



doi: 10.18720/CUBS.81.2

Работа горизонтальной системы теплосбора в почвенно-климатических условиях Краснодарского края

Operation of horizontal ground heat exchanger in climatic conditions of the Krasnodar region

Д.А. Чернышев^{1*}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, Санкт-Петербурге, Россия

D. Chernyshev^{1*}

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

тепловой насос; горизонтальный грунтовый теплообменник; коэффициент преобразования; системы теплосбора; температурное распределение;

KEYWORDS

heat pump; horizontal ground heat exchanger; coefficient of performance; heat-collector systems; temperature distribution;

АННОТАЦИЯ

В работе исследуются режимы работы горизонтального грунтового теплообменника теплового насоса в условиях Краснодарского края. Моделирование показало, что при увеличении значения съема тепла с грунта горизонтальным грунтовым теплообменником с 25 Вт/м до 95 Вт/м минимальная температура грунта в отопительный период в области залегания теплообменника падает с 3,6 °С до -1,6 °С, при этом коэффициент преобразования теплового насоса уменьшается с 2,49 до 1,98. Согласно результатам расчетного моделирования в летний период температура грунта в зоне теплообменника при малом отборе тепла достигает температура непо потревоженного грунта, при максимальном отборе в рамках рассматриваемой задачи температур грунта падает на 1 °С по сравнению с температурой непо потревоженного грунта.

ABSTRACT

Modes of operation of horizontal ground heat exchanger of heat pump in Krasnodar region of Russia are investigated in this work. Ground temperature decreases from 3,6 °C to -1,6 °C in the area of the heat exchanger during the heating period due to increase of the heat removal of the heat exchanger from 25 W/m to 95 W/m, in this connection the coefficient of performance respectively decreases from 2,49 to 1,98. According to the results of mathematical modeling the temperature of the ground in the case of minimum heat removal reaches a temperature of undisturbed ground, the temperature of the ground in the case of maximum heat removal is reduced by 1 °C compared to the temperature of undisturbed ground.

Содержание

1.	Введение	18
2.	Методы	20
3.	Результаты и обсуждение	23
4.	Заключение	26

1. Введение

По оценке Мировой энергетической комиссии к 2020 году в мире около 75% нагрузки на систему отопления и горячего водоснабжения будут приходиться на тепловые насосы [1]. Для России, с характерной централизованной системой теплоснабжения, стандартные схемы применения теплонасосных установок (ТНУ) неэффективны. Применение устройство хотя и носит локальный характер, однако, длительный отопительный период и вследствие чего большие тепловые нагрузки делают применение ТНУ выгодным решением, требующим особого внимания.

Эффективность и правильный режим работы ТНУ во многом зависит от температуры источника низкопотенциальной теплоты в течение всего отопительного периода. Низкопотенциальное тепло может быть получено от поверхностных или подземных вод, атмосферного воздуха, грунта, промышленных и технологических процессов [1].

Исходя из анализа почвенно-климатических условий России, наиболее перспективным источником низкопотенциального тепла для ТНУ является грунт [2]. В качестве системы теплосбора применяются грунтовые теплообменники (ГТ).

Наиболее распространены ГТ вертикального типа, которые требуют больших капитальных вложений. Альтернативой вертикальным системам теплосбора могут являться ГТ горизонтального типа, которые располагаются на небольшой глубине, но ниже глубины промерзания [2]. Температура приповерхностного грунта (до 10 м) формируется под воздействием атмосферного воздуха, солнечной радиации, атмосферных осадков, поэтому температурный режим массива грунта подвержен сезонным и суточным колебаниям. Принимая данный факт во внимание, наиболее благоприятные условия для применения теплообменников горизонтального типа сложились в регионах с теплым климатом [3].

При работе систем теплосбора тепловой режим приповерхностного грунта зависит от режима работы ТНУ и ГТ. При теплосъеме температура грунтового массива понижается вблизи системы теплосбора в течение отопительного периода. В межотопительный период грунт должен прогреться до своего непотревоженного состояния. Однако нередко бывает, что за летний период грунт не набирает необходимый тепловой потенциал, что оказывает негативное влияние на режим работы ТНУ [4]. Таким образом, при проектировании ГТ горизонтального типа встает задача определения рационального режима работы ТНУ, установка которого позволит использовать приповерхностный грунт в качестве источника теплоты в течение длительного периода и избежать истощения энергии грунта для требуемого производства тепла ТНУ. В работе Васильева область подобных исследований называется анализом тепловой устойчивости грунта [5].

Удельный теплосъем с грунтового массива горизонтальным ГТ для почвенно-климатических условий Европы по одним данным составляет 10-25 Вт/м, по другим данным может достигать до 50-60 Вт/м [5]. При таком разбросе данных значений практически невозможно определить оптимальный режим работы ГТ и ТН. Основной проблемой, которая может встать при эксплуатации ТН с ГТ, это либо нехватка низкопотенциального тепла грунта в течение отопительного периода или снижение теплового потенциала грунтового массива с течением лет.

Целью данной работы является получение зависимости эффективности работы ТНУ, выраженной в коэффициенте преобразования тепловой энергии (COP), от значения отобранной энергии грунта, полученной с помощью работы ГТ горизонтального типа в условиях региона России с теплым климатом.

Для достижения цели необходимо решить задачи:

1. Создать математическую модель системы «массив грунта – горизонтальный ГТ»;
2. Установить временную зависимость изменения температуры грунтового массива при естественном состоянии и при работе грунтового теплообменника.

Принимаем следующие допущения и ограничения:

1. Теплотехнические свойства грунтового массива неизменны. Удельная теплоемкость $c_p=1630$ Дж/(кг·°С), теплопроводность грунта $\lambda=1,12$ Вт/м·°С, температуропроводность $a=4,6 \cdot 10^{-7}$ м²/с [6, 7]. Данные свойства близки к теплофизическим свойствам чернозема при гидрологических константах ВР и ВРК;
2. Теплопоступление от солнечной радиации отсутствует;
3. Теплосъем с грунтового массива в течение отопительного периода постоянен для каждого расчетного случая.

В качестве климатических условий примем условия города Краснодар, Краснодарский край, Россия.

Для расчёта температуры грунта воспользуемся формулой, предложенной в работах [8-11]:

$$T_z = \bar{T}_e + (T_{e.cpm} - \bar{T}_e) \cdot \exp\left(z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3600at_0}}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{t_0} - \varphi_0 - z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3600at_0}}\right), \quad (1)$$

где \bar{T}_e - среднегодовая температура воздуха рассматриваемого региона, °С; $T_{e.cpm}$ - средняя температура месяца; t - время с начала года, ч; t_0 - продолжительность года, 8760 ч; φ_0 - сдвиг фазы максимальной температуры по отношению к началу года, $\sim 1,06\pi$; z - глубина, м; a - температуропроводность грунта, м²/с.

На рис. 1 представлены графики изменения температуры воздуха и грунта в течение года, согласно уравнению (1).

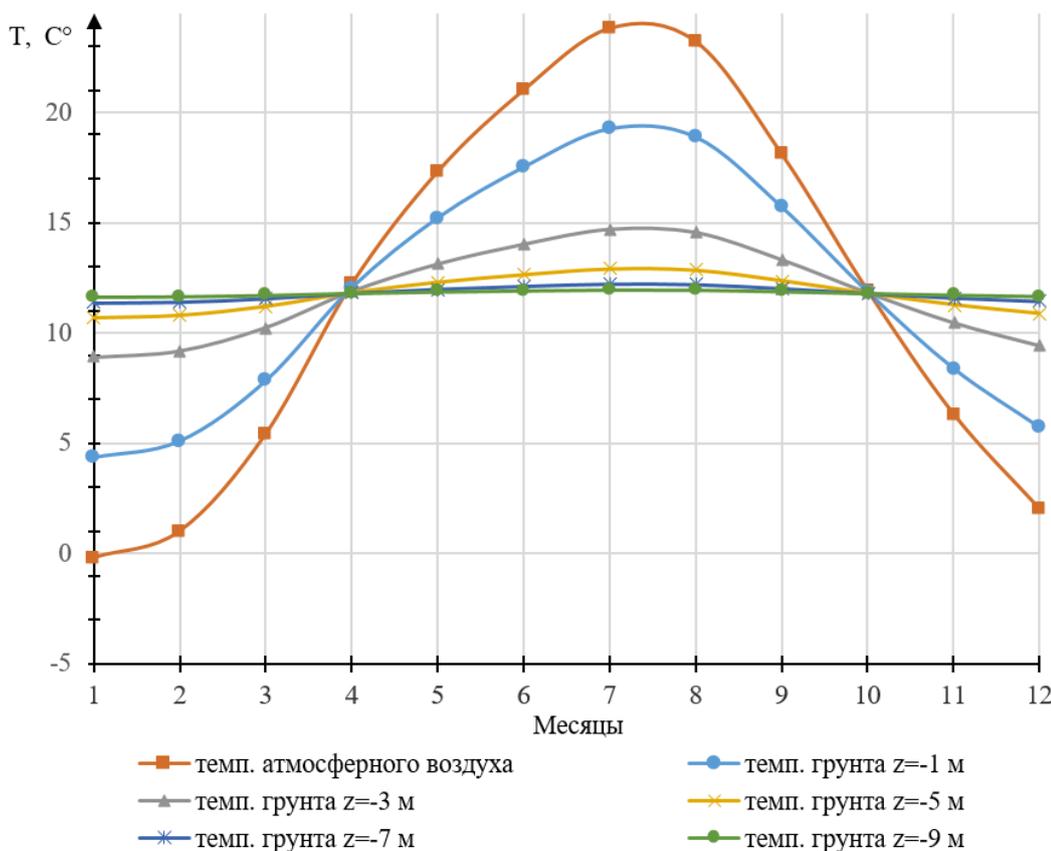


Рисунок 1. Полученные данные годового изменения температуры атмосферного воздуха и грунта на различной глубине заложения для г. Краснодара

Из рис. 1 видно, что температуры грунта и воздуха существенно отличаются друг от друга. Вследствие большой тепловой инерции температура грунта имеет меньшую амплитуду изменения температуры по сравнению с атмосферным воздухом. Из этого следует определенное преимущество грунта как источника/приемника теплоты по отношению к воздуху.

2. Методы

В качестве расчетной модели массива грунта выбран сплошной параллелепипед с заданными теплотехническими свойствами, горизонтальные грани которого имеют размеры $a=15$ м и $b=25$ м, а вертикальный размер $h=10$ м. На глубине 1,5 м от верхней грани расположен теплообменник змеевикового типа (полиэтиленовый трубопровод).

Для расчета нестационарного температурного поля грунтового массива необходимо решить краевую задачу теплопроводности [4, 9], в основе которой лежит следующее уравнение:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 \cdot T, \tag{2}$$

где T - текущая температура грунта, °C; τ - время, с; ∇ - оператор Лапласа.

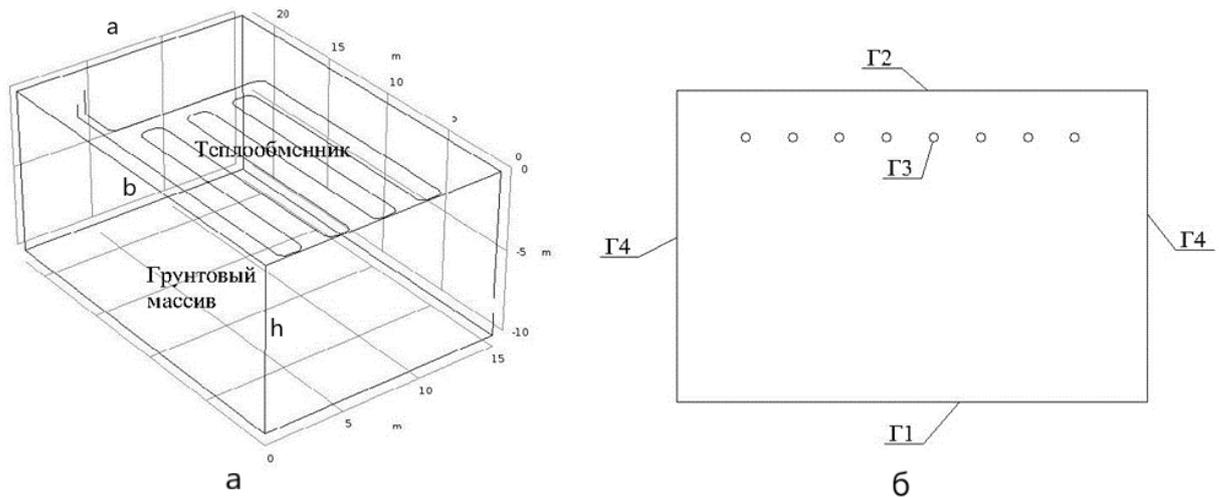


Рисунок 2. Схема расположения ГТ змеевикового типа в грунтовом массиве (а) и расчетная схема с границами задачи (б)

Для решения задач формулируем четыре граничных условия.

Учтем постоянный тепловой поток радиогенного тепла $q = const$ на границе Г1 (условие второго рода).

Атмосферный воздух воздействует на грунт через его поверхность - границу Г2. Выразим данное взаимодействие следующим уравнением (условие третьего рода):

$$-\lambda_1 \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{n=0} = \alpha_n \cdot (T - T_{нв}), \quad (5)$$

где λ_1 – теплопроводность грунта, Вт/(м·°С); α_n - коэффициент теплоотдачи поверхности грунта, Вт/м² °С; $T_{нв}$ - температура окружающей среды, °С.

Воздействие ГТ на массив грунта происходит на внешней стенке трубопровода теплообменника, на границе Г3, и выражается следующим уравнением (условие третьего рода):

$$-\lambda_2 \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{n=0} = \alpha_s \cdot (T - T_s), \quad (6)$$

где α_s – коэффициент теплоотдачи внутренней стенки трубы к теплоносителю, Вт/(м²·°С); T_s – средняя температура рассола на участке трубопровода, °С; λ_2 – коэффициент теплопроводности стенки трубы теплообменника, Вт/(м·°С).

На боковых гранях заданного параллелепипеда, граница Г4, принято условие отсутствия теплового потока:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{n=0} = 0 \quad . \quad (7)$$

Расчеты температуры грунта и теплообменника произведём с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics. Разбивка расчетной трехмерной модели массива грунта с теплообменником на конечные элементы представлена на рисунке 3. Размеры конечных элементов сетки находятся в диапазоне 0,01 – 0,5 м.

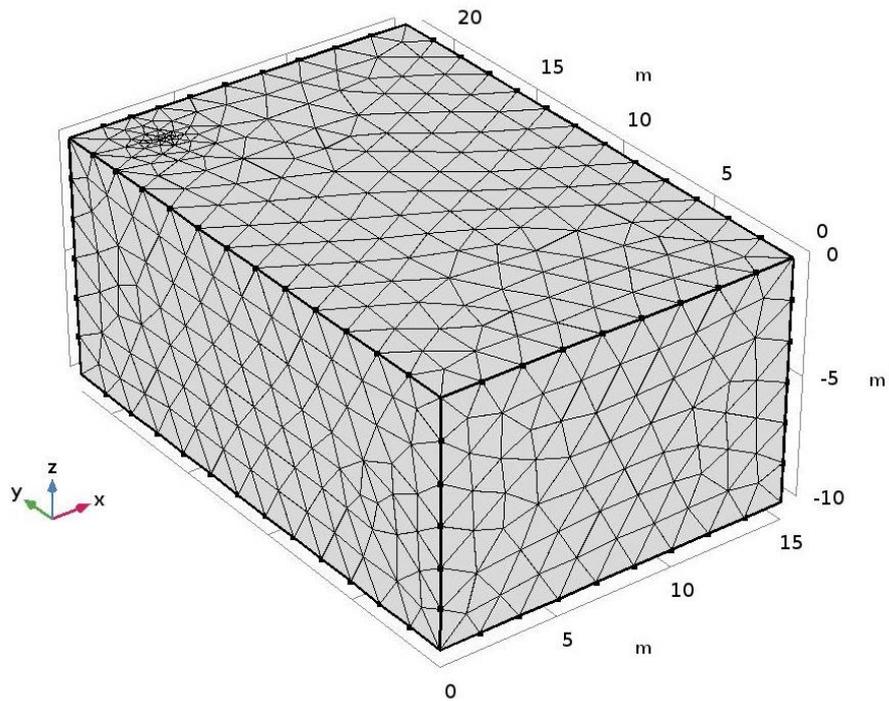


Рисунок 3. Сетка конечных элементов расчетной модели массива грунта

На рисунке 4 представлены графики изменения температуры грунта на разной глубине в течение 5 лет при естественном состоянии, основанные на полученных результатах моделирования. Исходные значения температуры грунта в январе были приняты согласно рисунку 1.

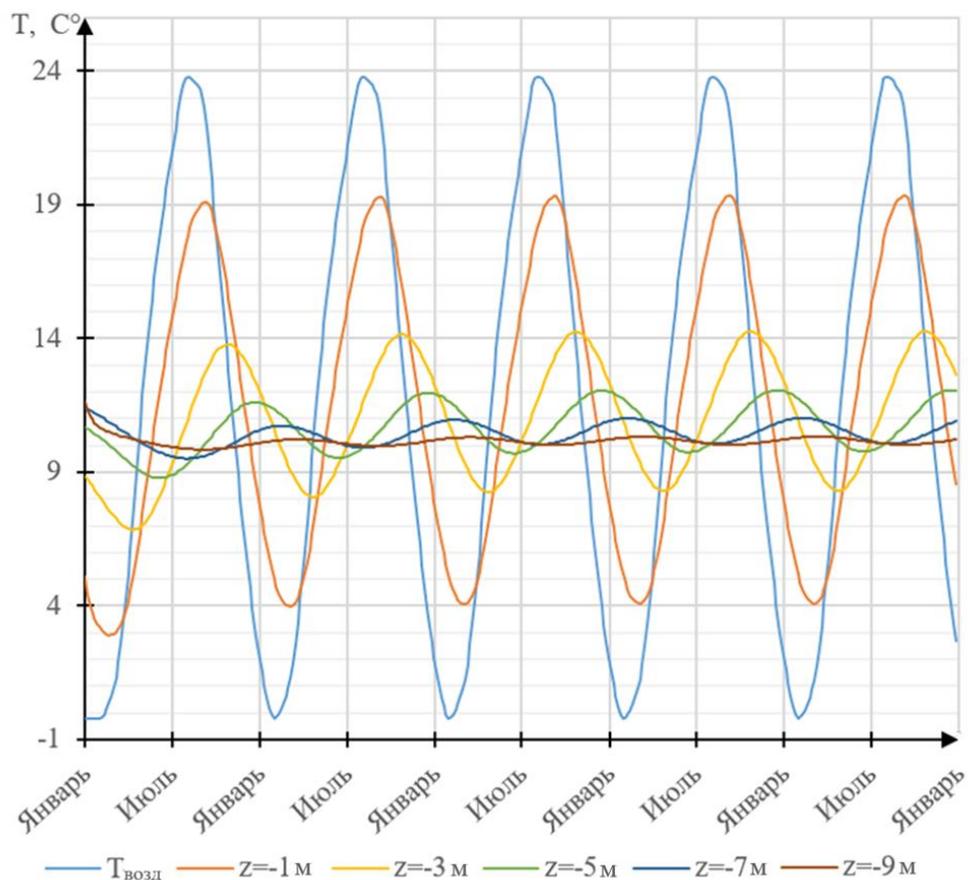


Рисунок 4. Изменение температуры грунта в течение 5 лет на различной глубине

Взаимодействие ГТ с грунтовым массивом описывается уравнением [12, 13]:

$$\rho_f \cdot A_p \cdot c_p \cdot \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f \cdot A_p \cdot c_p \cdot \nabla T_f = \nabla \cdot (\lambda_f \cdot A_p \cdot \nabla T_f) + \frac{1}{2} \cdot f_D \cdot \frac{\rho \cdot A_p}{2 \cdot d_h} \cdot |u| \cdot u^2 + Q + Q_{wall} \quad (8)$$

где ρ_f - плотность теплоносителя в ГТ, кг/м³; A_p - площадь живого сечения трубы ГТ, м²; c_p - удельная теплоемкость теплоносителя в ГТ, Дж/(кг·°C); T_f - температура теплоносителя в ГТ, °C; u - скорость течения теплоносителя в ГТ, м/с; λ_f - коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/(м·°C); f_D - коэффициент трения; d_h - гидравлический диаметр, м; Q - количество теплоты, полученной ГТ от грунтового массива, Вт; Q_{wall} - теплота, характеризующая теплообменом с окружающей средой через стенку трубы, Вт/м.

Режимы работы ГТ устанавливаются согласно уравнению [14, 15]:

$$T_{in} = T_{out} - \frac{P}{\rho_f \cdot c_p \cdot q} \quad (9)$$

где T_{in} - температура теплоносителя ГТ на выходе из внутреннего контура теплового насоса, °C; T_{out} - температура теплоносителя ГТ перед входом во внутренний контур теплового насоса, °C; P - мощность ГТ, кВт; q - объемный расход теплоносителя в ГТ, м³/с.

Для реализации расчетной модели (2)-(9) были проведены расчеты, в которых использовались следующие исходные данные:

- диаметр трубопровода ГТ $d=40$ мм;
- длина ГТ $l=143$ м;
- шаг между трубами $s=1,5$ м;
- глубина заложения теплообменника в грунте 1,5 м;
- коэффициент теплоотдачи поверхности грунта $\alpha_n=5,8$ Вт/(м²·°C) [16-18];

- разные режимы работы ТН заданы путем изменения значений мощности теплообменника для каждого расчетного случая. Значения мощности Р ГТ приняты неизменными в течение отопительного периода и равны для каждого расчетного случая: 3,57 кВт, 6,93 кВт, 10,34 кВт, 13,7 кВт. Разделив данные значения мощности ГТ на значение его длины, получаем удельный съем тепла на 1 погонный метр трубы ГТ с грунтового массива для каждого расчетного случая, которые соответственно равны: 25 Вт/м, 48 Вт/м, 72 Вт/м и 95 Вт/м;

- объемный расход теплоносителя ГТ $q=0,001$ м³/с;
- температура испарения T_e в ТНУ равна температуре теплоносителя на выходе из ГТ.

3. Результаты и обсуждение

При работе ГТ за счет постоянного отвода тепловой энергии температура грунтового массива снижается у наружной стенки теплообменника. Согласно заданным условиям задачи значение теплового потока, отводимого теплообменником, постоянно для каждого рассматриваемого случая, вследствие чего температура теплоносителя на входе в ГТ понижается с понижением температуры грунта.

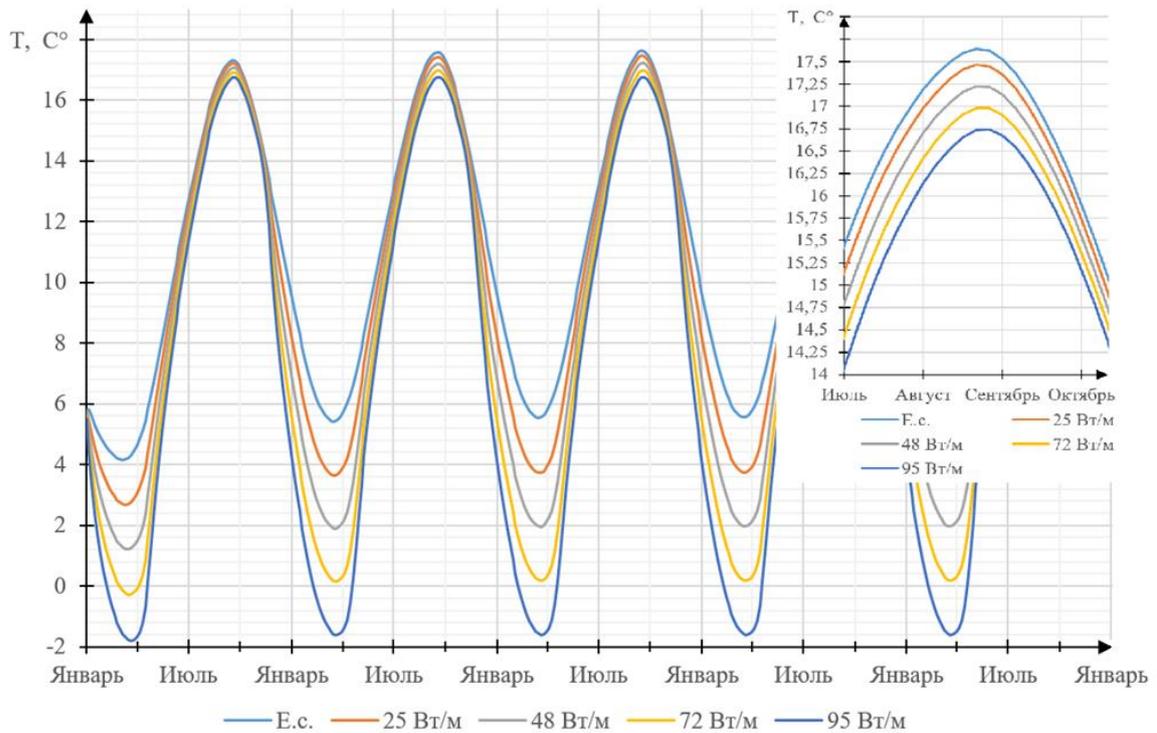


Рисунок 5. Изменение температуры грунта на глубине заложения теплообменника ($z=-1,5$ м) в течение 5 лет при разном съеме тепла и при естественном состоянии (Е.с.)

На рисунке 5 показано изменение температуры грунта в течение 4 лет при разных режимах эксплуатации ТНУ. В целом, в рассматриваемых условиях в летний период тепловой потенциал грунтового массива восстанавливается благодаря аккумулярованию тепла, температура грунта в межотопительный период при его эксплуатации в холодное время отличается незначительно: при максимальной расчетной нагрузке ГТ (95 Вт/м) температура снижается на 1 $^{\circ}\text{C}$ при заданных начальных условиях. На рис. 6 показаны температурные поля грунтового массива и ГТ при максимальном отборе тепла в различные месяцы года.

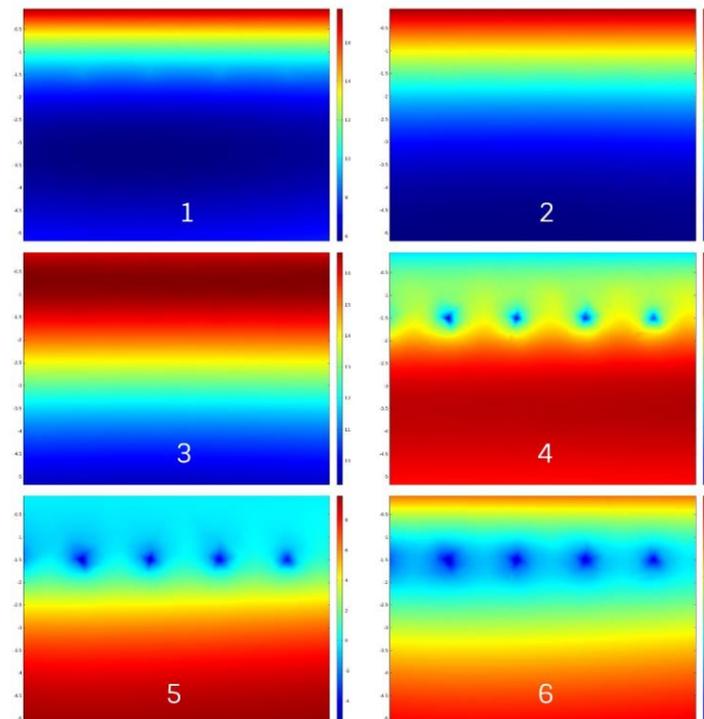


Рисунок 6. Температурные поля грунтового массива и ГТ при отборе тепла 95 Вт/м . 1-май, 2-июль, 3-сентябрь, 4-ноябрь, 5-январь, 6-март

Как видно из рисунка 6 в рассматриваемых условиях при максимальном отборе тепла в рамках задачи не наблюдается зон снижения температуры и неравномерного температурного градиента грунтового массива в летний период времени. За счёт относительно высокой средней температуры атмосферного воздуха в летний период тепловой потенциал грунта достигает значений практически равных тепловому потенциалу непотревоженного грунтового массива.

Разница температур грунта на глубине заложения теплообменника при сравнении в непотревоженном состоянии и при эксплуатации ГТ в режиме отбора тепла 25 Вт/м достигает 2 °С; в режиме отбора тепла 95 Вт/м данная разница увеличивается и достигает 7,2 °С.

Воспользуемся программным обеспечением Copeland Select 8 для получения параметров температуры испарения T_e и температуры конденсации T_c рабочего тела. В качестве спирального компрессора, применяемого в тепловых насосах, примем ZH56K4E-TWD Copeland. Данные параметры представим в таблице 1: очевидно, что при понижении температуры испарения, коэффициент преобразования ТНУ (COP) также снижается.

Таблица 1. Коэффициент преобразования ТНУ (компрессор ZH56K4E-TWD Copeland) при различных температурах испарения T_e и конденсации T_c рабочего тела ТН.

$T_e \backslash T_c$	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	7	10
40	1,32	1,64	2,00	2,42	2,90	3,43	4,00	4,24	4,60
45	1,17	1,44	1,75	2,11	2,53	3,00	3,51	3,72	4,05
50	-	1,26	1,53	1,84	2,20	2,6	3,05	3,24	3,54
55	-	-	1,33	1,60	1,90	2,25	2,63	2,80	3,06
60	-	-	-	1,38	1,63	1,92	2,26	2,40	2,63
65	-	-	-	-	1,39	1,64	1,92	2,04	2,23
67	-	-	-	-	-	1,53	1,79	1,91	2,09

При температуре конденсации $T_c=55$ °С в ТНУ зависимость COP от температуры источника будет иметь следующую регрессионную зависимость:

$$COP = T_{out} \cdot 0,00079 + 0,073 \cdot T_{out} + 2,25 . \tag{10}$$

Построим графики изменения коэффициента преобразования на протяжении отопительного периода согласно уравнению (10) и полученным при моделировании значениям температуры теплоносителя для разных режимов работы ГТ. Согласно им (рис. 7) при режиме максимального отбора тепла в конце отопительного периода COP снижается до 1,98. Средние значения COP на протяжении отопительного периода равны 2,84 и 2,39 соответственно при минимальном и максимальном отборах тепла ГТ соответственно.

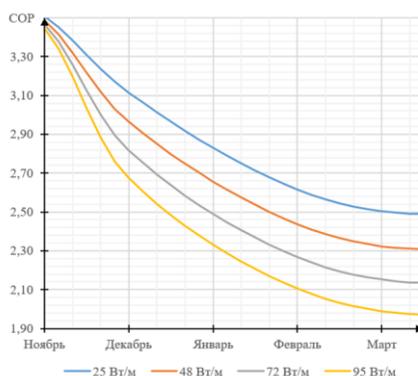


Рисунок 7. Зависимость коэффициента преобразования от удельной величины теплосъема горизонтальным ГТ при температуре конденсации $T_c=55$ °С

4. Заключение

Разработана расчетная модель «ГТ-массив грунта», позволяющая проводить численные исследования с оценкой влияния конструктивных и режимных параметров ГТ на коэффициент преобразования.

В результате проведенного анализа работы горизонтального ГТ установлено, что в рассматриваемых условиях при повышении значения отбора тепла системой теплосбора с 25 Вт/м до 95 Вт/м минимальная температура грунта в области залегания ГТ снижается соответственно с 3,6 °С до -1,6 °С. Данное снижение приводит к уменьшению коэффициента преобразования соответственно с 2,49 до 1,98 при температуре испарения рабочего тела в конденсаторе ТН $T_c=55$ °С, что приводит к уменьшению эффективности работы теплового насоса на 25%.

В рассматриваемых условиях не наблюдается уменьшение теплового потенциала грунта, в летний период разница максимальной температуры непо потревоженного грунта и грунта, отдающего тепловую энергию, в области залегания ГТ не превышает 1 °С, и данная разница не меняется на протяжении нескольких отопительных периодов.

Таким образом, согласно приведённым расчетам в условиях г. Краснодар благодаря восстановлению теплового потенциала грунтового массива в межотопительный период есть возможность увеличения отбора тепловой энергии горизонтальной системой теплосбора, что дает возможность уменьшения площади, занимаемой ГТ, и тем самым уменьшение капитальных затрат, однако в таком случае необходимо учитывать падение эффективности ТН на протяжении отопительного периода, что в большинстве случаев может быть экономически нецелесообразно при длительной эксплуатации ТН.

Литература

- [1]. Батухин А. Г. Использование тепловых насосов для повышения тепловой мощности и эффективности существующих систем централизованного теплоснабжения // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2010. № 2-2 (100). С.28-33.
- [2]. Васильев Г. П. Геотермальные теплонасосные системы теплохладоснабжения зданий и сооружений // Наука и техника транспорта. 2006. № 1. С. 78-87.
- [3]. Васильев Г.П., Песков Н.В., Горнов В.Ф., Колесова М.В. Эффективность использования низкопотенциального геотермального тепла в климатических условиях территории России // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2015. № 3. С. 30-38.
- [4]. Тарасова В.А., Харлампики Д.Х., Шерстюк А.В. Моделирование тепловых режимов совместной работы грунтового теплообменника и теплонасосной установки // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2011. № 8 (53). С. 34-40.
- [5]. Васильев Г. П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной энергии поверхностных слоев Земли. М.: Граница, 2003. 176 с.
- [6]. Макарычев С.В. Теплофизические свойства черноземов (на примере дендрария НИИСС им. М.А. Лисавенко) // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2018. № 2 (160). С. 37-42.
- [7]. Архангельская Т.А., Величенко М.В., Тихонравова П.И. Тепловые свойства типичных черноземов Курской области // Почвоведение. 2016. № 10. С. 1178-1185.
- [8]. Филатов С.О., Володин В.И. Работа теплообменников утилизации теплоты грунта // Труды БГТУ. №3. Химия и технология неорганических веществ. 2011. № 3. С. 179-184.

References

- [1]. Batuhin A. G. Ispol'zovanie teplovykh nasosov dlya povysheniya teplovoj moshchnosti i effektivnosti sushchestvuyushchih sistem centralizovannogo teplosnabzheniya [Use of heat pumps to increase the heat capacity and efficiency of existing district heating systems]. St. Petersburg State Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology. 2010. No. 2-2(100). Pp. 28-33.
- [2]. Vasil'ev G.P. Geotermalnyye teplonasosnyye sistemy teplokhadosnabzheniya zdaniy i sooruzheniy [Geothermal heat-pump systems of heat and cold supply in buildings and constructions]. Science and technology in transport. 2006. No. 1. Pp. 78-87.
- [3]. Vasil'ev G.P., Peskov N.V., Gornov V.F., Kolesova M.V. Effektivnost ispol'zovaniya nizkopotentsialnogo geotermalnogo tepla v klimaticheskikh usloviyakh territorii Rossii [Efficiency low-potential heat in climatic conditions in Russia]. Izvestiya RAN: Energy. 2015. No. 3. Pp. 30-38.
- [4]. Tarasova V.A., Kharlampidi D. Kh., Sherstyuk A.V. Modelirovaniye teplovykh rezhimov sovmestnoy raboty gruntovogo teploobmennika i teplonasosnoy ustanovki [Modeling of heat cooperative modes of soil heat exchangers and heat pumps]. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2011. No. 8(53). Pp. 34-40.
- [5]. Vasil'ev G.P. Teplokhadosnabzhenie zdaniy i sooruzheniy s ispol'zovaniem nizkopotencial'noj energii poverhnostnykh sloev Zemli [Heat supply of buildings with using low-potential energy of the surface layers of the Earth]. Moscow: Granica. 2003. 176 p. (rus)
- [6]. Makarychev S. V. Teplofizicheskiye svoystva chernozemov (na primere dendrariya NIISS im. M.A. Lisavenko) [Thermophysical properties of chernozems (case study of arboretum soils at Lisavenko research institute of gardening in Siberia)]. Altai State Agricultural University Journal. 2018. No. 2(160). Pp. 37-42.
- [7]. Arkhangelskaya T.A., Velichenko M.V., Tikhonravova P.I. Teplovyye svoystva tipichnykh chernozemov Kurskoy oblasti

- [9]. Lamarche L. Horizontal ground heat exchangers modelling // Applied Thermal Engineering. 2019. №155. Pp 534–545.
- [10]. Congedo P.M., Colangelo G., Starace G. CFD simulations of horizontal ground heat exchangers: A comparison among different configurations // Applied Thermal Engineering. 2012. № 33-34. Pp. 24-32.
- [11]. Adamovsky D., Neuberger P., Adamovsky R. Changes in energy and temperature in the ground mass with horizontal heat exchangers - The energy source for heat pumps // Energy and Buildings. 2015. № 92. Pp. 107-115.
- [12]. Go G., Lee S., Yoon S., Kim M. Optimum design of horizontal ground-coupled heat pump systems using spiral-coil-loop heat exchangers // Applied Energy. 2016. № 162. Pp. 330–345.
- [13]. Go G., Lee S., Nikhil N.V., Yoon S. A new performance evaluation algorithm for horizontal GCHPs (ground coupled heat pump systems) that considers rainfall infiltration // Energy. 2015. № 83. Pp. 766-777.
- [14]. Dasare R.R., Saha S.K. Numerical study of horizontal ground heat exchanger for high energy demand applications // Applied Thermal Engineering. 2015. № 85. Pp. 252-263.
- [15]. Филатов С. О., Володин В. И. Метод расчета и анализ совместной работы контура циркуляции грунтовых теплообменников и теплового насоса // Труды БГТУ. № Химия и технология неорганических веществ. 2013. № 3. С. 161-166.
- [16]. Nam Y., Ooka R., Hwang S. Development of a numerical model to predict heat exchange rates for a ground-source heat pump system // Energy Build. 2008. № 40. Pp. 2133–2140.
- [17]. Bortoloni M., Bottarelli M., Su Y. A study on the effect of ground surface boundary conditions in modelling shallow ground heat exchangers // Applied Thermal Engineering. 2017. № 111. Pp. 1371–1377.
- [18]. Fujii H., Yamasaki S., Maehara T. Numerical modeling of slinky-coil horizontal ground heat exchangers considering snow coverage effects // Proceedings Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford. 2013.
- [Thermal Properties of Typical Chernozems in Kursk Oblast]. Eurasian Soil Science. 2016. No. 10. Pp. 1178-1185.
- [8]. Filatov S.O., Volodin V.I. Rabota teploobmennikov utilizacii teploty grunta [Operation of ground heat exchanger], Proceedings of BSTU: Chemistry and Technology of Inorganic Substances. 2011. No. 3. Pp. 179-184.
- [9]. Lamarche L. Horizontal ground heat exchangers modelling. Applied Thermal Engineering. 2019. No. 155. Pp. 534–545.
- [10]. Congedo P.M., Colangelo G., Starace G. CFD simulations of horizontal ground heat exchangers: A comparison among different configurations. Applied Thermal Engineering. 2012. No 33-34. Pp. 24-32.
- [11]. Adamovsky D., Neuberger P., Adamovsky R. Changes in energy and temperature in the ground mass with horizontal heat exchangers - The energy source for heat pumps. Energy and Buildings. 2015. No 92. Pp. 107-115.
- [12]. Go G., Lee S., Yoon S., Kim M. Optimum design of horizontal ground-coupled heat pump systems using spiral-coil-loop heat exchangers. Applied Energy. 2016. No. 162. Pp. 330–345.
- [13]. Go G., Lee S., Nikhil N.V., Yoon S. A new performance evaluation algorithm for horizontal GCHPs (ground coupled heat pump systems) that considers rainfall infiltration. Energy. 2015. No 83. Pp. 766-777.
- [14]. Dasare R.R., Saha S.K. Numerical study of horizontal ground heat exchanger for high energy demand applications. Applied Thermal Engineering. 2015. No. 85. Pp. 252-263.
- [15]. Filatov S.O., Volodin V.I. Metod rascheta i analiz sovmestnoj raboty kontura cirkulyacii gruntovyh teploobmennikov i teplovogo nasosa [Method of calculation and analysis of joint operation of the circulation circuit of ground heat exchangers and heat pump]. Proceedings of BSTU: Chemistry and Technology of Inorganic Substances. 2013. No. 3. Pp. 161-166.
- [16]. Nam Y., Ooka R., Hwang S. Development of a numerical model to predict heat exchange rates for a ground-source heat pump system. Energy Build. 2008. No 40. Pp. 2133–2140.
- [17]. Bortoloni M., Bottarelli M., Su Y. A study on the effect of ground surface boundary conditions in modelling shallow ground heat exchangers. Applied Thermal Engineering. 2017. No. 111. Pp. 1371–1377
- [18]. Fujii H., Yamasaki S., Maehara T. Numerical modeling of slinky-coil horizontal ground heat exchangers considering snow coverage effects. Proceedings Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. 2013.

Контактная информация

1.* +7(981)7516709, dmitrychernyshev@outlook.com
(Чернышев Дмитрий, аспирант)

Contact information

1.* +7(981)7516709, dmitrychernyshev@outlook.com
(Chernyshev Dmitry, graduate student)

© Чернышев Д.А. 2019