

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТА НА РАЗМЕРЫ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ГРУНТОВЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

Белорусский государственный технологический университет

Статья посвящена проблеме выбора размеров вертикальных грунтовых теплообменников тепловых насосов, в частности их длины, в зависимости от теплофизических характеристик грунта. Для этого предлагается комплексная численная модель грунтового теплового насоса на основе которой вначале анализируется работа теплового насоса с грунтовыми теплообменниками различной длины, а затем для рассматриваемых условий для грунтов с различными теплофизическими характеристиками определяются длины вертикальных грунтовых теплообменников, при которых падение теплопроизводительности теплового насоса не превышает 20%.

Установлено, что наибольшее влияние на размеры грунтового теплообменника оказывает теплопроводность, причем при низких ее значениях.

Ключевые слова: *низкопотенциальная энергетика, тепловой насос, вертикальный грунтовой теплообменник, теплопроводность, температуропроводность.*

Одним из направлений низкопотенциальной энергетике является применение тепловых насосов (ТН). При этом целесообразность их внедрения определяется температурами источника и потребителя теплоты, стоимостью замещаемого энергоносителя, а также техническими характеристиками теплонасосного оборудования [1].

Распространение получают ТН для утилизации низкопотенциальной теплоты грунта, которые содержат в своем составе грунтовые теплообменники. Одной из разновидностей таких теплообменников являются вертикальные грунтовые теплообменники (ВГТО). Они представляют собой коаксиальные или U-образные трубы, расположенные в вертикальной скважине, причем пространство между стенками скважины и трубами заполняется специальным раствором для улучшения термического контакта (рис. 1).

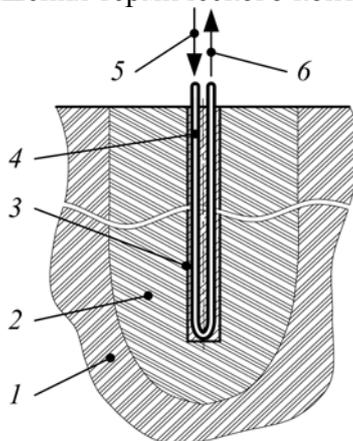


Рис. 1. Вертикальный грунтовой теплообменник:

1 – область грунта, не вступающего в тепловое взаимодействие с ВГТО; 2 – область грунта, вступающая в тепловое взаимодействие с ВГТО; 3 – поверхность скважины; 4 – U-образная трубка; 5, 6 – вход и выход теплоносителя соответственно

Особенностью работы этих систем является постепенное снижение температуры грунта вследствие его охлаждения за счет отвода теплоты. При этом также со временем будут изменяться параметры ТН, в частности теплопроизводительность Q_c и коэффициент трансформации ϕ . Во многом характер изменения температуры грунта (а как следствие и других параметров ТН) вследствие взаимодействия с системой утилизации низкопотенциальной теплоты будет зависеть от его теплофизических характеристик – теплопроводности λ и температуропроводности a .

Для устойчивой работы грунтового ТН должна быть выбрана такая длина ВГТО H (глубина скважин), при которой теплоотвод с единицы длины ВГТО не будет приводить к резкому падению температуры прилегающего грунта и показателей работы ТН. Практический и научный интерес представляет разработка расчетных методов определения требуемой H в зависимости от теплофизических характеристик грунта и параметров ТН. Также особый интерес представляет оценка влияния теплофизических характеристик грунта на требуемую величину H , так как она во многом будет определять экономическую эффективность внедрения грунтовых ТН.

Параметры работы ТН зависят не только от теплофизических характеристик грунта, но и многих других факторов (конструктивных особенностей теплообменников, свойств теплоносителей, параметров компрессора, типа хладагента, температуры теплоносителя системы теплоснабжения и др.). Следовательно, задачу определения требуемой H для различных λ и a следует решать с использованием комплексных методов, предполагающих учет взаимного влияния названных факторов, как это предлагается в настоящей работе на примере парокомпрессионного ТН с ВГТО.

Описание исследуемой системы

Рассматривается парокомпрессионный ТН с ВГТО (рис. 2). Тип конденсатора и испарителя – кожухотрубные теплообменники со стальными U-образными трубами 9×1 и 10×1 мм соответственно. Длина труб конденсатора – 3 м, испарителя – 2 м. Кипение и конденсация происходит в трубах. В обоих случаях количество труб – 20 с разбивкой по вершинам правильных треугольников. В контуре ТН использован хладагент R134a. Применяется поршневой компрессор Bitzer 4FES.

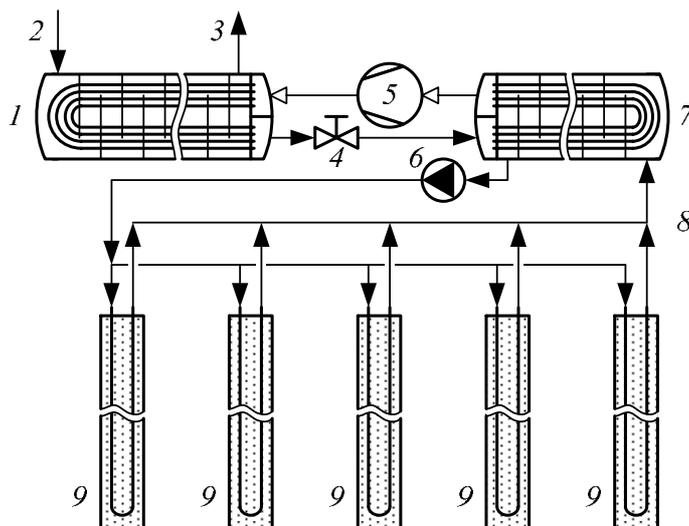


Рис. 2. Схема ТН с ВГТО:

1 – конденсатор; 2 – вход холодной воды потребителя; 3 – выход теплой воды потребителя; 4 – терморегулирующий вентиль; 5 – компрессор; 6 – циркуляционный насос грунтового контура; 7 – испаритель; 8 – грунтовой контур жидкого теплоносителя; 9 – ВГТО

Тип грунтовых теплообменников – с 2 U-образными полиэтиленовыми трубами диаметром 32×3 мм, расстояние между ветвями U-образных труб – 100 мм. Материал труб – полиэтилен, теплопроводность труб принимается 0,38 Вт/(м·К). Трубы расположены в скважине диаметром 200 мм. Количество ВГТО – 10. Теплопроводность материала заполнителя скважины – 2,3 Вт/(м·К). Теплоноситель контура грунтовых теплообменников – 12,2%-й водный раствор этиленгликоля.

Расходы теплоносителя грунтового контура и воды, поступающей на нагрев в конденсатор постоянны и равны соответственно 0,8 и 0,24 кг/с. Температура воды на входе в конденсатор принимается постоянной и равной $t'_2 = 50$ °С. Начальная температура грунта t_0 принимается равной 8 °С.

Задачей исследования является анализ изменения параметров ТН в заданных условиях при различных H , а также для различных теплофизических характеристик грунта определение таких H , при которых ТН будет работать устойчиво в течение исследуемого периода. Метод исследования – комплексное численное моделирование.

Численная модель и результаты анализа

Для расчетного описания таких сложных технических систем, как парокомпрессионные трансформаторы тепла, в последнее время разрабатываются и применяются комплексные численные методы, позволяющие достаточно подробно учесть параметры всех элементов, входящих в состав ТН и особенности их взаимодействия друг с другом. Такие методы нашли успешное применение при исследовании парокомпрессионных трансформаторов тепла промышленного назначения [2,3], тепловых насосов с горизонтальными грунтовыми теплообменниками [4].

В настоящей работе для анализа нестационарной работы грунтового ТН предлагается комплексная численная модель ТН с ВГТО. Используемая модель частично описана в работах [5, 6]. Здесь же предлагается ее наиболее полный законченный вариант.

Работа испарителя в настоящей модели описывается системой уравнений вида:

$$Q_e = G_1 c_1 (t_1'' - t_1'), \quad (1)$$

$$Q_e = G_2 (h_2'' - h_2'), \quad (2)$$

$$Q_e = F \alpha_1 (t_{1cp} - t_{w1}), \quad (3)$$

$$G_2 r dx = \frac{(t_{w1} - t_s) dF_k}{\frac{d_{нар}}{\alpha_2 d_{вн}} + \frac{d_{нар}}{2\lambda_w} \ln \frac{d_{нар}}{d_{вн}}}, \quad (4)$$

$$G_2 c_2 dT_2 = \frac{(t_{w1} - t_2) dF_{п}}{\frac{d_{нар}}{\alpha_2 d_{вн}} + \frac{d_{нар}}{2\lambda_w} \ln \frac{d_{нар}}{d_{вн}}}, \quad (5)$$

где Q_e – тепловой поток испарителя (холодопроизводительность), Вт; G_1 – массовый расход

теплоносителя грунтового контура в испарителе, кг/с; c_1 – теплоемкость теплоносителя грунтового контура, Дж/(кг·К); G_2 – массовый расход хладагента, кг/с; h_2'' , h_2' – энтальпия хладагента на выходе и входе испарителя соответственно, Дж/кг; $F = F_k + F_n$ – площадь наружной поверхности труб испарителя, м², F_k – площадь поверхности труб участка кипения, м², F_n – площадь поверхности труб участка перегрева, м²; α_1 – средний коэффициент теплоотдачи теплоносителя в межтрубном пространстве, Вт/(м²·К); t_{1cp} – средняя температура теплоносителя грунтового контура, °С; t_{w1} – средняя температура наружной поверхности труб испарителя, °С; r – теплота парообразования хладагента, Дж/кг; x – массовое расходное паросодержание; t_s – температура кипения хладагента, °С; $d_{нар}$ – наружный диаметр труб испарителя, м; α_2 – локальный коэффициент теплоотдачи со стороны хладагента, Вт/(м²·К); $d_{вн}$ – внутренний диаметр труб испарителя, м; λ_w – теплопроводность материала труб испарителя, Вт/(м·К); c_2 – теплоемкость хладагента, Дж/(кг·К); t_2 – температура хладагента, °С.

Работа конденсатора описывается системой уравнений аналогичной по структуре уравнениям (1)–(5). Для учета работы ВГТО дополнительно используется уравнение теплопередачи в виде:

$$Q = \frac{H}{R_b} (t_b - t_{1cp}). \quad (6)$$

где R_b – сопротивление теплопередаче ВГТО, мК/Вт; t_b – средняя температура поверхности скважины, °С.

Для ВГТО заданных размеров R_b является функцией теплопроводности заполнителя скважины и труб, коэффициента теплоотдачи в трубах, массового расхода и изобарной массовой теплоемкости теплоносителя грунтового контура. Существует несколько подходов в определении R_b , здесь для этого используется метод теплового расчета ВГТО по работе [5].

Параметры компрессора в численной модели учитываются в функциональных зависимостях коэффициента подачи и внутреннего КПД от степени сжатия в компрессоре и температур кипения и конденсации, полученными обработкой паспортных данных используемого компрессора по данным программы Bitzer-Software [7].

Система уравнений (1)–(6) дополняется расчетом термодинамического цикла ТН с допущением о полной конденсации хладагента без дополнительного охлаждения после конденсатора. При определении параметров хладагента в характерных точках и коэффициентов теплоотдачи в теплообменниках используются табличные значения теплофизических свойств R134a по данным работы [8], для определения параметров хладагента в перегретом состоянии используется уравнение состояния R134a работы [9].

Система уравнений (1)–(6) решается численно для заданных параметров теплообменных аппаратов и компрессора при известной температуре грунта и воды на входе в испаритель. Расчет ведется для различных возможных температур грунта от -10 до 10 °С, при этом основным результатом расчета являются характеристики ТН в виде зависимости теплопроизводительности Q_c , холодопроизводительности Q_e , коэффициента трансформации ϕ и температуры теплоносителя на выходе из конденсатора t''_2 от температуры поверхности скважины t_b . Для удобства дальнейших расчетов эти характеристики представляются в виде зависимостей названных параметров от температуры теплоносителя грунтового контура на входе в испаритель t'_1 (рис. 3) и аппроксимируются полиномом четвертой степени.

Видно, что основные параметры ТН зависят от t''_1 , которая также будет снижаться с уменьшением температуры грунта. Соответственно, если в течение эксплуатации ТН она будет проявлять значительное падение, то и ТН будет работать неэффективно. Так при снижении t''_1 на 1°C теплопроизводительность падает на $\approx 0,35$ кВт, коэффициента трансформации на $\approx 0,1$ а температура воды на выходе из конденсатора на $\approx 0,4^\circ\text{C}$.

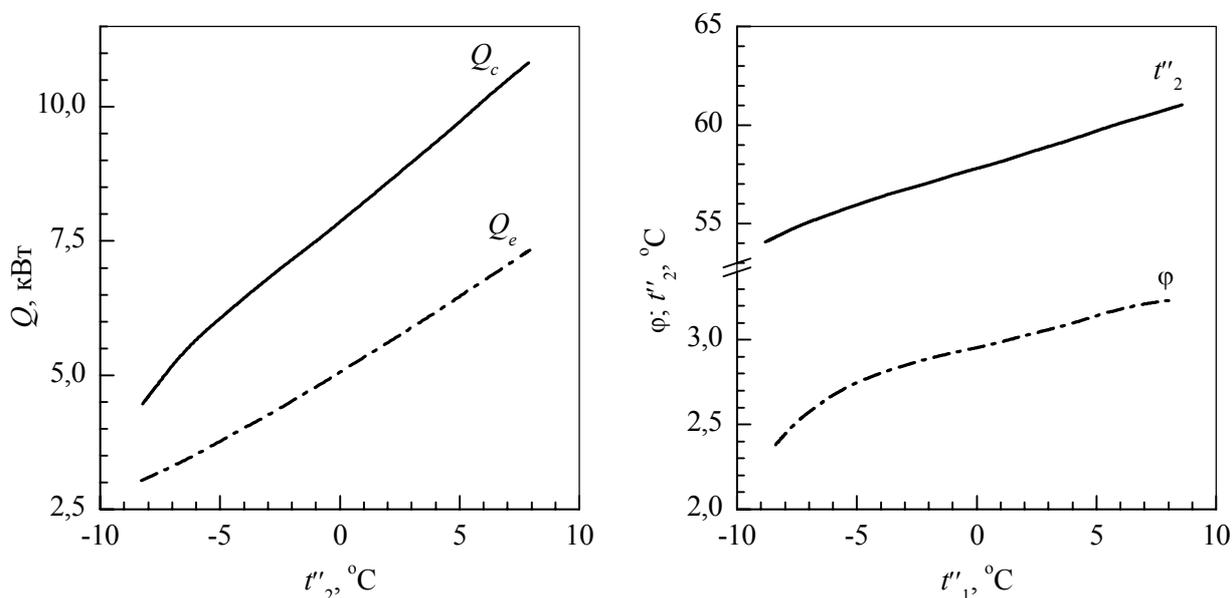


Рис. 3. Характеристики ТН

Интенсивность падения температуры грунта, а соответственно и t''_1 , теплопроизводительности и коэффициента трансформации ТН может быть оценена при численном моделировании его нестационарной работы. Здесь принимается допущение, что для достаточно малого интервала времени режим работы контура ТН и ВГТО квазистационарный. Изменение параметров ТН происходит с изменением температуры грунта, которое получается при численном моделировании теплопереноса в нем. В предлагаемом исследовании теплообмен в грунте описывается уравнением теплопроводности в виде:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) \text{ при } 0 < \tau < \infty, r_b < r < r_\infty, \quad (7)$$

где t – температура грунта, $^\circ\text{C}$; τ – время, с; r – радиальная координата, м; r_b – радиус скважины ВГТО, м; r_∞ – координата на удалении от ВГТО, при которой не происходит изменения температуры вследствие теплового взаимодействия ВГТО, м.

Начальные условия соответствуют постоянной температуре t_0 , равной средней температуре грунта ниже области сезонных колебаний температуры, здесь принимается $t_0 = 8^\circ\text{C}$. На удалении от ВГТО ($r = r_\infty, 0 < \tau < \infty$) задается граничное условие первого рода в виде постоянной температуры t_0 , равной температуре грунта ниже области сезонных колебаний. Особенности взаимодействия грунта и ВГТО при этом учитываются граничным условием 3-го рода, задаваемым на поверхности скважины:

$$\frac{t_b - t_{\text{лп}}}{2\pi r_b R_b} = \lambda \frac{\partial t}{\partial r} \text{ при } 0 < \tau < \infty, r = r_b. \quad (8)$$

Уравнение (7) с учетом характеристик ТН по рис. 3 и параметров ВГТО решается методом конечных разностей. При этом для заданной длины ВГТО получается распределение температуры грунта на исследуемом отрезке времени и изменение основных параметров ТН. Так на рис. 4–6 представлено изменение средней температуры поверхности скважины ВГТО, теплопроизводительности и коэффициента трансформации ТН при теплофизических свойствах грунта $\lambda = 0,45 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ и $a = 3,2 \text{ м}^2/\text{с}$ при $H = 25, 50, 75$ и 100 м . При этом количество ВГТО составляет 10. Изменение холодопроизводительности имело аналогичный характер.

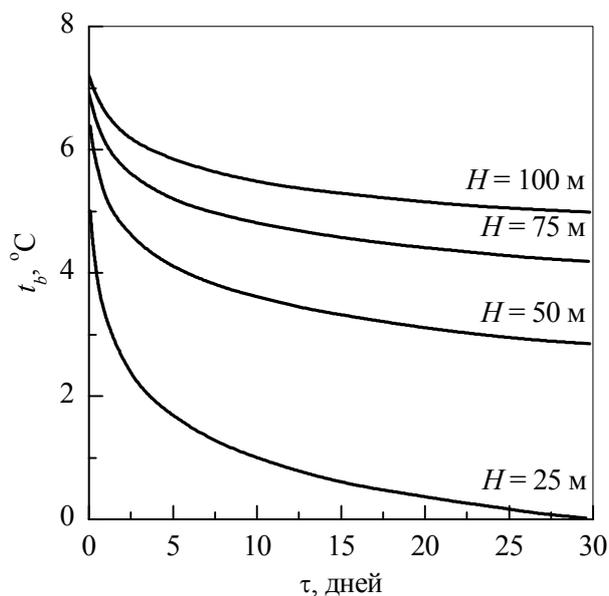


Рис. 4. Изменение средней температуры поверхности скважины ВГТО при различных H для теплофизических характеристик $\lambda = 0,45 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ и $a = 3,2 \text{ м}^2/\text{с}$

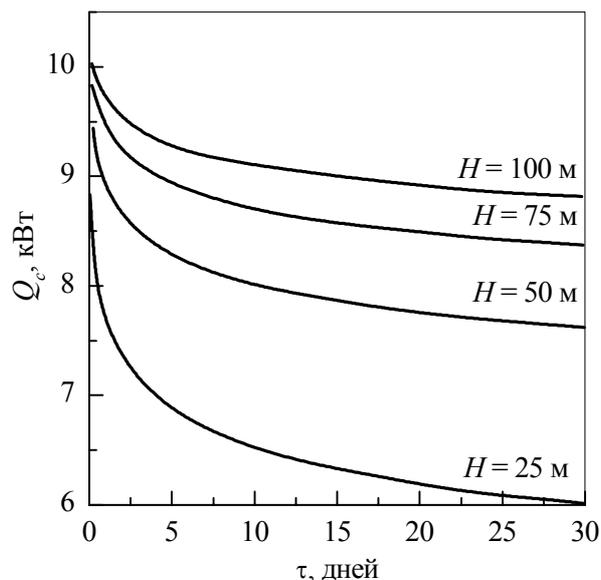


Рис. 5. Изменение теплопроизводительности ТН при различных H для теплофизических характеристик $\lambda = 0,45 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ и $a = 3,2 \text{ м}^2/\text{с}$

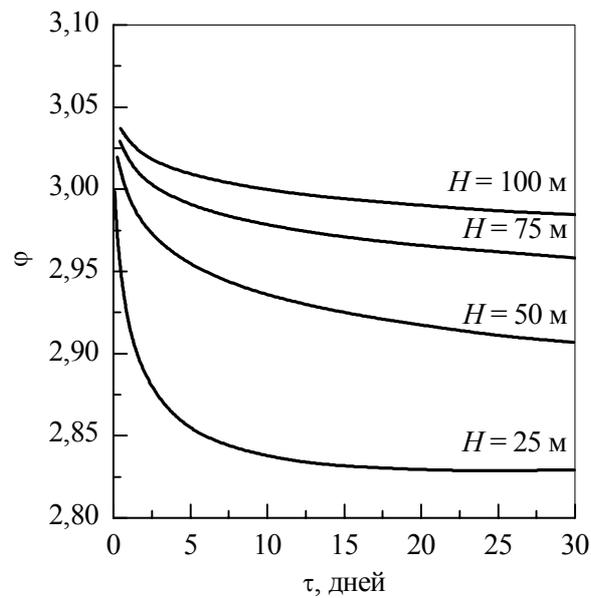


Рис. 6. Изменение коэффициента трансформации ТН при различных H для теплофизических характеристик $\lambda = 0,45$ Вт/(м·К) и $a = 3,2$ м²/с

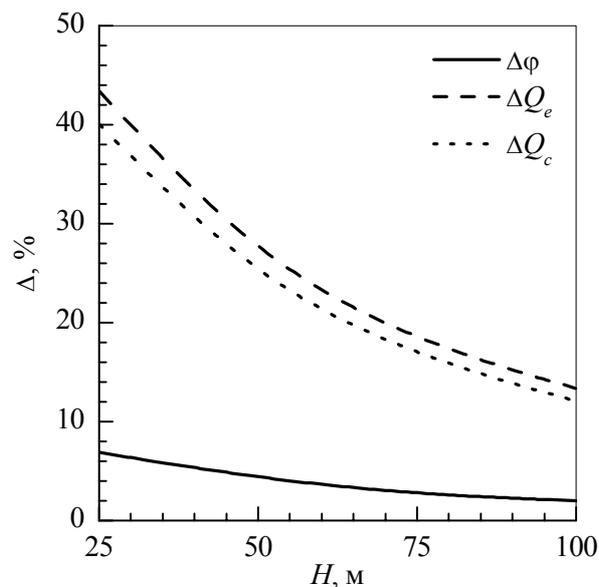


Рис. 7. Относительное снижение основных параметров работы ТН за 30 суток непрерывной работы для теплофизических характеристик $\lambda = 0,45$ Вт/(м·К) и $a = 3,2$ м²/с

На рис. 7 в зависимости от H показано относительное снижение теплопроизводительности, холодопроизводительности и коэффициента трансформации ТН, определяемые соответственно как:

$$\Delta Q_c = \frac{Q_{c,0} - Q_{c,30}}{Q_{c,0}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

$$\Delta Q_e = \frac{Q_{e,0} - Q_{e,30}}{Q_{e,0}} \cdot 100\%, \quad (10)$$

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi_0 - \varphi_{30}}{\varphi_0} \cdot 100\%, \quad (11)$$

где $Q_{c,0}$, $Q_{e,0}$, φ_0 – соответственно теплопроизводительность, холодопроизводительность и коэффициент трансформации ТН в начальный момент времени; $Q_{c,30}$, $Q_{e,30}$, φ_{30} – соответственно теплопроизводительность, холодопроизводительность и коэффициент трансформации ТН в момент времени $\tau = 30$ суток.

Из рис. 7 видно, что с увеличением длины ВГТО снижение параметров работы ТН замедляется. Тем не менее, большие длины ВГТО соответствуют значительным затратам на бурение скважин, что может привести к экономической нецелесообразности внедрения грунтового ТН. Следовательно, при проектировании ВГТО, а именно при выборе H , следует находить некоторый компромисс между снижением Q_c и величиной H . Следует отметить, что основное снижение Q_c и φ происходит в начальном периоде работы ТН (первый-второй месяц), затем снижение показателей работы замедляется. Наиболее точно установить приемлемое снижение Q_c можно в результате технико-экономического расчета, тем не менее в данной работе для упрощения расчетов считается, что снижение Q_c на 20% за первые 30 суток работы будет приемлемым.

На основе предложенной численной модели (1)–(8) для рассматриваемого ТН определены H , при которых выполняется указанное требование ($\Delta Q_c = 20\%$) для различных грунтов с учетом ориентировочных λ и a по таблице 1. Свойства грунтов взяты из работы [10]. Отметим, что в таблице 1 приведены ориентировочные значения теплофизических характеристик, которые на практике могут значительно отклоняться от представленных значений. Поэтому при проектировании ТН с ВГТО расчетные данные должны быть основаны на точных теплофизических характеристиках, полученных в результате экспериментального анализа грунта предполагаемой площадки размещения проектируемой установки.

Результаты исследования представлены в таблице 1 и на рис. 8. Как видно из рис. 8, влияние λ и a на H весьма значительно. Так, для диапазона λ и a по таблице 1 H изменяется от 18,2 до 99 м. Расчеты показывают, что наибольшее влияние на величину H оказывает λ , причем это в большей степени характерно для ее низких значений, так при изменении λ с 0,5 до 0,4 Вт/(м·К) требуемая длина ВГТО H возрастает с 81 до 99 м (рост на 22%), а при изменении λ с 1,8 до 1,7 Вт/(м·К) H возрастает с 24,5 до 25,7 м (рост на 5%).

Таблица 1

Теплофизические свойства грунтов [10] и длины ВГТО

Тип грунта	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^6$, м ² /с	H , м	Обозначения по рисунку 2
Песок, сухой	0,4	0,28	99,0	○
Песок, влажный	2,4	0,94	18,2	●
Гравий, сухой	0,4	0,27	98,5	△
Гравий, влажный	1,8	0,75	24,5	□
Глина, суглинок, влажные	0,5	0,32	81,0	■
Торф	1,7	0,68	25,7	▲

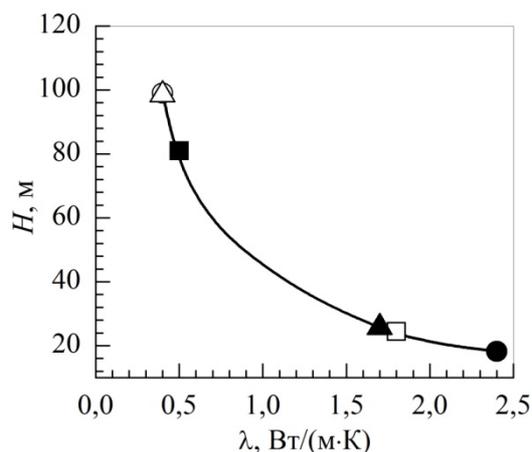


Рис. 8. Глубина скважин ВГТО для грунтов с различными теплофизическими свойствами. Расшифровка обозначений (маркеров) приведена в таблице 1.

Также на рис. 9 представлены изменения Q_c и Q_e , на рис. 10 – ϕ и t''_2 в течение исследуемого периода для случая влажного гравия со свойствами по таблице 1 при длине ВГТО 24,5 м. Видно, что в этом случае снижение Q_c на 20% (на 1,26 кВт) также сопровождается падением Q_e на 16% (на 0,99 кВт), ϕ на 5% (на 0,14) и t''_2 на 1,3 °С.

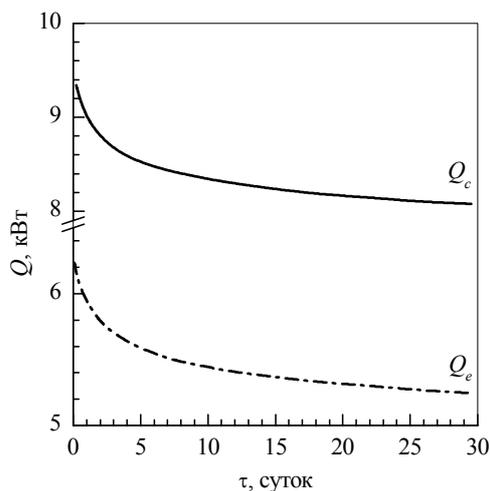


Рис. 9. Изменение теплопроизводительности и холодопроизводительности ТН во времени

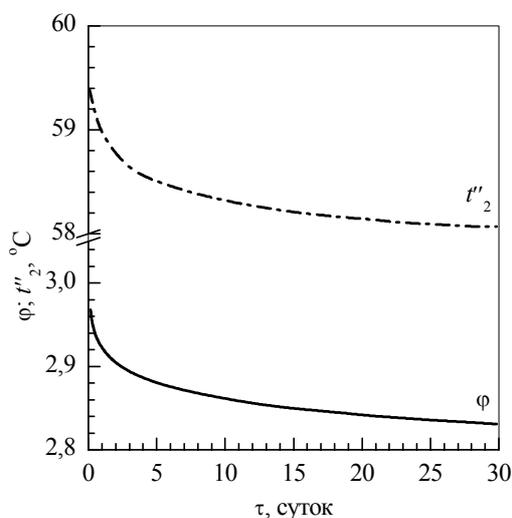


Рис. 10. Изменение температуры нагреваемой воды и коэффициента трансформации ТН во времени

Выводы

Разработана комплексная численная модель ТН с ВГТО. На основе модели исследовано влияние длины ВГТО на изменение во времени теплопроизводительности, холодопроизводительности и коэффициента трансформации ТН. Также, для различных теплофизических свойств грунта, дана оценка длин ВГТО, при которых снижение теплопроизводительности ТН не превышает 20%. Анализ полученных данных свидетельствуют о существенном влиянии теплофизических характеристик грунта на размеры ВГТО, работающих в составе ТН. Следовательно, при проектировании таких систем необходимо особое внимание уделять точности определения теплофизических характеристик грунта для дальнейших расчетов, в особенности при низких значениях теплопроводности.

Подход, использованный в данной работе, может быть применен не только при проектировании и анализе эффективности ТН с ВГТО, но и при оценке технического потенциала низкопотенциальной геотермальной энергетики различных территорий.

Список литературы

1. Тимофеев, Б. Д. О соотношении цен энергоносителя в Беларуси и Калининградской области для обоснования внедрения тепловых насосов / Б. Д. Тимофеев, В. А. Николаев, А. Э. Суслов, Ю. А. Фатыхов // Вестник МАХ. – 2012, № 3. – С. 48–51.
2. Володин, В. И. Комплексный подход к расчету параметров компрессионной холодильной машины / В. И. Володин // Холодильная техника. – 1998. – № 2. – С. 8–10.
3. Здитовецкая, С. В. Метод расчета пароконденсационных трансформаторов тепла / С. В. Здитовецкая, В. И. Володин // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2012. – № 5. – С. 76–82.
4. Мацевитый, Ю. М., Тарасова, В. А., Харлампиди, Д. Х. Восстановление теплового потенциала грунта за счет выбора рациональных режимов работы теплонасосной системы // Тезисы докладов и сообщений XIV Минского международного форума по тепло- и массообмену – 2012. – Т. 1. – С. 736–739.
5. Филатов С. О. Тепловой расчет вертикальных грунтовых теплообменников / Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2013. – № 4. – С. 81–90
6. Филатов С. О. Численное моделирование и анализ энергетических параметров теплового насоса с многотрубными вертикальными грунтовыми теплообменниками / Филатов С. О. // Экология и промышленность. – 2013, № 3. – С. 61–66.
7. Bitzer-Software // URL. <https://www.bitzer.de/websoftware>.
8. VDI-Wärmeatlas. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – 1445 s.
9. Tillner-Roth, R. An International Standard Formulation for the Thermodynamic Properties of 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (HFC-134a) for Temperatures From 170 K to 455 K and Pressures up to 70 MPa / R. Tillner-Roth, H.-D. Baehr // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 1994. – Vol. 23, No. 5 – P. 657–729.
10. Glück B. Wärmeübertragung. Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren. – Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, 1989. – 440 p.

*Автор статьи «Влияние теплофизических характеристик грунта на размеры вертикальных грунтовых теплообменников тепловых насосов» **Филатов Святослав Олегович** (научный руководитель - д.т.н., проф. Володин В.И., БГТУ, г. Минск) стал победителем в секции «Низкопотенциальная энергетика» Третьей международной конференции с элементами научной школы для молодежи «ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ТЕХНИКИ И ФИЗИКИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР», состоявшейся 10-12 декабря 2013 года*