УДК 697.329: 621.577.22

НЕСТАЦІОНАРНИЙ ПЕРЕНОС ТЕПЛОТИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ ГРУНТОВОМУ ТЕПЛООБМІННИКУ

Басок Б. І., Давиденко Б.В., Божко І.К., Мороз М.В.

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.05>

З застосуванням тривимірної моделі переносу теплоти в системі «грунт – горизонтальний ґрунтовий теплообмінник – теплоносій» проведено аналіз ефективності роботи горизонтального багатопетлевого трубного теплообмінника, що є елементом теплонасосної установки. За результатами чисельного моделювання визначено залежність від часу температури теплоносія на виході з ґрунтового теплообмінника і кількості теплоти, яке вилучається з ґрунту. Результати розрахунків за наведеною моделлю задовільно узгоджуються з даними експерименту.

С использованием трехмерной модели переноса теплоты в системе «грунт – горизонтальный ґрунтовый теплообменник – теплоноситель» проведен анализ эффективности работы горизонтального многопетлевого трубного теплообменника, который является элементом теплонасосной установки. По результатам численного моделирования определена зависимость от времени температуры теплоносителя на выходе из ґрунтового теплообменника и количества теплоты, которое извлекается из ґрунта. Результаты расчетов по представленной модели удовлетворительно согласуются с данными эксперимента.

By the three-dimensional model of heat transfer in the system "ground – horizontal ground heat exchanger – heat transfer agent", an analysis of the efficiency of the horizontal multiloop heat exchanger, which is an element of the heat pump system, was carried out. Based on the results of numerical simulation, the time dependence of the heat transfer agent temperature at the outlet from the ground heat exchanger and the amount of heat extracted from the ground is determined. The results of calculations by the presented model are satisfactorily agree with the experimental data.

Бібл. 13, рис. 5.

Ключові слова: тепlopостачання, горизонтальний ґрунтовий теплообмінник, тепловий насос, акумулювання теплоти.

C , Дж/(кг·К) – теплоємність;
 d , м – температура;
 G , м³/год – витрата;
 h , м – глибина;
 K , Вт/(м·К) – лінійний коефіцієнт теплопередачі;
 Q , Вт – тепловий потік;
 T , °С – температура;
 x, y, z , м – прямокутні координати;
 δ , м – товщина;
 λ , Вт/(м·К) – коефіцієнт теплопровідності;

ρ , кг/м³ – густина;
 τ , с – час

Нижні індекси:
 0 – початковий;
 вх – вхід;
 вих – вихід;
 max – максимальний;
 г – ґрунт.

Вступ. Відповідно до вимог Енергетичної стратегії України на період до 2030 р. все більшої актуальності набувають розробка та впровадження високоефективних теплонасосних систем тепlopостачання на основі відновлюваних джерел енергії. Важливим кроком при розробці таких систем є вибір типу теплового насоса. Дослідження показують, що для першої кліматичної зони України доцільно використовувати теплові насоси типу «грунт – вода». Це пояснюється тим, що шари ґрунту, які знаходяться нижче глибини промерзання, мають стабільну температуру, близьку до +8 °С. Таким чином, тепловий насос використовує джерело низькопотенційної теплоти з практично постійним температурним потенціалом, що дозволяє досягти високого середнього за опалювальний період значення коефіцієнта перетворення енергії (COP $\geq$ 3,0).

Для теплонасосних систем тепlopостачання зас-

тосовуються два основних типи ґрунтових теплообмінників – горизонтальної або вертикальної орієнтації. При використанні горизонтальних ґрунтових теплообмінників неглибокого залягання основною проблемою є відсутність вітчизняних стандартизованих методик розрахунку їх теплотехнічних характеристик. На сьогодні такі теплообмінники проектують та впроваджують без теплофізичного обґрунтування їх оптимальних робочих параметрів.

Публікація містить результати досліджень, проведених при грантовій підтримці Державного фонду фундаментальних досліджень за конкурсним проектом Ф83/99-2018.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є нестационарні процеси теплообміну при роботі горизонтального ґрунтового колектора неглибокого залягання в складі теплонасосної системи тепlopостачан-

ня експериментальної лабораторії. Горизонтальний ґрунтовий колектор розташований на глибині 1,65 м на території ІТТФ НАН України [1]. Загальна довжина труби колектора 269 м. Внутрішній діаметр поліетиленової труби $d_{\text{вн}} = 0,028$ м. Товщина стінки труби $\delta = 0,002$ м. Теплоносій – 30% водяний розчин пропіленгліколю. Витрата теплоносія $G = 0,756$ м³/год.

Мета дослідження. Мета дослідження – вдосконалення існуючих та створення нової методики розрахунку основних параметрів горизонтальних ґрунтових теплообмінників (акумуляторів) неглибокого залягання, на основі якої, стало б можливим розрахувати оптимальну конструкцію та гідравлічний режим роботи теплообмінника в залежності від типу ґрунту, потужності теплового насоса, доступної глибини залягання та кліматичної зони.

Дослідження існуючих рішень проблеми. В літературі широко розглядаються принципові конструкції горизонтальних ґрунтових теплообмінників [2-4]. Найбільше застосування знайшли горизонтальні ґрунтові теплообмінники, а також вертикальні теплообмінники типу «труба в трубі» (коаксіальні), U-подібні (одно та багатопетльові) та об'ємні.

Для розрахунку ґрунтових акумуляторів в інженерній практиці використовуються методики, що засновані на розрахунку роботи вертикального ґрунтового теплообмінника. Дана методика, в свою чергу, заснована на рішенні задачі лінійного джерела з постійною лінійною густиною теплового потоку [5]. Аналітичне розв'язання знаходиться в вигляді нескінченного ряду і пов'язане з великою кількістю обмежень.

У роботах [6, 7] представлені результати чисельного розв'язання рівняння теплопровідності. В роботі [8] наведено моделювання процесів теплообміну в ґрунті при відборі теплоти вертикальним ґрунтовим теплообмінником. Також, чисельні методи застосовуються при розрахунках ґрунтових акумуляторів в роботах [9,10], однак в них відсутній виклад суті методик.

Складність розв'язання цієї задачі полягає в тому, що для опису процесів теплопровідності в необмеженому просторі використовується громіздкий математичний апарат. Перенос теплоти в ґрунтовому масиві описується диференціальним рівнянням теплопровідності. До нього додаються початкові і граничні умови, що і є фізико-математичним формулюванням задачі ґрунтового акумулювання теплоти. Існує ряд проблем щодо одержання аналітичного розв'язання задач ґрунтового акумулювання теплової енергії. У разі зміни у часі граничних умов для задачі переносу теплоти в необмеженому просторі виникають також проблеми з застосуванням чисельних методів. Таким чином, при вирішенні задач ґрунтового акумулювання необхідно застосовувати комбінований аналітично-чисельний метод.

Однак немає чітких рекомендацій або методик для розрахунку та підбору того чи іншого варіанту конструкції теплообмінника. Також в літературі міститься недостатньо інформації щодо експериментальних досліджень роботи ґрунтових теплообмінників.

Основна частина. Тривимірна чисельна модель температурного стану ґрунтового масиву при роботі ґрунтового колектора розглядається в розрахунковій області, що має форму прямокутного паралелепіпеда зі сторонами $x_{\text{max}} = 17$ м, $y_{\text{max}} = 34$ м, $z_{\text{max}} = 7$ м [12]. На глибині h розглянутої області розташовується горизонтальний плоский трубчастий змієвиковий теплообмінник (ґрунтовий колектор) з циркулюючим теплоносієм. Значення x_{max} , y_{max} і z_{max} вибираються так, щоб процеси теплопереносу до ґрунтового колектора мінімально впливали на температурні умови на границях розрахункової області. Температурне поле ґрунтового масиву описується рівнянням теплопровідності:

$$c_p \rho_z \frac{\partial T_z}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_z \frac{\partial T_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_z \frac{\partial T_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T_z}{\partial z} \right). \quad (1)$$

Для його розв'язання на поверхні ґрунту ($z = 0$) повинні бути задані граничні умови. У загальному випадку це можуть бути умови третього роду. У природних умовах коливання температури зовнішнього повітря, а також інтенсивності радіаційного теплообміну, призводять до зміни не тільки температури поверхні ґрунту $T_0(\tau, 0)$, а й до змін закону розподілу температури по його глибині $T_0(\tau, z)$. Але зазначені зміни спостерігаються лише до певної глибини, нижче якої температуру ґрунту можна вважати постійною (однаковою). Якщо межа розрахункової області виявляється нижче вказаного рівня, то умови на нижній межі ($z = -z_{\text{max}}$) можуть наближено вважатися умовами теплоізоляції

$$\left. \frac{\partial T_z}{\partial z} \right|_{z=-z_{\text{max}}} = 0. \quad (2)$$

На інших границях розрахункової області задаються умови, що відповідають температурному режиму ґрунтового масиву при відсутності колектора. Якщо теплоперенос в масиві пов'язаний з роботою колектора відсутній, то розподіли температури в горизонтальних перетинах масиву будуть рівномірними. Це означає, що частинні похідні від температури T_z по змінним x або y будуть дорівнювати нулю. Можна припустити, що зазначені умови приблизно виконуються на бічних границях розрахункової області при роботі колектора, якщо ці границі досить віддалені від його крайніх сегментів. В цьому випадку:

$$\left. \frac{\partial T_z}{\partial x} \right|_{x=0, x_{\text{max}}} = 0, \quad \left. \frac{\partial T_z}{\partial y} \right|_{y=0, y_{\text{max}}} = 0. \quad (3)$$

Граничним умовам (2), (3) для рівняння теплопереносу в ґрунтовому масиві (1) відповідає умова відсутності надходження теплоти в розрахункову область з боку ділянок даного масиву, розташованих за її межами. При цьому, результат розв'язання задачі переносу теплоти відповідатиме умові найбільш інтенсивного охолодження даної обмеженої ділянки ґрунтового масиву.

Чисельне розв'язання нестационарної задачі теплопереносу в ґрунтовому масиві виявляється достатньо проблематичним внаслідок необхідності використання сітки з крупними кроками для задачі теплопереносу в ґрунтовому масиві і дрібної сітки для розрахунку течії та теплопереносу в каналі колектора. У зв'язку з цим для складання спрощеної розрахункової схеми застосовується ряд припущень. Реальна конфігурація горизонтального ґрунтового теплообмінника замінюється системою окремих трубчастих сегментів, розташованих один до іншого під прямим кутом (рис. 1). Осі зазначених сегментів вважаються паралельними горизонтальним осям координат. Вхід теплоносія в колектор і вихід з нього визначаються координатами точок перетину осей першого і останнього сегментів колектора з граничною площиною ($y = 0$), які мають значення $z = -h$; $x = x_{\text{вх}}$ (вхід) і $z = -h$; $x = x_{\text{вих}}$ (вихід).

Вважається, що течія теплоносія в каналі – ламінарна, а профіль її швидкості – параболічний у всіх його перетинах. Деформація профілю швидкості на ділянках поворотів каналу не враховується. Передбачається, що температура на зовнішній поверхні стінки циліндричного каналу рівномірно розподілена по периметрах кіл його нормальних перетинів і змінюється лише по довжині каналу, а профілі температури в каналі

– симетричні щодо його осі. Теплофізичні властивості теплоносія і ґрунту вважаються постійними [13].

Початкові умови для поставленої задачі задаються у вигляді $T_z(0, z, y, x) = T_0(0, z)$. Функція $T_0(0, z)$ характеризує розподіл температури по глибині ґрунтового масиву в момент початку експлуатації колектора ($\tau = 0$). Температура теплоносія в каналі колектора, а також температура його стінок при $\tau = 0$ вважаються такими, що дорівнюють температурі ґрунту на глибині $z = -h$ при $\tau = 0$. Рівняння теплопровідності для ґрунтового масиву (зовнішня задача) і рівняння теплопереносу в каналі (внутрішня задача) вирішуються окремо. Узгодження одержуваних рішень здійснюється шляхом задоволення умовам спряження, що задаються на внутрішній і зовнішній поверхнях стінок каналу.

Для чисельного розв'язання рівняння теплопереносу в ґрунтовому масиві (1) використовується різницева сітка, що складається з елементів у формі прямокутних паралелепіпедів зі змінними довжинами сторін. Вузли сітки розташовуються в центрах елементів. Форму, відмінну від зазначеної, мають елементи, що безпосередньо примикають до зовнішньої поверхні стінки каналу.

Результати досліджень. Нижче наводяться результати розрахунків температурного стану горизонтального ґрунтового колектора. На рис. 2 наведено результати розрахунку зміни у часі температури теплоносія на виході з колектора. Температура теплоносія на вході в колектор визначається з експерименту та задається, як вихідна умова для розв'язання задачі теплопереносу. Температура теплоносія на виході з колектора визначається розрахунковим шляхом за результатами чисельного розв'язання задачі переносу теплоти. Значення цієї температури порівнюються з даними експериментальних

Рис. 1. Горизонтальний переріз розрахункової області на глибині залягання ґрунтового колектора ($z = 1,65$ м).

Рис. 2. Зміна температури теплоносія на виході з колектора за період $\tau = 24 \dots 36$ годин:
точки – експеримент, суцільна лінія – розрахунок.

досліджень, що отримані за допомогою вимірювального комплексу. Як видно з рис. 2, результати розрахунків температури на виході з колектора задовільно узгоджуються з експериментальними даними. З цього можна зробити висновок, що дана модель працює адекватно і її можливо використовувати для розрахунків горизонтальних ґрунтових колекторів неглибокого залягання.

Значення теплового потоку Q , який надходить від ґрунтового масиву до теплоносія, також суттєво змінюється у часі. Його максимальне значення становить ~ 4 кВт.

На рис. 3 відображено розподіл температури в ґрунтовому масиві по його ширині при $z = -h$; $y = 17$ м. Мінімальні значення температури відповідають ділянкам, що безпосередньо примикають до труби колектора, а максимальні – ділянкам, що розташовані посередині між сусідніми петлями колектора. Найменше значення температури ґрунту – біля найближчої до вхідного перетину петлі колектора, де температура теплоносія – найнижча.

Температурне поле у вертикальному перерізі ґрунтового масиву представлено на рис. 4. Згідно рисунку, на глибині, де прокладено колектор, спостерігається суттєва деформація температурного поля ґрунтового масиву. При $z < 2,2$ вплив колектора на розподіл температури в масиві практично не відзначається.

Оцінка ефективності роботи горизонтального колектора може бути виконана за величиною лінійного коефіцієнта теплопередачі. Зазначена величина визначається з розв'язання представленої вище задачі в умовах стаціонарного теплообміну. Вважається, що температура теплоносія на вході в колектор – постійна у часі. Температура ґрунту на границях розрахункової області також постійна у часі і рівномірно розподілена по гранях розрахункової області. Лінійний коефіцієнт теплопередачі розраховується як відношення кількості теплоти, підведеної до теплоносія в ґрунті за одиницю часу, до довжини трубопроводу і різниці між температурою ґрунту на границі розрахункової області і температурою теплоносія на вході в колектор. Залежність зазначеної величини від витрати теплоносія і товщини стінок труби представлено на рис. 5. Як видно з графіків, лінійний коефіцієнт теплопередачі зростає зі збільшенням витрат теплоносія і зменшується зі збільшенням товщини стінки труби.

Висновки

Результати розрахунків за наведеною моделлю переносу теплоти, що описує роботу ґрунтового горизонтального колектора, задовільно узгоджуються з експериментальними даними. Це свідчить про можливість її використання для моделювання роботи горизонтальних ґрунтових теплообмінників подібної конструкції в

Рис. 3. Зміна температури в ґрунтовому масиві вздовж осі OX при $z = -1,65$ м; $y = 17$ м.

Рис. 4. Розподіл температури у вертикальному перерізі ґрунтового масиву, перпендикулярному осі OY ($y = 17$ м), в момент часу $\tau = 54$ години.

Рис. 5. Залежність лінійного коефіцієнта теплопередачі горизонтального ґрунтового колектора теплоти від витрати теплоносія і товщини стінки труби: 1 – $\delta = 1$ мм; 2 – $\delta = 2$ мм; 3 – $\delta = 3$ мм.

ґрунтах з різною геологією. За результатами чисельного моделювання встановлено вплив товщини стінки труби колектора і витрати теплоносія на його теплотехнічні характеристики. Цей вплив визначається за величиною лінійного коефіцієнта теплопередачі, який зростає зі збільшенням витрат теплоносія і зменшується зі збільшенням товщини стінки труби.

ЛІТЕРАТУРА

1. Долинский А. А., Басок Б. И., Накорчевский А. И., и др. Научно-технический центр теплонасосных технологий ИТТФ НАН Украины. Пром. теплотехника. 2011. Т. 33. № 7. С. 89–91.
2. G. Florides, S. Kalogirou. - Ground heat exchangers – a review of systems, models and applications. Renewable Energy. 2007. №32. P. 2461–2478.
3. Безродный М.К., Притула Н.А. Термодинамічна та енергетична ефективність теплонасосних схем теплопостачання: монографія. Київ: НТУУ «КПІ». 2016. 272с.
4. Мазуренко А.С., Климчук А.А., Юрковский С.Ю., Омеко Р.В. Разработка схемы комбинированной системы теплоснабжения с использованием сезонного аккумулирования тепла от гелиосистем. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. №8 (73). С. 17-20.
5. Карслоу Е. Теплопроводность твердых тел. Москва. 1964. 488 с.
6. Gauthier C., Lacroix M., Bernier H. Numerical simulation of soil heat exchanger-storage systems for greenhouse. Solar Energy. 1997. V.60. №6. P. 333-346.
7. Рабинович М.Д. Исследование солнечно-теплонасосных систем теплоснабжения с сезонным баком-аккумулятором на математических моделях. Пром. теплотехника. 2000. Т.22. №1. С. 85-90.
8. Bojic M., Papadocis G., Kyritsis S. Energy from a two-pipe carth-to-air heat exchanger. Energy 1999. V.24. P. 519-523.
9. Ollson S. The Sunclay and Kullavik projects heat storage in clay at low and high temperature. E.C. Conference on Solar Heating. Amsterdam, Netherlands. 1984. P. 894-898.
10. Wijsman A.I.Th.M., van Meurs. The Seasonal Heat Store in Groningen. E.C. Conference on Solar Heating. Amsterdam, Netherlands. 1984. P. 886-893.
11. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник. М.: Энергия. 1971. 560 с.
12. Басок Б.И., Давыденко Б.В., Лунина А.А. Численная модель температурного режима горизонтального ґрунтового колектора. Инженерно-физический журнал. 2012. Т. 85. №5. С. 1025–1036.
13. Басок Б.И., Воробйов Л.Й., Михайлик В.А., Лунина А.А. Теплофізичні властивості природного ґрунту. Пром. теплотехника. 2008. Т. 30. №4 С. 77-85.

UNSTEADY HEAT TRANSFER IN A HORIZONTAL GROUND HEAT EXCHANGER

Basok B.I., Davidenko B.V., Bozhko I.K., Moroz M.V.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Zhelyabova str., Kyiv, 03680, Ukraine<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.05>

The development and introduction of highly efficient heat pump systems of heat supply on the basis of renewable energy sources is becoming increasingly important in Ukraine. Two main types of ground heat exchangers are used for heat pump systems of heat supply. It is the horizontal or vertical orientation of heat exchanger.

There are number of problems for the experimental and numerical modeling of the operation of horizontal ground heat exchangers. The article presents an overview of the existing solutions to the problem and presents the results of calculations of the temperature state of the horizontal ground heat exchanger. The results of calculations describing the work of the horizontal ground heat exchanger are in satisfactory agreement with the experimental data. This indicates the possibility of their use for modeling the operation of horizontal ground heat exchangers of similar design in soils with different geologies.

Publication is based on the research provided by the grant support of the State Fund for Fundamental Research Ф83/99-2018.

References 13, figures 5.

Keywords: heat supply, horizontal ground heat exchanger, heat pump, heat storage.

1. Dolinskiy A. A., Basok B. I., Nakorchevskiy A. I. Nauchno-tehnicheskii tsentr teplonasosnykh tekhnologiy ITTF NAN Ukrainy. [Scientific and Technical Center of Heat Pump Technologies of the ITTF of the NAS of Ukraine.] Promyslova teplotekhnika [Industrial Heat Engineering] 2011. V. 33. № 7. p. 89–91. (Rus).

2. G. Florides, S. Kalogirou. Ground heat exchangers – a review of systems, models and applications. Renewable Energy. 2007. №32. P. 2461–2478.

3. Bezrodnyy M.K., Prytula N.A. Termodynamichna ta enerhetychna efektyvnist' teplonasosnykh skhem teplopostachannya: monohrafiya. [Thermodynamic and energy efficiency of heat pump heat supply circuits: monograph]. Kyiv: NTUU «KPI» [Kyiv: NTUU "KPI"] 2016. 272p. (Ukr.).

4. Mazurenko A.S., Klimchuk A.A., Yurkovskiy S.YU., Omeko R.V. Razrabotka skhemy kombinirovannoy sistemy teplosnabzheniya s ispol'zovaniyem sezonnoy akkumulirovaniya tepla ot geliosistem. [Development of a scheme for a combined heat supply system using seasonal accumulation of heat from solar systems.]. Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy [Eastern European Journal of Advanced Technology]. 2015. №8 (73). p. 17-20. (Rus).

5. Karslou Ye. Teploprovodnost' tverdykh tel. [Thermal conductivity of solids]. Moskva [Moscow]. 1964. 488 p. (Rus).

6. Gauthier C., Lacroix M., Bernier H. Numeral simulation of soil heat exchanger-storage systems for greenhouse. Solar Energy. 1997. V.60. №6. P. 333-346.

7. Rabinovich M.D. Issledovaniye solnechno-teplonasosnykh sistem teplosnabzheniya s sezonnym bakom-akkumulyatorom na matematicheskikh modelyakh. [Research of solar-heat pump systems of heat supply with a seasonal accumulator tank on mathematical models]. Promyslova teplotekhnika [Industrial Heat Engineering] 2000. V.22. №1. p. 85-90. (Rus).

8. Bojic M., Papadocis G., Kyritsis S. Energy from a two-pipe earth-to-air heat exchanger. Energy 1999. V.24. P. 519-523.

9. Ollson S. The Sunclay and Kullavik projects heat storage in clay at low and high temperature. E.C. Conference on Solar Heating. Amsterdam, Netherlands. 1984. P. 894-898.

10. Wijsman A.I.Th.M., van Meurs. The Seasonal Heat Store in Groningen. E.C. Conference on Solar Heating. Amsterdam, Netherlands. 1984. P. 886-893.

11. Lykov A.V. Teplomassoobmen: Spravochnik [Heat and mass transfer: Directory]. M.: Energiya [M.: Energia.] 1971. 560 p. (Rus).

12. Basok B.I., Davydenko B.V., Lunina A.A. Chislennaya model' temperaturnogo rezhima gorizontaln'nogo gruntovogo kollektora [Numerical model of the temperature regime of a horizontal ground collector]. Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal [Engineering and Physics Journal] 2012. V. 85. №5. p. 1025–1036. (Rus).

13. Basok B.I., Vorobyov L.Y., Mikhailik V.A., Lunina A.A. Teplofizychni vlastyvoli pryrodnoho gruntu. [Thermophysical properties of natural ground.]. Promyslova teplotekhnika [Industrial Heat Engineering] 2008. V. 30. №4 p. 77-85. (Ukr.)

Отримано 25.10.2018

Received 25.10.2018