

УДК 621.565.93

## ВЗАИМОВЛИЯНИЕ ГРУНТОВЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ В ПРОЦЕССЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

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

Институт механизации животноводства

Национальной академии аграрных наук Украины

Тел./факс: (061) 289-81-44

**Величко И. Г.**, канд. физ.-мат. наук, проф.

Запорожский национальный технический университет

Министерства образования и науки, молодёжи и спорта Украины

Тел./факс: (0612) 64-21-41

**Долгих Д. А.**, аспирант<sup>1</sup>

Институт механизации животноводства

Национальной академии аграрных наук Украины

Тел./факс: (061) 289-81-44

*Разработана математическая модель, определяющая взаимовлияние грунтовых теплообменников в зависимости от основных параметров геотермальной вентиляции с учетом теплофизических свойств грунта.*

**Ключевые слова:** геотермальная вентиляция, взаимовлияние грунтовых теплообменников, нестационарная теплопроводность, математическая модель.

**Проблема.** 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 этом направлении.

Тепловая энергия поверхностных слоев грунта может использоваться с помощью геотермальной вентиляции, рабочими органами которой являются грунтовые теплообменники. Одним из главных параметров грунтовых теплообменников являются расстояние между их осями. При слишком частом расположении грунтовых теплообменников снижается эффективная тепловая мощность (раз-

---

<sup>1</sup> Научный руководитель – Ковязин А. С., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

ность между тепловой мощностью, получаемой от теплообменника и мощностью, затрачиваемой на прокачивание воздуха через него [1]) вследствие их взаимовлияния и уменьшения тепловой мощности. При слишком рассредоточенном расположении грунтовых теплообменников, увеличивается стоимость геотермальной вентиляции и растут ее габариты, что также снижает эффективную тепловую мощность вследствие увеличения мощности, затрачиваемой на прокачивание воздуха по каналам, соединяющим теплообменники между собой.

Поэтому для эффективного использования геотермальной вентиляции необходимо установить взаимовлияние грунтовых теплообменников в процессе ее функционирования.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работе [2] при определении количества теплоты, получаемой от системы грунтовых теплообменников, их взаимовлияние не учитывалось. В исследованиях [3] автор аппроксимирует систему грунтовых теплообменников линейным стоком тепла с длиной, равной общей длине его звеньев, что также не учитывает взаимовлияние теплообменников друг на друга. В работе [4] определена тепловая мощность отдельно взятого грунтового теплообменника при различных его диаметрах, что является началом решения проблемы.

**Цель.** Установить взаимовлияние грунтовых теплообменников в процессе функционирования геотермальной вентиляции.

**Материалы и методы.** Тепловая мощность грунтовых теплообменников определялась с использованием уравнения нестационарной теплопроводности. Для аппроксимации данных, полученных в результате теоретических экспериментов, использовался метод наименьших квадратов. Для упрощения полученных выражений и математического моделирования применялись специальные компьютерные программы.

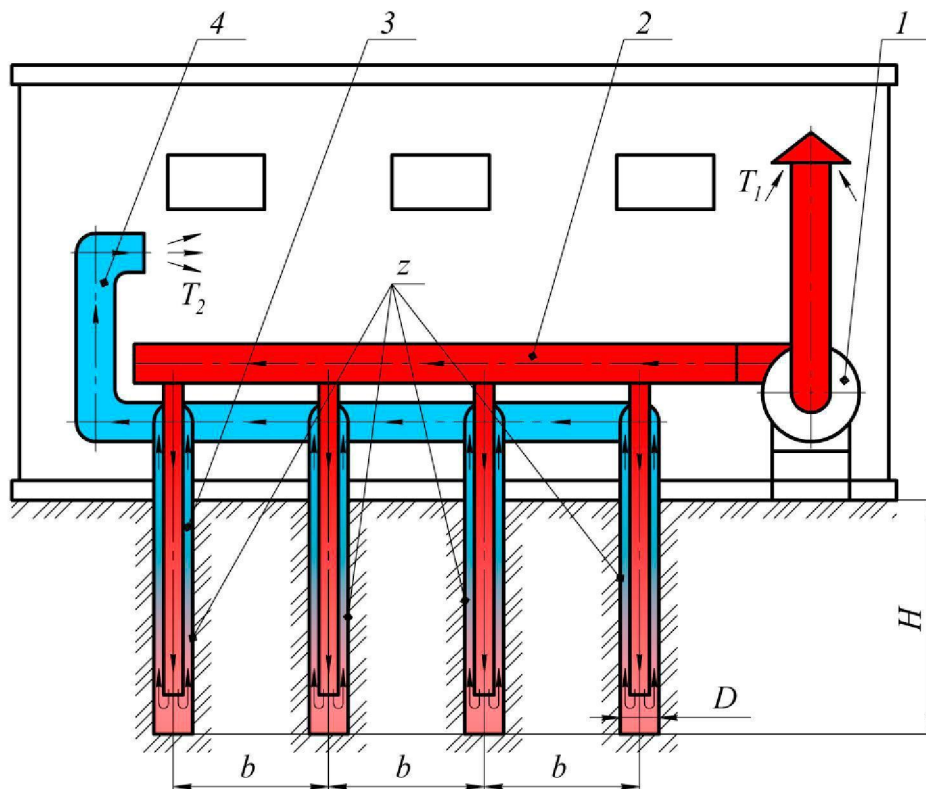
**Результаты исследований.** Геотермальная вентиляция (рис. 1) состоит из вентилятора 1, нагнетающего коллектора 2, грунтовых теплообменников 3, распределяющего воздуховода 4 [5].

Технологический процесс функционирования геотермальной вентиляции происходит следующим образом. Внешний воздух через заборную шахту втягивается вентилятором 1 и поступает в нагнетающий коллектор 2, а затем в грунтовые теплообменники 3. При прохождении воздуха с температурой  $T_1$  через грунтовые теплообменники он охлаждается (летом) или нагревается (зимой) до температуры  $T_2$ . После этого охлажденный (подогретый) воздух через воздуховод 4 подается в животноводческое помещение.

При исследовании теплового режима системы грунтовых теплообменников возникает задача определения нестационарного температурного поля в окружающем грунте при заданной интенсивности процесса отвода теплоты.

Введем следующие допущения:

- грунт является однородным и изотропным и его теплофизические свойства остаются постоянными с изменением температуры;
- температура на внутренней поверхности теплообменников по всей его длине постоянна;
- влияние теплового потока на поверхности грунта вследствие солнечной радиации не учитываем;
- тепловой поток, проходящий через дно теплообменника и ниже глубины  $H$ , не учитываем.



1 – вентилятор; 2 – нагнетающий коллектор; 3 – грунтовые теплообменники; 4 – распределяющий воздуховод

Рисунок 1 – Конструктивно-технологическая схема геотермальной вентиляции

Таким образом, требуется определить температурное поле неограниченного пространства с цилиндрическими полостями, если в начальный момент вре-

мени температура равна  $T_{zp}$ , а температура на поверхності полостей поддерживается равной  $T_6$ .

Введем прямоугольную систему координат  $OXY$  так, чтобы ее начало находилось в оси углового теплообменника, а ось  $OX$  проходила через оси ряда теплообменников (рис. 2).

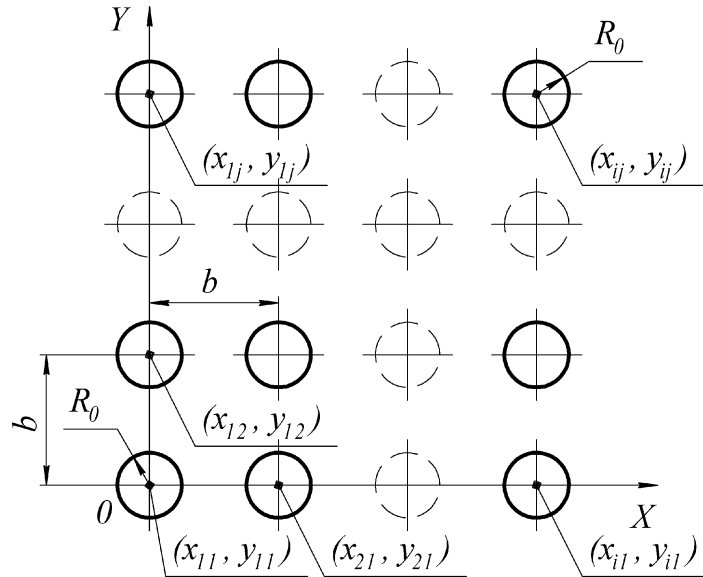


Рисунок 2 – Схема расположения теплообменников

Нестационарное двумерное уравнение теплопроводности в декартовых координатах (плоская задача) [6]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), (x, y) \in M, t \in [0, \infty)$$

где  $T(x, y, t)$  – температура в точке грунта, которая имеет координаты  $(x, y)$  в момент времени  $t$ , °C;

$t$  – время от начала процесса, с;

$a$  – коэффициент температуропроводности грунта, м<sup>2</sup>/с;

$M$  – область, занимаемая грунтом,

$$M = \mathbb{R}^2 \setminus \bigcup_{k=1}^i \bigcup_{m=1}^j S_{km},$$

где  $S_{km}$ ,  $k = \overline{1, i}$ ,  $m = \overline{1, j}$  – область, занимаемая теплообменником с индексами  $k$ ,  $m$ ,

$$S_{km} = \{(x, y), (x - (k - 1)a)^2 + (y - (m - 1)a)^2 < R_0^2\}$$

Коэффициент температуропроводности грунта

$$a = \frac{\lambda}{C \rho},$$

где  $\lambda$  – теплопроводность грунта, Вт/(м·°С);

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

$\rho$  – его плотность, кг/м<sup>3</sup>.

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

– начальное условие

$$T(x, y, 0) = T_{ep}, (x, y) \in M;$$

– граничные условия

$$T|_{P_{km}} = T_e, k = \overline{1, i}, m = \overline{1, j}, t \in [0, \infty),$$

где  $P_{km}$ ,  $k = \overline{1, i}$ ,  $m = \overline{1, j}$  – граница области, занимаемой теплообменником с индексами  $k$ ,  $m$ ,

$$P_{km} = \{(x, y), (x - (k - 1)a)^2 + (y - (m - 1)a)^2 = R_0^2\}$$

Тепловой поток, который проходит через все теплообменники в заданный момент времени функционирования геотермальной вентиляции

$$\Pi_{\Sigma}(t) = \lambda \sum_{k=1}^i \sum_{m=1}^j \int_{P_{km}} \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial n} d\ell,$$

$\frac{\partial T}{\partial n}$  –  
 где  $\frac{\partial T}{\partial n}$  – производная по нормали;  
 $dl$  – дифференциал дуги.

При фиксированных значениях параметров<sup>1</sup> эта задача решалась методом конечных элементов. В результате были получены поля температур  $T(x,y,t)$  (рис. 3) и тепловой поток, который проходит через все теплообменники  $\Pi_{\Sigma}(t)$  для различного количества  $z$  и расположения  $i \times j$  теплообменников, их диаметра  $D$  и межосевого расстояния  $b$ .

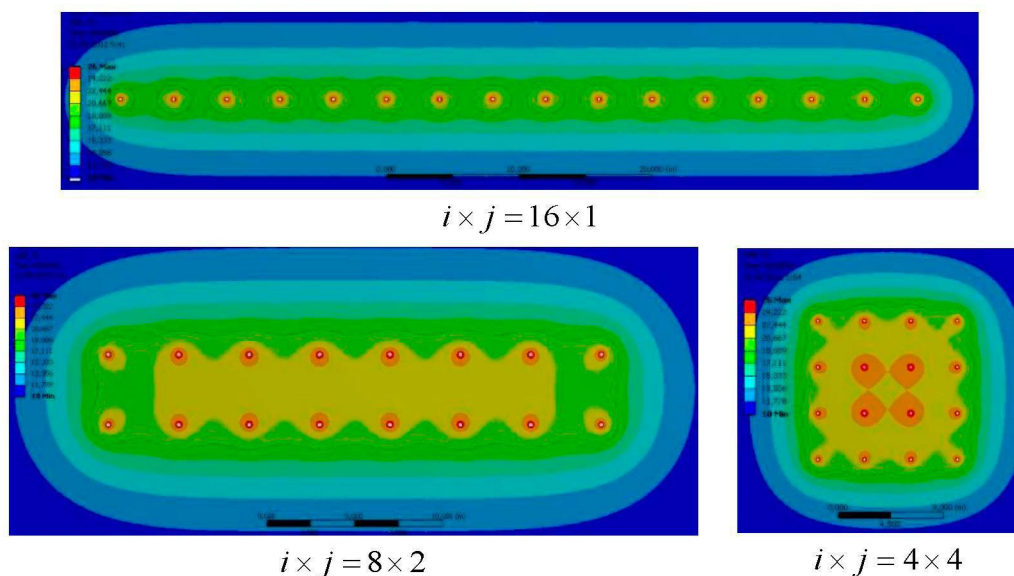


Рисунок 3 – Поля температур для различного расположения грунтовых теплообменников при  $z = 16$ ,  $D = 0,2$  м,  $b = 4$  м

Эффективность использования грунтовых теплообменников

$$E = \frac{\Pi_{\Sigma}}{z\Pi_1} \cdot 100 \%$$

где  $\Pi_1$  – тепловой поток отдельно взятого грунтового теплообменника [4].

Из рисунка 4 видно, что для повышения эффективности использования грунтовых теплообменников их следует располагать в один ряд. При расположении теплообменников в два и четыре ряда (для  $z = 16$ ,  $D = 0,2$  м,  $b = 4$  м) их эффективность уменьшается на 16,1 % и 22,0 % соответственно.

<sup>1</sup>  $T_{zp} = 10$  °С;  $T_e = 26$  °С;  $\lambda = 2,5$  Вт/(м·°С);  $C = 1100$  Дж/(кг·°С);  $\rho = 1800$  кг/м<sup>3</sup>;  $t = 9 \cdot 10^6$  с

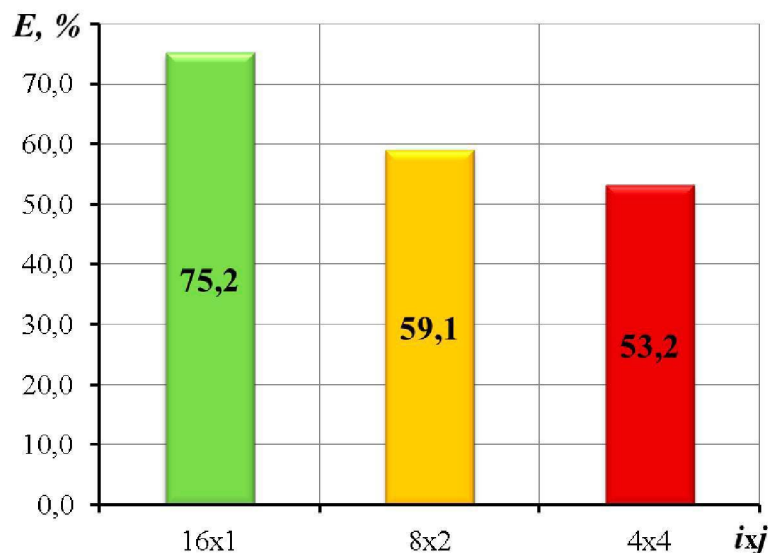


Рисунок 4 – Эффективность использования грунтовых теплообменников для их различного расположения при  $z = 16$ ,  $D = 0,2$  м,  $b = 4$  м

Проведенный численный эксперимент позволил получить данные об эффективности использования грунтовых теплообменников для различного времени функционирования геотермальной вентиляции  $t$ , диаметра теплообменников  $D$ , расстояния между их осями  $b$ , количества теплообменников  $z$  и их расположения  $i \times j$ . Также в программе имеется возможность изменять теплофизические свойства грунта.

Однако аппроксимация полученных данных для получения функциональной зависимости вида  $E = f(t, D, b, i, j)$  связано с определенными математическими трудностями.

На данном этапе исследований, используя метод наименьших квадратов, для наиболее эффективного однорядного расположения грунтовых теплообменников  $z = i \times 1$ , удалось получить зависимость  $E = f(D, b, z)$  вида

$$\begin{aligned}
 E = & 59,58 + 17,073 b - 1,714 b^2 + 0,0513 b^3 - 35,085 D + 23,99 D^2 - \\
 & - 10,0528 D^3 - 6,536 z + 0,488 z^2 - 0,0141 z^3 + 1,914 b D + \\
 & + 0,195 b z - 0,733 D z + 0,0627 b D z,
 \end{aligned} \tag{1}$$

которая с приемлемой для практических расчетов точностью (отклонения от значений элементов массива расчетных данных не превышают 2%), описывает влияние параметров геотермальной вентиляции на эффективность использования грунтовых теплообменников, а значит и их взаимовлияние.



Полученная функциональная зависимость (1) позволит, после экономических расчетов, обосновать параметры геотермальной вентиляции в конкретных условиях ее функционирования.

Кроме того, полученная зависимость будет справедлива также для работы грунтовых теплообменников в режиме нагревания воздуха при  $T_6 = -6 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Для графического представления полученной функциональной зависимости (1) один из параметров фиксировался на определенном уровне ( $b = 4 \text{ м}$ ,  $D = 0,2 \text{ м}$ ,  $i = 8$ ) и были построены поверхности (рис. 5).

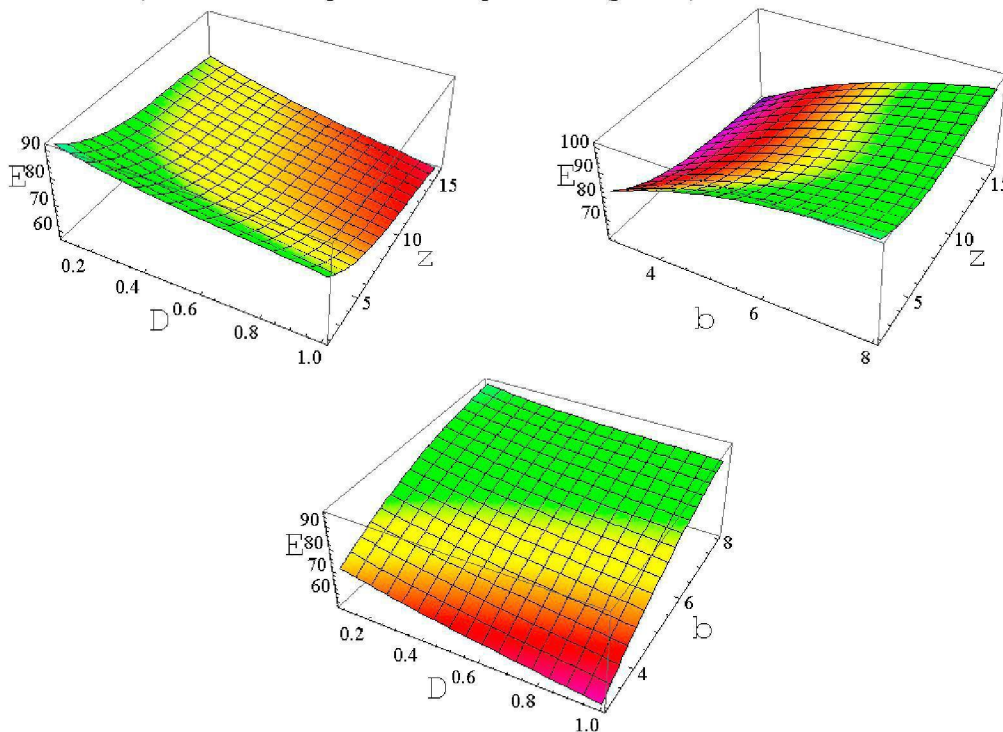


Рисунок 5 – Эффективность использования грунтовых теплообменников при различном сочетании параметров геотермальной вентиляции

**Выводы.** Проведен численный эксперимент и получены данные об эффективности использования грунтовых теплообменников для различного времени функционирования геотермальной вентиляции  $t$ , диаметра теплообменников  $D$ , расстояния между их осями  $b$ , количества теплообменников  $z$  и их расположения  $i \times j$ .

Для уменьшения взаимовлияния грунтовых теплообменников их следует располагать в один ряд, так как при расположении теплообменников в два и четыре ряда (для  $z = 16$ ,  $D = 0,2 \text{ м}$ ,  $b = 4 \text{ м}$ ) их эффективность уменьшается на 16,1 % и 22,0 % соответственно.



Для наиболее эффективного однорядного расположения грунтовых теплообменников  $i \times 1$ , разработана математическая модель (1), которая с приемлемой для практических расчетов точностью (отклонения от значений элементов массива расчетных данных не превышают 2 %), описывает влияние параметров геотермальной вентиляции на эффективность использования грунтовых теплообменников и позволит, после экономических расчетов, обосновать параметры геотермальной вентиляции в конкретных условиях ее функционирования.

#### Перечень ссылок

1. *Ковязин А. С.* Оптимизация режима работы грунтового теплообменника / А. С. Ковязин, М. Ю. Ковязина // Механізація, екологізація та конвертація біосировини в тваринництві.: зб. наук. праць / Ін-т мех. тваринництва НААН. – Запоріжжя, 2011. – Вип. 1(7). – С. 114–123. – ISSN2075-1591.

2. *Денисова А. Е.* Математическое моделирование процессов теплообмена в грунтовой системе теплоснабжения / А. Е. Денисова // Труды Одесского политехнического университета. – Вип. 1(10). – Одесса, 2000. – С. 87–92.

3. *Васильев Г. П.* Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли / Г. П. Васильев. – М. : Граница, 2006. – 176 с.

4. *Ковязин А. С.* Теоретическое определение тепловой мощности грунтового теплообменника / А. С. Ковязин, И. Г. Величко, Д. А. Долгих // Механізація, екологізація та конвертація біосировини в тваринництві.: зб. наук. праць / Ін-т мех. тваринництва НААН. – Запоріжжя, 2012. – Вип. 1(9). – С. 56–63. – ISSN2075-1591.

5. Розробити систему автономного енергозабезпечення тваринницьких об'єктів агропідприємств на основі комплексного використання відновлюваних джерел енергії: звіт про НДР (проміжн.) : № ДР 0111U004416 / кер. О. С. Ковязін, вик. В. П. Головаха, А. В. Шапошнікова // Інститут механізації тваринництва НААН. – Запоріжжя, 2011. – 116 с.

6. *Лыков А. В.* Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высш. шк., 1967. – 600 с.

#### INTERACTION BETWEEN GROUND HEAT EXCHANGERS IN THE PROCESS OF FUNCTIONING OF GEOTHERMAL VENTILATION

**Summary.** A mathematical model has been developed for the determination of the interaction between ground heat exchangers depending upon basic parameters of geothermal ventilation, with consideration of soil thermophysical properties.