

УДК 51-74+697.7

DOI: 10.22213/2410-9304-2023-3-132-143

## Модель температурного поля как фактор совершенствования системы оптимального управления теплонасосной установкой с горизонтальным грунтовым коллектором

А. В. Щенятский, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

К. С. Шаталов, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Россия

О. М. Шаталова, доктор экономических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Статья посвящена вопросам организации систем управления теплонасосными установками (ТНУ). ТНУ предназначены для использования низкопотенциальной тепловой энергии окружающей среды в тепло- и холодоснабжении. Важное значение для повышения энергоэффективности приобретают ТНУ с горизонтальными грунтовыми теплообменниками (ГГТО). Конструктивные параметры и режимы эксплуатации ТНУ с ГГТО в высокой мере определяются состоянием температурного поля (ТП) грунта. Моделирование ТП для грунтовых коллекторов ТНУ представляет предмет большого числа научных публикаций. Представленный в зарубежных публикациях научный задел по вопросам моделирования ТП среды размещения ГГТО ориентирован на использование ТНУ в режиме холодоснабжения и/или в режиме теплоснабжения в условиях незначительного снижения температуры, исключая промерзание грунта. Для климатических условий, характеризующихся длительным периодом отрицательных температур воздуха и промерзания грунта, состояние ТП грунта имеет критически важное значение для эффективности и надежности ТНУ, определяющее как принципиальное решение о целесообразности ТНУ, так и оптимальные конструктивные параметры ГГТО и режимы эксплуатации ТНУ. Цель исследования состояла в приложении сложившихся методов аналитической теории теплопроводности для разработки модели ТП грунта – среды размещения ГГТО ТНУ, применимой для инженерных расчетов основных конструктивных параметров ГГТО, а также для определения годового удельного теплового потока как важного параметра в системе оптимального управления ТНУ. В основу разработки модели положено условие о двухэлементной структуре массива грунта: под коллектором и над коллектором; содержание функции удельного теплового потока раскрыто через параметр «относительная избыточная температура», который представлен для случаев полуграниченного тела (массив грунта под коллектором) и пластины (массив грунта над коллектором). Предложенная модель была реализована на примере двух регионов РФ; полученные результаты позволили определить минимальную гарантированную возможность применения ТНУ для теплоснабжения в заданных климатических условиях. Представленная в статье модель может быть использована в качестве контекста при дальнейших исследованиях ключевых параметров производительности ГГТО ТНУ и оптимизации режимов эксплуатации ТНУ.

**Ключевые слова:** моделирование, оптимальное управление, теплонасосные системы, температурное поле, горизонтальные грунтовые теплообменники.

### Введение

ТНУ как автономные системы теплоснабжения, основанные на использовании низкопотенциальной тепловой энергии грунта, признаются в настоящее время наиболее энергоэффективными и экологически чистыми [1].

К настоящему времени сложились действенные технологии использования низкопотенциальной тепловой энергии окружающей среды для теплоснабжения промышленных и жилых объектов. Основой ТНУ является *тепловой насос* (ТН) – устройство для переноса тепловой энергии от источника низкопотенциальной тепловой энергии к теплоносителю с более высокой температурой. В случае тепловых насосов, основанных на реализации цикла Карно, такой перенос осуществляется за счет фазового перехода специальной рабочей жидкости на стадиях

испарения и конденсации; принципиальная структурная схема такого ТН и основные элементы ТНС приведены на рис. 1.

Для всех типов тепловых насосов основным фактором их энергоэффективности является перепад температур между источником низкопотенциальной теплоты и ее потребителем. Этот параметр определяет коэффициент преобразования *COP*. Перепад температур зависит от теплового потока в среде размещения коллектора ТНУ, и нужное значение может быть достигнуто за счет конструктивных параметров грунтового теплообменника. Но при функционировании ТНУ нужно знать количество теплоты, которое может снять теплообменник до окончания отопительного периода при определенных климатических и геологических условиях; от этого зависят условия эксплуатации ТНУ, в том числе рас-

ход теплоносителя в ГГТО и допустимый теплосъем. Таким образом, задача определения температуры и количества теплоты грунтового массива

ва имеет важное практическое значение для обеспечения оптимального управления теплонасосной системой.

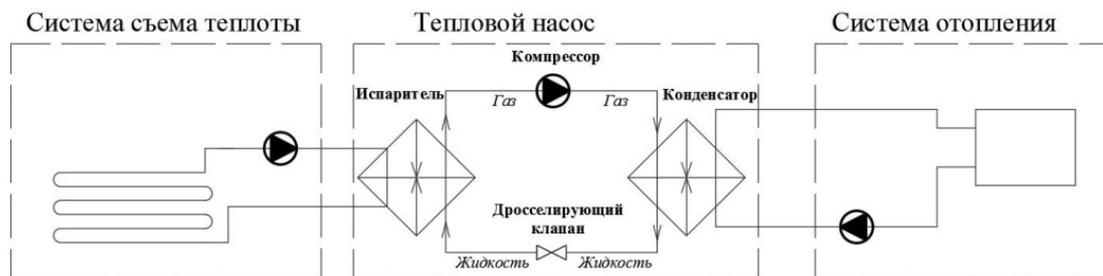


Рис. 1. Принципиальная схема ТНС с ТН по циклу Карно

Fig. 1. Schematic diagram of HPS with HP according to the Carnot cycle

Для всех типов тепловых насосов основным фактором их энергоэффективности является перепад температур между источником низкопотенциальной теплоты и ее потребителем. Этот параметр определяет коэффициент преобразования  $COP$ . Перепад температур зависит от теплового потока в среде размещения коллектора ТНУ, и нужное значение может быть достигнуто за счет конструктивных параметров грунтового теплообменника. Но при функционировании ТНУ нужно знать количество теплоты, которое может снять теплообменник до окончания отопительного периода при определенных климатических и геологических условиях; от этого зависят условия эксплуатации ТНУ, в том числе расход теплоносителя в ГГТО и допустимый теплосъем. Таким образом, задача определения температуры и количества теплоты грунтового массива имеет важное практическое значение для обеспечения оптимального управления теплонасосной системой.

Съем низкопотенциальной теплоты осуществляется в ТНС посредством *теплообменного коллектора*, в котором происходит нагрев циркулирующей в нем рабочей жидкости за счет разницы температур (либо охлаждение рабочей жидкости при функционировании ТНС в режиме холодоснабжения). Для такого теплообмена может использоваться атмосферный воздух, вода, грунт, а также источники вторичной теплоты (например, от органических отходов производства).

В случае использования низкопотенциальной тепловой энергии грунта применяются два основных типа теплообменников – вертикальный грунтовой теплообменник (ВГТ) и горизонтальный грунтовой теплообменник (ГГТО). Из всех видов ТНС наибольший интерес к исследованию представляют системы с ГГТО, так как они обеспечивают наибольший коэффициент преобразования теплоты и позволяют лучше

(по сравнению с ВГТ) использовать солнечную радиацию, аккумулируемую в поверхностном слое грунта.

*Объектом* проводимого исследования является система оптимального управления теплонасосной установкой с ГГТО. *Предмет исследования* – температурное поле массива грунта – среды размещения ГГТО, определяющее величину теплового потока как важного параметра в системе управления ТНУ; моделирование теплопередачи в грунте проводилось с учетом нагрузки от ГГТО и было направлено на прогнозную оценку теплоаккумулирующей способности грунта и производительности ГГТО в годовом цикле эксплуатации.

Оценка практической применимости ТНС с ГГТО в конкретных природно-климатических условиях, а также определение конструктивных параметров ТНС и параметров оптимального управления ТНС должны проводиться на основе знаний об условиях производительности коллектора в долговременном аспекте. Для ГГТО производительность определяется процессами аккумуляции теплоты и температуропроводности грунта в контексте сезонной работы. В работе [2] отмечается, что для изучения таких процессов возможны полевые испытания на тепловую реакцию грунта, но это не всегда оправданно вследствие их высокой стоимости, а также из-за высокой изменчивости факторов, определяющих процессы аккумуляции теплоты в грунте.

Для изучения производительности ГГТО на этапе проектирования и эксплуатации ТНС актуальны модельные эксперименты, способные воспроизводить термодинамическое поведение грунтового коллектора. Модель температурного поля в среде размещения ГГТО может быть интегрирована в систему управления ТНУ для выполнения задач оптимизации режима ее функ-

ционирования с позиций поддержания необходимого энергетического баланса массива грунта и повышения эффективности ТНС.

Исследованию температурного поля грунта – среды размещения ГГТО ТНС – посвящен широкий круг работ зарубежных и российских ученых. Наибольшее внимание отводится вопросам моделирования вертикальных грунтовых теплообменников. Исследования ГГТО являются, по заключению F.-J. Tang, достаточно редкими, несмотря на то что такие системы зачастую более эффективны ввиду их экономичности и привлекательности для тепло- и холодоснабжения небольших объектов.

Исследование и моделирование температурного поля ГГТО признается более сложным из-за высокого состава влияющих факторов, в том числе чувствительности к метеорологическим

условиям. При этом используются аналитические и численные методы моделирования; отдельные результаты аналитического и численного моделирования температурного поля ГГТО ТНС, полученные зарубежными исследователями, приведены в табл. 1.

Отечественные научные результаты моделирования температурного поля грунта в контексте использования низкопотенциальной теплоты в ТНС представлены, в частности, в работах Г. П. Васильева, Н. Ю. Сапрыкиной, В. М. Кротова, Д. В. Тимофеева и др. В. М. Кротовым предложена математическая модель теплового потока ВГТ, которая учитывает взаимное влияние теплообменников и режим использования ВГТ [23]; элементы ВГТ при этом рассматриваются как теплопроводящий стержень.

**Таблица 1. Обзор результатов разработки моделей температурного поля ГГТО ТНС (по зарубежным публикациям)**

**Table 1. Review of the results of the development of models of the temperature field of the HGHE of HPS (according to foreign publications)**

Тип модели	Авторы	Содержание	Исследуемые факторы температурного поля грунта
Аналитическое моделирование	Lamarche L. [3]	Модель температурного поля основана на коэффициентах теплового отклика; для ГГТО линейного типа; представляет влияние граничных условий «воздух – грунт» и тепловое взаимодействие между участками теплообменного коллектора	Граничные условия «воздух – грунт», геометрия ГГТО
	Li H. et al. [4]	Модель кольцевого источника; представляет температурную реакцию спирального ГГТО на потоки грунтовых вод	Потоки грунтовых вод
	Kupiec, K. et al. [5]	Модель основана на одномерном нестационарном уравнении теплопроводности с внутренним источником тепла; грунтовый массив рассмотрен как полубесконечное тело; модель представляет связь между температурой окружающей среды и температурой грунтового массива, а также скорость теплопередачи от грунта к рабочему телу (при изменчивости температуры рабочей жидкости в ГГТО)	Температура рабочей жидкости
	Xiong, Z. et al. [6]	Модель основана на аналитических решениях кольцевого источника; использован метод теплового отклика для ВГТ, но с учетом специфики ГГТО; представляет функцию температурного отклика для ГГТО гибкого типа, применима для исследования геометрии ГГТО	Геометрия ГГТО
	Wang D. et al. [7]	Аналитическое решение для ГГТО спирального типа на основе функции Грина; учитываются колебания температуры поверхности земли, что позволяет повысить точность при малой глубине установки ГГТО	Граничные условия «воздух – грунт»,
	Jeon et al. [8]	Аналитическое моделирование теплопередачи ГГТО спирального типа на основе функции Грина; позволяет учитывать геометрию спиральной трубы	Геометрия ГГТО

Окончание табл. 1

Тип модели	Авторы	Содержание	Исследуемые факторы температурного поля грунта
Численное моделирование	Tang F.-J. et al. [9, 10 и др.]	Модель температурного поля на основе взаимодействия «атмосфера – грунт – ГГТО» с учетом условий радиационно-конвективного теплообмена на поверхности грунта и водно-энергетического баланса почвенного слоя грунта	Граничные условия «воздух – грунт», водно-энергетического баланса грунта
	Gan G. [11]	Модель прогнозирования производительности ГГТО с учетом фильтрационных потоков грунтовых вод	Фильтрационные потоки грунтовых вод
	Fujii et al. [12]	Модель теплового баланса в грунтовом массиве для ГГТО гибкого типа; спиральный теплообменник упрощен до формы пластинчатого	Геометрия ГГТО
	Al-Ameen et al. [13]	Использована переходная трехмерная модель конечного объема в ANSYS Fluent; исследованы материалы обратной засыпки с целью повышения производительности ГГТО	Теплопроводность грунта
	Dasare R.R., Saha S.K. [14]	Модель теплообмена ГГТО различных конфигураций; модель основана на исходной аналитической зависимости температуры как функции времени, глубины, коэффициента температуропроводности грунта, температуры поверхности грунта (для климатических условий Индии)	Геометрия ГГТО, теплопроводность грунта, скорость теплоносителя, глубина ГГТО
	Congedo et al. [15]	Модель эффективности теплопередачи при годовом цикле работы ГГТО; включает параметры: теплопроводность грунта, скорость теплоносителя, глубина заложения коллектора, геометрия теплообменника (линейные, гибкие и спирально-змеевиковые) (в климатических условиях Италии)	Теплопроводность грунта, скорость теплоносителя, глубина заложения и геометрия ГГТО
	Widiatmojo A. et al. [16]	Модель эффективности ТНС с ГГТО (в сопоставлении с ТНС с воздушным теплообменником) при использовании ТНС в режиме холодоснабжения и с учетом перепада температур воздуха в суточном и годовом цикле эксплуатации (в климатических условиях Таиланда)	Граничные условия «воздух – грунт» в суточном и годовом цикле эксплуатации ТНС
	Lebbihiat N. et al. [17]	Модель теплового потока в поверхностном слое грунта в дневном цикле эксплуатации ТНС в режиме холодоснабжения (в климатических условиях Сахары)	Граничные условия «воздух – грунт» в суточном цикле эксплуатации ТНС
	Zeng C. et al. [18]	Моделирование скорости теплообмена в грунте при его использовании для холодоснабжения подземных дизель-генераторов и для инфракрасного камуфляжа. Параметры модели: длина теплообменника, температура почвы, тепловой поток, температура наружного воздуха.	Граничные условия «грунт – воздух» для потребностей в инфракрасной маскировке
	Yang W. et al. [19]	Модель теплопередачи, учитывающая влияние факторов: геометрия ГГТО (шаг спирали, диаметр трубок), ветровая нагрузка поверхности почвенного слоя, тип грунта, режим работы ТН. Моделирование проведено в экспериментальной установке и основано на положениях теории подобия.	Граничные условия «воздух – грунт», геометрия ГГТО
	Bulmez, A.-M et al. [20]	Численная модель для оценки влияния вспомогательных источников тепла на производительность ГГТО	Граничные условия «воздух – грунт», геометрия ГГТО, вспомогательные источники теплоты
	Li C. et al. [21]	Модель для исследования рабочих характеристик спиральной ГГТО, учитывающая геотермический градиент и изменяющуюся температуру окружающего воздуха, динамически изменяющиеся нагрузки ТНС	Граничные условия «воздух – грунт», параметры нагрузки ТНС
Liu Q. et al. [22]	Трехмерная численная модель, воспроизводящая теплогидравлические характеристики ГГТО; входные параметры: диаметр и шаг спирали ГГТО, скорость движения рабочей жидкости в ГГТО; целевая функция: скорость теплообмена; модель оптимизации параметров ГГТО на основе генетического алгоритма	Геометрия ГГТО, скорость движения рабочей жидкости в ГГТО	

В работах Н. Ю. Сапрыкиной [24, 25] представлена численная модель нестационарного теплообмена ВГТ и грунта с учетом сезонных колебаний нагрузок систем тепло- и холодоснабжения и фонового теплового потока, а также критериальные уравнения с модифицированными параметрами, которые позволяют учитывать сезонность работы систем тепло-, холодоснабжения и особенность низкопотенциального источника энергии как аккумулятора теплоты.

Д. В. Тимофеевым предложена математическая модель теплопередачи в грунт по радиусу от центра скважины для ВГТ [26]. Г. П. Васильевым разработана пространственная теплогидравлическая модель нестационарного теплового режима грунтового массива при отборе низкопотенциальной теплоты, представляющая функцию влияния стоков теплоты на естественный тепловой режим грунта с учетом фактора фазовых переходов влаги; реализация модели позволила выявить ряд закономерностей: о характере изменения во времени удельного теплосъема, о характере перехода системы теплосбора в квазистационарный режим, о зависимости эффективности ТНС от геометрических характеристик ВГТ [27].

Нужно отметить, что основная часть исследований российских ученых направлена на изучение *вертикальных* грунтовых теплообменников. Это объяснимо тем, что при такой конструкции вследствие большой глубины заложения теплообменных коллекторов исключается колебание температуры грунта из-за атмосферного воздействия, что важно для регионов с холодным климатом. Вместе с тем важное практическое значение приобретают ТНС с *горизонтальными* теплообменниками: такие ТНС позволяют более эффективно использовать солнечную радиацию в годовом цикле тепло- и холодоснабжения, в том числе более эффективно восстанавливать температурный потенциал грунта в теплый период года; также ТНС с ГГТО признаются более экономичными с позиций единовременных капитальных вложений для теплоснабжения небольших объектов. Однако эксплуатация ТНС с ГГТО в условиях континентального климата происходит при большой продолжительности периода низких температур и значительном промерзании грунта, что влечет риск нарушения надежности ГГТО.

Для проектирования и эксплуатации ТНС с ГГТО применимы научные решения, сложившиеся в отношении ВГТ. Вместе с тем особенности теплофизических процессов в верхних слоях

грунта и конструктивные особенности ГГТО определяют актуальность моделирования температурного поля среды размещения горизонтального грунтового коллектора ТНС. Проведенный научный обзор показал актуальность исследования температурного поля грунта в климатических условиях с длительным периодом отрицательных температур.

*Цель исследования* состояла в приложении сложившихся методов аналитической теории теплопроводности для разработки модели температурного поля грунта – среды размещения ГГТО ТНУ, применимой для инженерных расчетов основных конструктивных параметров ГГТО, а также для определения годового удельного теплового потока как важного параметра в системе оптимального управления ТНУ. Разрабатываемая модель была призвана отобразить теплопередачу в грунтовой массе между его поверхностным слоем, слоем размещения ГГТО и нижележащим слоем на основании основных факторов, определяющих тепловой поток в грунте с учетом нагрузки от ГГТО. Моделирование этого процесса позволит выявить приемлемую глубину заложения ГГТО, необходимые конструктивные условия ГГТО, допустимые режимы эксплуатации ТНС для повышения производительности и надежности ТНС (в условиях риска промерзания грунта), выявить необходимый сброс теплоты в грунт в летний период для восстановления температурного баланса грунта в годовом цикле эксплуатации ТНС.

#### **Используемые подходы и методы исследования**

При составлении модели были использованы аналитические методы теории теплопроводности. Чтобы решить поставленную задачу аналитическими методами и составить обобщенное представление исследуемого процесса, был принят ряд *допущений*:

1) однородность грунтового массива по составу и влажности грунтового массива;

2) тепловое воздействие труб ГГТО на температурное поле грунтового массива аппроксимируется введением в модель *плоскостного* источника теплоты (в обоснование этого условия было принято сформулированное в [27] допущение для линейной аппроксимации в цилиндре: «диаметр труб <ГГТО> значительно меньше глубины их заложения, вследствие чего градиентом температуры в стенках труб можно пренебречь»; в рассматриваемом случае это условие предполагает расположение трубок ГГТО с шагом значительно меньшим в сравнении с глубиной заложения коллектора);

3) не учитывается влияние фазового перехода при изменении агрегатного состояния жидкости, заключенной в порах грунта и влияние фильтрационных потоков грунтовых вод;

4) в качестве основных температурных параметров принимаются: температура грунта на удалении в  $\infty$  (или начальная температура грунта)  $T_0$ , температура воздуха  $T_b$ , температура коллектора  $T_c$ ; значения этих параметров приняты в усредненных (за отопительный период) постоянных значениях; это допущение принимается в обеспечение краевых условий аналитического расчета; значения  $T_0$  и  $T_b$  принимаются на основании климатических данных;

5) массив грунта структурирован на две части: (1) – над коллектором, (2) – под коллектором; то есть массив грунта представлен в модели как пластина и полуограниченное тело;

6) из каждого слоя происходит отбор теплоты на стыке, поэтому условно принимается, что температура на нижней границе слоя (1) и на верхней границе слоя (2) равна температуре коллектора.

На данном этапе исследования для составления обобщенной модели было принято краевое условие первого рода:  $T_c(\tau) = f(\tau) = \text{const}$ , т. е. условно принимается, что температура постоянна (по среднему за исследуемый период значению); принятое упрощение позволило составить модель для отображения возможного температурного потенциала массива грунта.

В соответствии с принятым условием (п. 5) о структурном представлении грунтового массива предложенная модель температурного поля грунта – среды размещения ГГТО включает две части:

– первая часть описывает температурное поле в массиве грунта над коллектором, эта часть представлена как *пластина*;

– вторая часть описывает температурное поле в массиве грунта под коллектором, эта часть представлена как *полуограниченное тело*.

Целевая функция модели – температура грунтового массива как функция от координаты ( $x$ ) и времени ( $\tau$ ):  $T = f(x, \tau)$ . В модели эта функция определяется через относительную избыточную температуру  $\theta$ :  $T(x, \tau) = \theta(T_0 - T_c) + T_c$ ;  $\theta$  представлена как функция от  $x$ ,  $\tau$  и коэффициента температуропроводности грунта  $a$ .

Функция  $\theta$  задается в соответствии с принятым положением о структуре модели [28, 29]:

1) в массиве грунта над коллектором (случай «пластина»):  $x = (0..h)$ ;

краевые условия:

$$T(x, 0) = f(x), \quad (1)$$

$$T(+R, \tau) = T_c = \text{const}, \quad (2)$$

$$T(-R, \tau) = T_c = \text{const}, \quad (3)$$

функция относительной избыточной температуры  $\theta_1$  в этом случае может быть определена по формуле

$$\theta_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n} (-1)^{n+1} \cos(\mu_n \frac{x}{R}) \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo), \quad (4)$$

где  $R$  – половина толщины «пластины»,  $R = 1/2h$ , где  $h$  – глубина заложения коллектора;  $x$  – координата точки,  $x = 0, 2R$ ;  $n$  – оператор сходящегося ряда;  $T(x, \tau)$  – искомая температура как функция от координаты и времени;  $\mu_n$  – оператор, зависящий от  $n$ :

$$\mu_n = (2n - 1) \frac{\pi}{2}; \quad Fo - \text{число Фурье: } Fo = \frac{a\tau}{R^2}.$$

Поскольку кривая распределения температур в этом случае несимметрична:  $T_b \neq T_c$ , то функция  $T(x, \tau)$  задается с учетом поправки на разность температур  $T'$ :  $T_1(x, \tau) = \theta_1(T_0 - T_c) + T_c + T'$ ; поправка  $T'$  установлена через линейную интерполяцию  $T_b$  и  $T_c$ :  $T' = (T_b - T_c) \frac{h-x}{h}$ ;

2) в массиве грунта под коллектором («полуограниченное тело»):  $x = (h.. \infty)$ ;

краевые условия:

$$T(x, 0) = f(x), \quad (5)$$

$$T(0, \tau) = T_c = \text{const}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial T(+\infty, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (7)$$

функция  $\theta_2$  в этом случае может быть определена по формуле

$$\theta_2 = \text{erf}\left(\frac{1}{2\sqrt{Fo}}\right). \quad (8)$$

Функция  $T(x, \tau)$  определяется по формуле  $T_2(x, \tau) = \theta_2(T_0 - T_c) + T_c$ .

Таким образом, температура грунтового массива – среды размещения ГГТО можно представить следующим образом:

$$T(x, \tau) = \begin{cases} T_1(x, \tau), & x = (0 \dots h). \\ T_2(x, \tau), & x = (h \dots \infty). \end{cases} \quad (9)$$

Из (9) может быть определен среднегодовой (за отопительный период) удельный тепловой поток с 1 м<sup>2</sup> площади коллектора  $q$  (Вт/м<sup>2</sup>):

$$q = \frac{\sum_{x=1}^{\infty} [(T_g - T(x, \tau)) \cdot c \cdot \rho \cdot \Delta x]}{\tau}, \quad (10)$$

где  $c$  – теплоемкость грунта;  $\rho$  – плотность грунта;  $\Delta x$  принимается с шагом 0,1 от  $h$ ; суммирование проводится в пределах глубины, на которой достигается  $T_0$ .

### Результаты и обсуждения

Предложенная модель (1)–(10) была апробирована на примере двух различных регионов РФ – г. Пермь, г. Ставрополь. Исходные данные о климатических условиях в этих регионах приняты на основании справочников (Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. Вып. 26. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 581 с.; Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. Вып. 13. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 581 с.; СП 131.13330.2020. Свод правил. Строительная климатология. ОКС 93.040. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659358>) (табл. 2).

**Таблица 2. Основные климатические параметры, принятые в расчет среднегодового (за отопительный период) удельного теплового потока**

**Table 2. Climatic parameters that are taken to calculate the average annual (for the heating period) specific heat flow**

Показатель	г. Пермь	г. Ставрополь
Продолжительность отопительного периода, дн.	225	168
Начальная температура грунта, °С	5,01	9,05
Средняя (в течение отопительного периода) температура поверхности грунта, °С	-5,4	0,6

При расчете использованы равные для обоих случаев значения следующих параметров модели: глубина заложения коллектора  $h = 2$  м; коэффициент температуропроводности  $a = 1,1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с; теплоемкость грунта  $c = 0,835$  кДж/кг; плотность грунта  $\rho = 1700$  кг/м<sup>3</sup>. Расчет проводился для заданной температуры коллектора  $T_c = -6,5$  °С; такое значение принято на основании данных завода-изготовителя теплонасосного оборудования, как среднее между

минимально допустимыми значениями температуры рабочей жидкости (фреон R407C/R22) на входе и выходе в контуре грунтового теплообменника; при таких параметрах эксплуатации теплового насоса обеспечивается съём теплоты в размере 3 °С и достигается наибольшая производительность теплообменника (Тепловые насосы: каталог 2016/ AltalSoltherm. URL: [https://www.altalheat.com/download/brine\\_specifications.pdf](https://www.altalheat.com/download/brine_specifications.pdf)). Полученные по этим данным значения  $T(x, \tau)$  представлены на рис. 2 в форме эпюр температур для двух случаев: 1) начало отопительного периода ( $\tau = 10$  дн.); 2) завершение отопительного периода ( $\tau = 225$  дн. – для г. Пермь;  $\tau = 168$  дн. – для г. Ставрополь).

Полученные в модели (1)–(10) характеристики температурного поля грунтового массива – среды размещения ГГТО позволяют сделать следующие выводы:

- сравнительная оценка температурного потенциала грунтового массива для двух рассматриваемых регионов показывает его более высокий уровень для г. Ставрополя; при этом небольшая глубина промерзания грунта в этом регионе позволяет снизить глубину заложения ГГТО без нарушения надежности;

- теплоаккумулирующая возможность верхнего слоя грунта (над ГГТО) иссякает в течение двух недель зимней эксплуатации ТНС; в дальнейшем он может выполнять только теплоизолирующую функцию;

- основной сбор теплоты в течение отопительного периода происходит из нижележащего (относительно ГГТО) слоя грунтового массива;

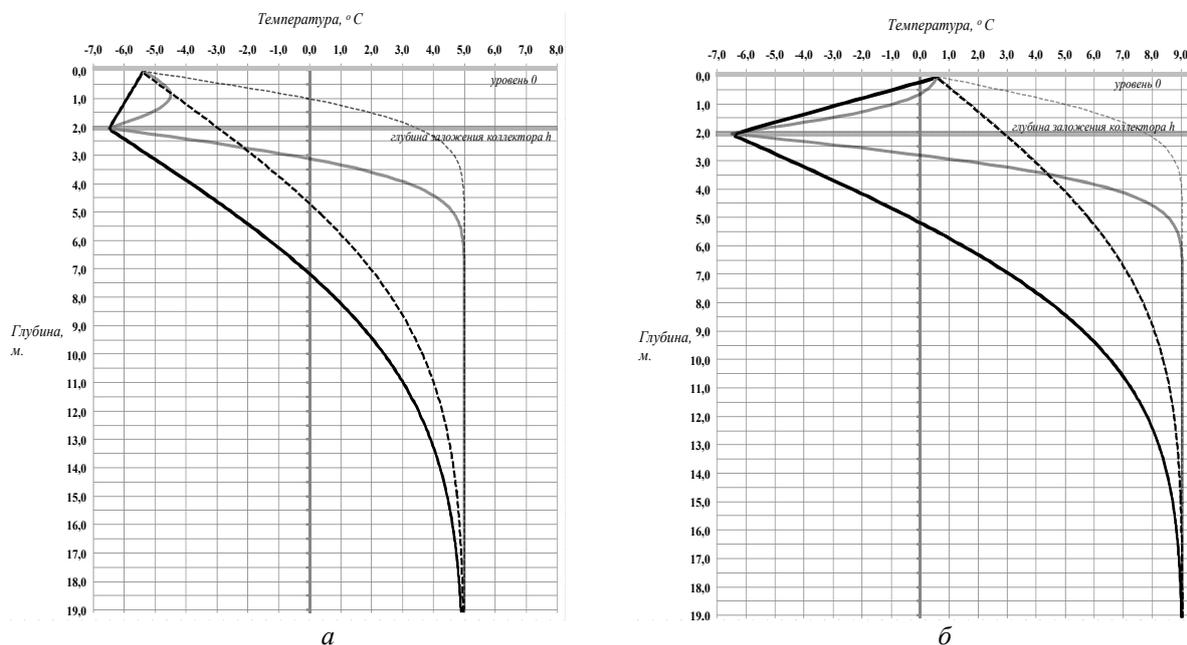
- при отрицательной температуре теплоносителя в ГГТО теплотери на границе «воздух – грунт» снижены до 0 (либо отрицательны); соответственно, количество полезной теплоты в грунтовом массиве можно рассчитать через разницу температур  $T_0$  и  $T(x, \tau)$ :  $\int_x (T_0 - T(x, \tau)) dx$ , где

$T(x, \tau)$  определяется по (5)–(9);  $\tau = \text{const}$  и определяется продолжительностью отопительного периода.

Основной результат численной реализации аналитической модели (1)–(10) состоял в определении годового удельного количества снимаемой теплоты, которое составило:  $8,63 \cdot 10^{-7}$  Дж/м<sup>2</sup> (для г. Пермь) и  $10,8 \cdot 10^{-7}$  Дж/м<sup>2</sup> (для г. Ставрополь). Полученный результат можно сопоставить с нормативной годовой потребностью теплоты для отопления здания и рассчитать необходимую площадь теплообменника для покрытия этой потребности. В качестве примера был проведен расчет для здания площадью

100 м<sup>2</sup> с учетом нормативных параметров теплотребления, принятых для зданий «А» класса энергосбережения (СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003.URL:

<http://sniprf.ru/sp50-13330-2012>; Приказ Минстроя России от 06.06.2016 № 399/пр «Об утверждении Правил определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов») (табл. 3).



- — функция температуры грунта с учетом работы ГТТОТ ( $x, \tau$ ) на конец отопительного периода;  $\tau=225$  дн. — для г. Пермь,  $\tau=168$  дн. — для г. Ставрополь;  
 ..... — функция температуры грунта без нагрузки  $T_{бн}(x, \tau)$  на конец отопительного периода;  $\tau=225$  дн. — для г. Пермь,  $\tau=168$  дн. — для г. Ставрополь;  
 — — функция температуры грунта с учетом работы ГТТО на начало отопительного периода  $T(x, \tau)$ ,  $\tau=10$  дн.;  
 — — функция температуры грунта без нагрузки на начало отопительного периода  $T_1(x, \tau)$ ,  $\tau=10$  дн.

Рис. 2. Эпюры температур  $T(x, \tau)$  грунтового массива – среды размещения ГТТО, полученные на основании модели (1)–(10): а – г. Пермь; б – г. Ставрополь

Fig. 2. Diagrams of temperatures of the soil mass - the environment for the location of the HGHE, obtained on the basis of an model (1)–(10): a – Perm; б – Stavropol

Таблица 3. Расчет необходимой площади ГТТО ТНС для покрытия нормативной готовой потребности теплоснабжения (для целей отопления)

Table 3. Calculation of the required area of the HGHE HPS to cover the standard ready demand for heat supply (for heating purposes)

Показатель	г. Ставрополь	г. Пермь	Источник исходных данных
Годовое удельное количество теплоты, снимаемой ГТТО, Дж/м <sup>2</sup>	$10,4 \cdot 10^7$	$8,7 \cdot 10^7$	Расчетная модель (1)-(10)
Базовый уровень уд. год. расхода эн. ресурсов <...> на отопление, вентиляцию, кВт·ч/(м <sup>2</sup> ·год)	100	200	Приказ Минстроя РФ от 06.06.2016 №399/пр (п. 22, табл. 1)
Базовый уровень уд. год. расхода эн. ресурсов <...> на отопление, вентиляцию, Дж/(м <sup>2</sup> ·год)	$8,7 \cdot 10^7$	$7,2 \cdot 10^8$	x
Требуемое количество теплоты для отопления дома («А» класс энергосбережения, площадь 100 м <sup>2</sup> )	$8,7 \cdot 10^{10}$	$7,2 \cdot 10^{10}$	x
<b>Необходимая площадь ГТТО, м<sup>2</sup></b>	<b>346</b>	<b>827</b>	<b>x</b>

Данные табл. 3 показывают максимальное значение площади ГГТО, необходимое при полном покрытии потребности теплоты для отопления. Реальные значения площади ГГТО могут быть снижены вследствие реализации бивалентной схемы теплоснабжения, предусматривающей ТН в качестве дополнительного элемента к «традиционному» теплогенератору. Необходимость бивалентной схемы определена нормами технического регулирования (Правила технической эксплуатации тепловых энергоустановок (утв. Приказом Минэнерго России от 24.03.03 № 115)). ТН в составе бивалентной схемы теплоснабжения призваны сократить энергопотребление на теплоснабжение, а также обеспечить холодоснабжение в теплый период года. Кроме того, в этом случае становится возможным обеспечить более эффективный режим работы ТНС вследствие оптимизации температурного режима ТН.

### Выводы

Определение оптимальных конструктивных параметров и эксплуатационных режимов теплонасосных систем возможно на основе модельных экспериментов. Модель должна представлять наиболее существенные аспекты изучаемой системы. Сложившиеся методы аналитического и численного моделирования ТНС, использующие низкопотенциальную тепловую энергию грунта, ориентированы в основном на вертикальные грунтовые теплообменные коллекторы. Предложенная аналитическая модель температурного поля грунтового массива – среды размещения ГГТО ТНС представляет *основные* параметры сбора низкопотенциальной теплоты грунта: начальная температура грунта, температура воздуха, температура теплоносителя в ГГТО (рабочей жидкости), а также характеристики грунта, определяющие теплофизические процессы в грунтовом массиве. По предложенной модели можно определить минимальную гарантированную возможность использования ТНС в заданных климатических условиях.

Результаты реализации модели показали практическую применимость ТНС в рассмотренных регионах РФ – г. Пермь, г. Ставрополь и очевидно более высокие эксплуатационные свойства ТНС в г. Ставрополь; также была обоснована значимость нижнего слоя грунтового массива и параметра  $T_o$ , что определяет высокую актуальность двухцелевого режима эксплуатации ТНС – на тепло- и холодоснабжение – с тем, чтобы производимый в режиме холодоснабжения сброс теплоты способствовал локальному увеличению  $T_o$ . По результатам реализации модели

установлено, что производительность ГГТО повышается при минимальных уровнях  $T_c$ ; это определяет актуальность использования тепловых насосов в составе бивалентной системы отопления для оптимального режима ее эксплуатации.

Представленная аналитическая модель имеет *обобщенный характер*, поскольку оперирует усредненными значениями параметров и ограничен сам состав параметров. В обеспечение практической значимости моделирования температурного поля грунта – среды размещения ГГТО необходимо продолжение исследований. В том числе видятся актуальными следующие задачи: экспериментальная апробация и уточнение модели; анализ условий перехода температурного поля грунтового массива в квазистационарный режим – на основе моделирования в многолетнем режиме эксплуатации ГГТО ТНС; исследование температуры поверхностного слоя грунта с учетом процессов радиационно-конвективного теплообмена и влияния снегового покрова; влияние конфигурации теплообменника на теплосъем; влияние теплозащиты в зимний период; и др. Решение таких задач возможно методами численного моделирования и натурных экспериментов; использование при этом в качестве контекста представленной в статье аналитической модели будет способствовать систематизации дальнейших исследований.

Модель температурного поля грунта – среды размещения ГГТО ТНС определяет состав основных параметров и функциональные отношения между ними для определения количества теплоты, которая может быть использована тепловым насосом; на этой основе может быть построена система оптимального управления теплонасосной установки. Разработка дополнительных элементов модели температурного поля позволит усовершенствовать модель и повысить точность определения основных конструктивных параметров ГГТО и прогнозирования сезонной работы ТНС.

### Библиографические ссылки

1. Atam, E., Helsen, L. Ground-coupled heat pumps: Part 2 - Literature review and research challenges in optimal design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 54, 1668–1684. DOI 10.1016/j.rser.2015.07.009.
2. Tang, F.-J. Numerical investigation on the ground heat exchanger installed in shallow depth soils : A thesis submitted in partial fulfillment for the degree of PhD in the Doctoral School of MSII; University of Strasbourg, 2019. 236 p. Available at: <https://theses.hal.science/tel->

02528548/preview/TANG\_Fujiao\_2019\_ED269.pdf (accessed 01.03.2022).

3. Lamarche L. Horizontal ground heat exchangers modelling. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 155, pp. 534–545. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2019.04.006

4. Li, H., Nagano, K., Lai, Y. Heat transfer of a horizontal spiral heat exchanger under groundwater advection. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55, pp. 6819–6831. DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.06.089.

5. Kupiec, K., Larwa, B., Gwadera, M. Heat transfer in horizontal ground heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 75, pp. 270–276. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2014.10.003.

6. Xiong, Z., Fisher, D.E., and Spitler, J.D. Development and validation of a Slinky (TM) ground heat exchanger model. *Applied Energy*, 2015, 141, pp. 57–69. DOI 10.1016/j.apenergy.2014.11.058.

7. Wang, D., Lu, L., and Cui, P. A new analytical solution for horizontal geothermal heat exchangers with vertical spiral coils. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 100, pp. 111–120. DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.04.001.

8. Jeon, J.-S., Lee, S.-R., and Kim, M.-J. A modified mathematical model for spiral coil-type horizontal ground heat exchangers. *Energy*, 2018, 152, pp. 732–743. DOI 10.1016/j.energy.2018.04.007.

9. Tang, F.-J. Numerical investigation on the ground heat exchanger installed in shallow depth soils.

10. Tang F., Nowamooz H. Sensitive analysis on the effective soil thermal conductivity of the Thermal Response Test considering various testing times, field conditions and U-pipe lengths. *Renewable Energy*, 2019, 143: 1732-1743. DOI 10.1016/j.renene.2019.05.120.

11. Gan, G. Dynamic thermal performance of horizontal ground source heat pumps – The impact of coupled heat and moisture transfer. *Energy*, 2018, 152, pp. 877–887. DOI 10.1016/j.energy.2018.04.008.

12. Fujii, H., Nishi, K., Komaniwa, Y., Chou, N. Numerical modeling of slinky-coil horizontal ground heat exchangers. *Geothermics*, 2012, 41, pp. 55–62. DOI 10.1016/j.geothermics.2011.09.002.

13. Al-Ameen, Y., Ianakiev, A., Evans, R. Recycling construction and industrial landfill waste material for backfill in horizontal ground heat exchanger systems. *Energy*, 2018, 151, pp. 556–568. DOI 10.1016/j.energy.2018.03.095.

14. Dasare R., Saha S. Numerical study of horizontal ground heat exchanger for high energy demand applications. *Applied Thermal Engineering*, 2015, vol. 85, pp. 252-263. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2015.04.014.

15. Congedo P.M., Colangelo G., Starace G. CFD simulations of horizontal ground heat exchangers: A comparison among different configurations, *Applied Thermal Engineering*, 2012, Vol. 33–34, 2012, pp. 24–32. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2011.09.005.

16. Widiatmojo A, Chokchai S, Takashima I, Uchida Y, Yasukawa K, Chotpanarat S, Charusiri P. Ground-Source Heat Pumps with Horizontal Heat Exchangers for Space Cooling in the Hot Tropical Climate of Thailand. *Energies*. 2019; 12(7):1274. <https://doi.org/10.3390/en12071274>.

17. Lebbihiat N., Atia A., Arıcı M., Meneceur N., Hadjadj A., Chetoui Y. Thermal performance analysis of helical ground-air heat exchanger under hot climate: In situ measurement and numerical simulation, *Energy*, Vol.254, Part C, 2022, 124429, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124429>.

18. Zeng C., Yuan Y., Xiang B., Cao X., Zhang Z., Sun L. Thermal and infrared camouflage performance of earth-air heat exchanger for cooling an underground diesel generator room for protective engineering, *Sustainable Cities and Society*, vol. 47, 2019, 101437, ISSN 2210-6707, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101437>.

19. Yang W., Xu R., Wang F., Chen S., Experimental and numerical investigations on the thermal performance of a horizontal spiral-coil ground heat exchanger, *Renewable Energy*, vol. 147, part 1, 2020, pp. 979-995, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.030>.

20. Bulmez, A.-M., Ciofoaia, V., N̄astase, G., et al. Numerical Investigation on Auxiliary Heat Sources for Horizontal Ground Heat Exchangers. *Buildings* 2022, 12, 1259. <https://doi.org/10.3390/buildings12081259>.

21. Li C., Mao J., Zhang H., Xing Z., Li Y., Zhou J. Numerical simulation of horizontal spiral-coil ground source heat pump system: Sensitivity analysis and operation characteristics, *Applied Thermal Engineering*, 2017, Vol. 110, pp. 424-435. DOI 10.1016/j.applthermaleng.-2016.08.134.

22. Liu, Q., Tao, Y., Shi, L., Zhou, T., Huang, Y., Peng, Y., Wang, Y., Tu, J. Parametric optimization of a spiral ground heat exchanger by response surface methodology and multi-objective genetic algorithm, *Applied Thermal Engineering*, 2023, Vol. 221, 119824. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2022.119824.

23. Кротов В. М. Совершенствование методики расчета первичного контура систем теплоснабжения, использующих низкопотенциальную теплоту грунта : дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.03. Тюмень, 2011. 139 с.

24. Сапрыкина Н. Ю., Яковлев П. В. Совершенствование методики прогнозирования температурных режимов породного массива вокруг низкопотенциальной геотермальной скважины // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. 2019. № 3(16). С. 16–25.

25. Сапрыкина Н. Ю. Совершенствование методики расчета систем теплоснабжения и кондиционирования на основе низкопотенциальных геотермальных источников энергии : дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.03. Астрахань, 2020. 149 с.

26. Тимофеев Д. В. Разработка метода расчета теплонасосных систем с грунтовым теплообменником для определения их энергетического ресурса : дисс. ... канд. техн. наук : 2.1.3. Москва, 2021. 120 с.

27. Васильев Г. П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев земли : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.03. Новосибирск, 2006. 432 с.

28. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М. : Высш. школа, 1967. 600 с.

29. Bergman T.L.; Lavine A.S.; Incropera F.P.; Dewitt D.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer; John Wiley & Sons: New York, NY, USA, 2011.

### References

1. Atam, E., Helsen, L. Ground-coupled heat pumps: Part 2. - Literature review and research challenges in optimal design. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 54, 1668–1684. DOI 10.1016/j.rser.2015.07.009.

2. Tang, F.-J. Numerical investigation on the ground heat exchanger installed in shallow depth soils : A thesis submitted in partial fulfillment for the degree of PhD in the Doctoral School of MSII; University of Strasbourg, 2019. 236 p. Available at: [https://theses.hal.science/tel-02528548/preview/TANG\\_Fujiao\\_2019\\_ED269.pdf](https://theses.hal.science/tel-02528548/preview/TANG_Fujiao_2019_ED269.pdf) (accessed 01.03.2022).

3. Lamarche, L. Horizontal ground heat exchangers modelling. Applied Thermal Engineering, 2019, 155, pp. 534–545. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2019.04.006

4. Li, H., Nagano, K., Lai, Y. Heat transfer of a horizontal spiral heat exchanger under groundwater advection. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55, pp. 6819–6831. DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.06.089.

5. Kupiec, K., Larwa, B., Gwadera, M. Heat transfer in horizontal ground heat exchangers. Applied Thermal Engineering, 2015, 75, pp. 270–276. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2014.10.003.

6. Xiong, Z., Fisher, D.E., and Spitler, J.D. Development and validation of a Slinky (TM) ground heat exchanger model. Applied Energy, 2015, 141, pp. 57–69. DOI 10.1016/j.apenergy.2014.11.058.

7. Wang, D., Lu, L., and Cui, P. A new analytical solution for horizontal geothermal heat exchangers with vertical spiral coils. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 100, pp. 111–120. DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.04.001.

8. Jeon, J.-S., Lee, S.-R., and Kim, M.-J. A modified mathematical model for spiral coil-type horizontal ground heat exchangers. Energy, 2018, 152, pp. 732–743. DOI 10.1016/j.energy.2018.04.007.

9. Tang, F.-J. Numerical investigation on the ground heat exchanger installed in shallow depth soils....

10. Tang F., Nowamooz H. Sensitive analysis on the effective soil thermal conductivity of the Thermal Response Test considering various testing times, field conditions and U-pipe lengths. Renewable Energy, 2019, 143:1732-1743. DOI 10.1016/j.renene.2019.05.120.

11. Gan, G. Dynamic thermal performance of horizontal ground source heat pumps – The impact of coupled heat and moisture transfer. Energy, 2018, 152, pp. 877–887. DOI 10.1016/j.energy.2018.04.008.

12. Fujii, H., Nishi, K., Komaniwa, Y., Chou, N. Numerical modeling of slinky-coil horizontal ground heat exchangers. Geothermics, 2012, 41, pp. 55–62. DOI 10.1016/j.geothermics.2011.09.002.

13. Al-Ameen, Y., Ianakiev, A., Evans, R. Recycling construction and industrial landfill waste material for backfill in horizontal ground heat exchanger systems.

Energy, 2018, 151, pp. 556–568. DOI 10.1016/j.energy.2018.03.095.

14. Dasare R., Saha S. Numerical study of horizontal ground heat exchanger for high energy demand applications. Applied Thermal Engineering, 2015, Vol. 85, pp. 252–263. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2015.04.014.

15. Congedo P.M., Colangelo G., Starace G. CFD simulations of horizontal ground heat exchangers: A comparison among different configurations, Applied Thermal Engineering, 2012, Vol. 33–34, pp. 24–32. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2011.09.005.

16. Widiatmojo A, Chokchai S, Takashima I, Uchida Y, Yasukawa K, Chotpantararat S, Charusiri P. Ground-Source Heat Pumps with Horizontal Heat Exchangers for Space Cooling in the Hot Tropical Climate of Thailand. Energies. 2019; 12(7):1274. <https://doi.org/10.3390/en12071274>.

17. Lebbihiat N., Atia A., Arıcı M., Meneceur N., Hadjadj A., Chetioui Y. Thermal performance analysis of helical ground-air heat exchanger under hot climate: In situ measurement and numerical simulation, Energy, Vol. 254, Part C, 2022, 124429, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124429>.

18. Zeng C., Yuan Y., Xiang B., Cao X., Zhang Z., Sun L. Thermal and infrared camouflage performance of earth-air heat exchanger for cooling an underground diesel generator room for protective engineering, Sustainable Cities and Society, Vol. 47, 2019, 101437, ISSN 2210-6707, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101437>.

19. Yang W., Xu R., Wang F., Chen S., Experimental and numerical investigations on the thermal performance of a horizontal spiral-coil ground heat exchanger, Renewable Energy, Vol. 147, Part 1, 2020, pp. 979–995, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.030>.

20. Bulmez, A.-M., Ciofoaia, V., N`astase, G., et al. Numerical Investigation on Auxiliary Heat Sources for Horizontal Ground Heat Exchangers. Buildings 2022, 12, 1259. <https://doi.org/10.3390/buildings12081259>.

21. Li C., Mao J., Zhang H., Xing Z., Li Y., Zhou J. Numerical simulation of horizontal spiral-coil ground source heat pump system: Sensitivity analysis and operation characteristics, Applied Thermal Engineering, 2017, Vol. 110, pp. 424–435. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2016.08.134.

22. Liu, Q., Tao, Y., Shi, L., Zhou, T., Huang, Y., Peng, Y., Wang, Y., Tu, J. Parametric optimization of a spiral ground heat exchanger by response surface methodology and multi-objective genetic algorithm, Applied Thermal Engineering, 2023, Vol. 221, 119824. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2022.119824.

23. Krotov V.M. *Sovershenstvovanie metodiki rascheta pervichnogo kontura sistem teplosnabzheniya, ispol'zuyushchih nizkopolencial'nuyu teplotu grunta* [Improving the methodology for calculating the primary circuit of heat supply systems using low-potential soil heat] : A thesis submitted fulfillment for the degree of PhD. Tyumen, 2011, 139 p. (in Russ.).

24. Saprykina, N. YU., YAKovlev P. V. *Sovershenstvovanie metodiki prognozirovaniya temperaturnykh rezhimov porodnogo massiva vokrug nizkopolencial'noj geotermal'noj skvazhiny* [Improving the method for pre-

dicting the temperature regimes of the rock mass around a low-grade geothermal well]. *Gradostroitel'stvo. Infrastruktura. Kommunikacii*, 2019, No. 3, pp. 16-25 (in Russ.).

25. Saprykina N.YU. *Sovershenstvovanie metodiki rascheta sistem teplosnabzheniyai kondicionirovaniya na osnove nizkopotencial'nyh geotermal'nyh istochnikov energii* [Improving the methodology for calculating heat supply and air conditioning systems based on low-grade geothermal energy sources] : A thesis submitted fulfillment for the degree of PhD. Astrakhan, 2020, 149 p. (in Russ.).

26. Timofeev D.V. *Razrabotka metoda rascheta teplonasosnyh sistem gruntovym teploobmennikom dlya opredeleniya ih energeticheskogo resursa* [Development of a method for calculating heat pump systems with a

ground heat exchanger to determine their energy resource] : A thesis submitted fulfillment for the degree of PhD. Moscow, 2021, 120 p. (in Russ.).

27. Vasil'ev G.P. *Teplohodosnabzhenie zdaniy i sooruzhenij s ispol'zovaniem nizkopotencial'noj teplovoj energii poverhnostnyh sloev zemli* [Heat and cold supply of buildings and structures using low-grade thermal energy of the surface layers of the earth] : A thesis submitted fulfillment for the degree of Doctor of Technical Sciences. Novosibirsk, 2006, 432 p. (in Russ.).

28. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity]. Moscow: *Vyssshaya shkola*, 1967, 600 p. (in Russ.).

Bergman, T.L.; Lavine, A.S.; Incropera, F.P.; Dewitt, D.P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*; John Wiley & Sons: New York, NY, USA, 2011.

\*\*\*

### Temperature Field Model as a Factor to Improve a Horizontal Ground Heat Exchanger of a Heat Pump System: Review of Scientific Approaches and the Content of the Analytical Model

A. V. Shchenyatsky, DSc. in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

K. S. Shatalov, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

O. M. Shatalova, DSc. in Economics, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

*The article is devoted to the research of issues related to the organization of control systems for heat pump installations (HPS). HPS is used to use low-potential energy of the environment in the heat supply of buildings. HPS with horizontal ground heat exchangers (HGHE) are of great importance for improving energy efficiency. The efficiency and reliability of HPS with HGHE strongly depends on the state of the soil temperature field. A large number of scientific publications are devoted to modeling soil temperature fields for HGHE parameter determination; a significant part of them is devoted to the study of vertical ground heat exchangers. Scientific developments presented in foreign publications on modeling the temperature field of the HGHE location environment are focused on the use of HPS in the cold supply mode and/or in the heat supply mode under conditions of a slight decrease in temperature, which excludes soil freezing. The aim of the study was to apply the existing methods of the analytical theory of thermal conductivity to develop a soil-environment TP model for the placement of a HGHE HPS; the developed model is intended for engineering calculations of the main design HGHE parameters; the model is also applicable to determine the annual specific heat flow as an important parameter in the optimal control system of the HPI. The development of the model is based on the condition of a two-element structure of the soil massif: under the HGHE and above the HGHE; the target parameter is the temperature of the soil mass, depending on the coordinate and time, disclosed through the indicator "relative temperature rise"; in accordance with the provisions of the thermal conductivity theory, the relative excess temperature is given for the cases of a semi-infinite body (soil mass under the HGHE) and a slab (soil mass above the HGHE). The proposed model is implemented on the example of two constituent entities of the Russian Federation. The results obtained made it possible to determine the minimum guaranteed possibility of using HPS for heat supply in these climatic conditions. The model presented in the article can be used as a context for further studies of the main parameters of HGHE HPS operation and optimization of HPS operation modes.*

**Keywords:** mathematical modeling, optimal control, heat pump systems, temperature field, heat exchangers.

Получено: 16.05.23

#### Образец цитирования

Щенятский А. В., Шаталов К. С., Шаталова О. М. Модель температурного поля как фактор совершенствования системы оптимального управления теплонасосной установкой с горизонтальным грунтовым коллектором // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 3. С. 132–143. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-3-132-143.

#### For Citation

Shchenyatsky A.V., Shatalov K.S., Shatalova O.M. [Modeling of the temperature field for the placement of a horizontal ground heat exchanger of a heat pump system: review of scientific approaches and the content of the analytical model]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 132-143. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-3-132-143.