

Таким чином, із збільшенням довжини теплообмінника має збільшуватися і кількість повітря, що прокачується через нього.

У першому наближенні будемо вважати, що подача повітря пов'язана з довжиною теплообмінника лінійною залежністю виду:

$$Q = Hk_Q, \quad (1)$$

де H — довжина теплообмінника, м; k_Q — коефіцієнт подачі, м²/год,

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

де q — питома теплова потужність ґрунтового теплообмінника, Вт/м; ΔT — різниця температур на вході і на виході з теплообмінника, яка може бути забезпечена на всьому діапазоні функціонування геотермальної вентиляції, К; C_p — питома теплоємність повітря, Дж/(кг×К); ρ_a — густина повітря, кг/м³.

На основі роботи [1] при часі функціонування геотермальної вентиляції $t = 10^7$ с (цей час відповідає середньому діапазону використання геотермальної вентиляції на одному з режимів — нагрів або охолодження) і різниці температур $\Delta T = 8$ К (прийнята середня різниця температур на основі наших попередніх експериментальних досліджень) була складена табл. 1.

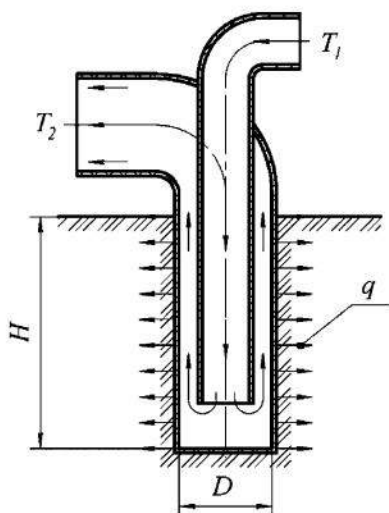


Рис. 1. Ґрунтовий теплообмінник з основними параметрами

Таблиця 1. Питома теплова потужність ґрунтового теплообмінника при різних діаметрах теплообмінника D і часу функціонування геотермальної вентиляції $t = 10^7$ с, а також різниці температур $\Delta T = 8$ К

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

Теплова потужність ґрунтового теплообмінника

$$P_m = qH, \quad (3)$$

В роботі [5] була розроблена математична модель, що дає можливість визначити P_n — потужність необхідну для прокачування повітря через ґрунтовий теплообмінник як функцію геотермічних параметрів теплообмінника, шорсткості стінок повітропроводу, а також температур повітря на вході і на виході з теплообмінника. Ефективна теплова потужність ґрунтового теплообмінника:

$$P_{\text{эф.м}} = P_m - P_n. \quad (4)$$

Була розроблена програма в середовищі комп'ютерної математики, яка дає можливість визначити ефективну теплову потужність ґрунтового теплообмінника в залежності від його діаметра і довжини. Результати розрахунків представлені в табл. 2 і на рис. 2.

Таблиця 2. Ефективна теплова потужність ґрунтового теплообмінника при різних його діаметрах і довжинах

$H, \text{ м}$	$D, \text{ м}$					
	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

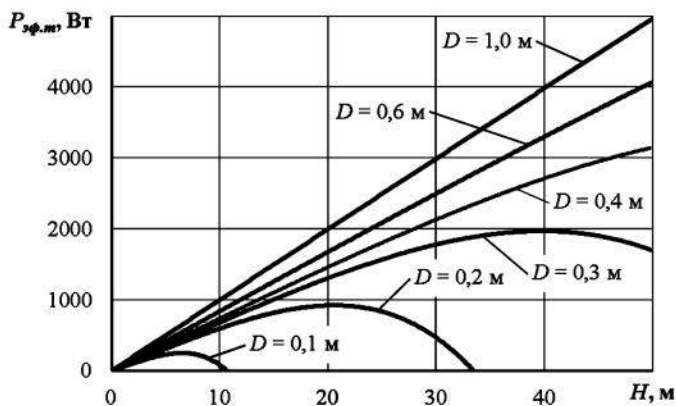


Рис. 2. Графіки залежності ефективної теплової потужності від довжини ґрунтового теплообмінника при його різних діаметрах

Як видно з рис. 2, від певного діаметра ґрунтового теплообмінника можливо отримати лише певне максимальне значення ефективної теплової потужності при деякій довжині теплообмінника. Перевищення критичної довжини теплообмінника призводить до зменшення ефективної теплової потужності внаслідок збільшення потужності, необхідної на прокачування повітря через теплообмінник.

Експериментальна установка (рис.3) складається з вертикального ґрунтового теплообмінника, системи подачі повітря та реєстрації температури зовнішнього і припливного повітря.

Ґрунтовий теплообмінник конструктивно складається з наступних основних частин:

- обсадної поліпропіленової труби, яка розміщена у вертикальній свердловині, а на поверхні має вихідний теплоізолюваний патрубков;
- діаметрально розміщеного в корпусі теплообмінника за допомогою центруючих дистанційних втулок-завихрювачів нагнітаючого повітропроводу;
- нагнітаючого відцентрового вентилятора.

Обсадна труба окрім свого основного призначення виконує роль корпусу теплообмінника і служить як теплообмінна поверхня між ґрунтом і повітрям, яке прокачується в міжтрубному просторі.



Рис. 3. Експериментальна установка

По нагнітаючому повітропроводу зовнішнє повітря попадає в нижню частину теплообмінника, а дистанційні втулки-завихрювачі інтенсифікують процес теплообміну між корпусом і повітрям. Вентилятор забезпечує подачу повітря в теплообмінник. Для регулювання подачі застосовується частотний перетворювач Danfoss VLT Micro Drive M3. Для запису на флеш-пам'ять значень температур зовнішнього і припливного повітря був розроблений багатоканальний пристрій. Технічна характеристика подана у табл. 3.

Таблиця 3. Технічна характеристика експериментальної установки

Показник	Величина
Внутрішній діаметр обсадної труби, мм	200
Товщина стінки обсадної труби, мм	3,0
Діаметр нагнітаючого повітропроводу, мм	100
Товщина стінки, мм	2,2
Глибина свердловини, м	15,0
Подача повітря, м3/год	0-550
Потужність електродвигуна вентилятора, кВт	1,1
Частота обертання вала електродвигуна, об/хв	2882

Основним показником для порівняння теоретичних і експериментальних досліджень було обрано ефективну теплову потужність — $P_{\text{еф.м.}}$, Вт. Згідно теоретичних досліджень, для ґрунтового теплообмінника діаметр обсадної труби якого дорівнює $D = 0,2$ м., а його довжина $H = 15$ м. ефективна теплова потужність становить $P_{\text{еф.м.}} = 817,3$ Вт. Експериментальна установка має діаметр обсадної труби $D = 0,2$ м., і довжину повітропроводу $H = 15$ м., тому справедливо порівнювати теоретичні розрахунки і експериментальні дані, отримані з лабораторної установки. Максимальна ефективна теплова потужність лабораторної установки склала $P_{\text{еф.м.}} = 750$ Вт., але цей параметр залежить від температури на вході в ґрунтовий теплообмінник. При теоретичних розрахунках різниця температур на вході і виході з ґрунтового теплообмінника приймалась рівною $\Delta T = 8^\circ\text{C}$, експериментально цей показник можна отримати, якщо температура на вході в ґрунтовий теплообмінник буде становити $T_{\text{вх}} \leq 36^\circ\text{C}$. Але максимальна температура влітку, що переважала протягом тривалого часу становила лише 34°C , і тому різниця температур на практиці переважаючою була $\Delta T = 7^\circ\text{C}$. При різниці температур на вході і виході $\Delta T = 8^\circ\text{C}$, експериментально встановлена ефективна теплова потужність $P_{\text{еф.м.}} = 851$ Вт.

Якщо порівнювати питому теплову потужність q , Вт/м, слід враховувати спрощення в теоретичних обчисленнях, що враховують неоднорідність ґрунту (пустоти), глибину свердловини до трьох метрів від поверхні горизонту, що піддається дії сезонних коливань температури і опадів. При експериментальних обчисленнях не враховувалась неоднорідність прилягання ґрунту до обсадної труби. Отже теоретична питома теплова потужність становить $q = 54,4$ Вт/м, експериментальна $q = 56,7$ Вт/м.

За чотири місяці роботи повітряного ґрунтового теплообмінника температура на виході з нього поступово підвищувалась, і у кінці досліджу було зафіксовано підвищення температури на $1,8^\circ\text{C}$. Такий параметр як поступове підвищення температури на виході з ґрунтового теплообмінника складно визначити теоретично. Але на практиці цей параметр має суттєве значення.

Для наочності на рис. 4 відображено розбіжності теоретичних і експериментальних досліджень роботи повітряного ґрунтового теплообмінника. Як видно з рис. 4, значення параметрів, отриманих при теоретичних розрахунках, несуттєво відрізняються від тих же параметрів отриманих експериментальним шляхом. Отже, можна користуватись теоретичними закономірностями при розрахунках

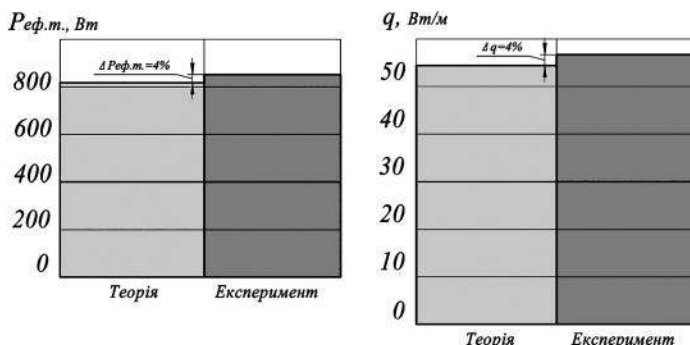


Рис. 4. Порівняння теоретичних і експериментальних досліджень

параметрів пристроїв ґрунтових теплообмінників для створення сприятливого мікроклімату у тваринницьких приміщеннях.

Висновки. Як видно з рис. 4, значення параметрів, отриманих при теоретичних дослідженнях, не дуже відрізняються від значень цих же параметрів, отриманих при експерименті, теоретична теплова потужність становить $P_{эф.м.} = 817,3$ Вт., експериментальна — $P_{эф.м.} = 851$ Вт. Визначено відсоток розбіжності отриманих теоретичних і експериментальних результатів роботи повітряного ґрунтового теплообмінника, який складає 4%. Тому можна користуватися теоретичними закономірностями для розрахунку параметрів повітряних ґрунтових теплообмінників.

Бібліографія

1. Ковязин А. С. Теоретическое определение тепловой мощности ґрунтового 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.
2. Ковязин А. С. Обоснование длины и диаметра ґрунтового теплообменника / А. С. Ковязин, Д. А. Долгих // Матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні». — Львів, 2013. — С. 179-182.

3. *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.
4. *Долгих Д. О.* Результаты экспериментальных исследований работы повітряного грунтового теплообмінника / Д. О. Долгих, О. С. Ковязин, Є. О. Реневич // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин». — Кіровоград: КНТУ, 2013. — Вип. № 43. — Ч. 1. — С. 263–267.
5. *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.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОТЫ ВОЗДУШНОГО ГРУНТОВОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

Выполнено сравнение теоретических и экспериментальных исследований работы воздушного грунтового теплообменника.

Ключевые слова: геотермальная вентиляция, математическая модель, тепловая мощность.

THE COMPARISON RESULTS OF THE THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OPERATION OF THE AIR GROUND HEAT EXCHANGER

The Summary. The comparison theoretical and experimental research operation of the air ground heat exchanger was performed.

Key words: geothermal ventilation, mathematical model, thermal power.