

*А. Є. ДЕНИСОВА, П. О. ІВАНОВ*

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ГРУНТОВІЙ ТЕПЛОАСОСНІЙ СИСТЕМІ

В роботі виконано аналітичне дослідження ефективності роботи теплових насосів з використанням енергії ґрунту для систем теплопостачання з урахуванням кліматичних умов регіону експлуатації, що відповідає завданням енергозбереження і дозволяє зменшити викиди шкідливих речовин у навколишнє середовище. Основна увага приділяється підвищенню ефективності утилізації технічного потенціалу ґрунтового джерела енергії теплонасосною системою з використанням вертикальних ґрунтових теплообмінників. Запропоновано методику, яка базується на використанні апарату математичного моделювання як науково обґрунтованого інструментарію розрахунку нестационарних теплових процесів, здатного забезпечити стабільність і надійність роботи ґрунтової теплонасосної системи у короткостроковій і довгостроковій перспективі. Розроблений інструментарій розрахунку та аналізу процесів теплообміну дозволяє визначати потужність теплового потоку, що відводиться від ґрунту, з урахуванням зміни кліматичних факторів, розподілу температур у ґрунті навколо ґрунтової трубки і по її довжині протягом часу, схемно-конструктивних особливостей ґрунтових трубок для подальшої оптимізації параметрів теплонасосної системи. Встановлено, що потужність теплового потоку, який поступає до випарника теплового насоса від вертикальних ґрунтових трубок, залежить від ряду впливових факторів: режиму течії робочого тіла, що циркулює в ґрунтовому контурі; фізичних властивостей робочого тіла; кількості ґрунтових теплообмінників; розподілу температур в ґрунті навколо ґрунтової трубки по всій її довжині, що суттєво змінюється при довготривалій експлуатації системи, впливаючи на перебіг процесів теплообміну в елементах системи. Запропонована методика дозволяє виконувати числове моделювання теплових процесів в елементах теплового насоса, визначати енергетичну ефективність ґрунтової теплонасосної системи, яка здатна надійно забезпечувати споживачів теплою протягом довготривалого періоду роботи.

**Ключові слова:** ефективність, тепловий насос, нестационарні теплові процеси, поле температур, ґрунтові трубки, технічний потенціал енергії ґрунту.

*A. E. DENYSOVA, P. O. IVANOV*

## MATHEMATICAL MODELING OF NON-STATIONARY HEAT PROCESSES IN THE GROUND HEAT PUMP SYSTEM

In the work, an analytical study of the efficiency of heat pumps using soil energy for heating, taking into account the climatic conditions of the region of operation, is performed, which meets the tasks of energy saving and allows reducing emissions of harmful substances into the environment. The main attention is paid to increasing the efficiency of utilization of the technical potential of the soil energy source by the heat pump system using vertical soil heat exchangers. A methodology based on use of the mathematical modeling apparatus as a scientifically based toolkit for calculating non-stationary thermal processes, capable of ensuring the stability and reliability of the ground heat pump system in the short and long term, is proposed. The developed toolkit for calculation and analysis of heat exchange processes allows determining the power of the heat flow, which is removed from the soil, taking into account changes in climatic factors, temperature distribution in the soil around the soil tube and along its length over time, schematic and structural features of the soil tubes for further optimization of the parameters of the heat pump system. It was established that the power of the heat flow, which enters the evaporator of the heat pump from vertical soil pipes, depends on a number of influencing factors: the flow regime of the working fluid circulating in the soil circuit; physical properties of the working body; number of soil heat exchangers; temperature distribution in the soil around the soil tube along its entire length, which changes significantly during long-term operation of the system, affecting the course of heat exchange processes in the system elements. The proposed method makes it possible to perform numerical modeling of thermal processes in the elements of the heat pump, to determine the energy efficiency of the ground heat pump system, which is able to reliably provide consumers with heat during a long period of operation, which can be considered an innovative approach to the analysis of prospects for the development of heat pump heat supply.

**Key words:** efficiency, heat pump, non-stationary thermal processes, temperature field, soil pipes, technical potential of soil energy.

### Вступ.

Технології ґрунтових теплонасосних систем (ГТНС), які використовують ґрунтові природні ресурси, успішно працюють у всьому світі [1]. Ці системи використовують теплоту, що міститься на відносно невеликій глибині. Ґрунтові ресурси тепліші взимку і холодніші влітку, ніж зовнішнє повітря. Таким чином, ГТНС здатні забезпечити опалення взимку та охолодження влітку. Це децентралізовані системи теплопостачання, які мають ґрунтові теплообмінники (ГТО), які з'єднані з ґрунтовою поверхнею і забезпечують генерацію теплоти, холоду та гарячої води. ГТНС застосовуються в будівлях усіх видів, типів, розмірів і кількості у всьому світі, для будинків, шкіл, заводів, громадські та господарських споруди. Вказана технологія є одним із найшвидше зростаючих застосувань технологій відновлюваної енергії в усьому світі та, безперечно, є найшвидше зростаючим сегментом геотермальних

технологій. Ефективність роботи ґрунтової системи з застосуванням теплонасосного (ТН) циклу оцінюється коефіцієнтом перетворення ґрунтової енергії, для якого існує граничне значення, яке свідчить про ефективність використання енергії ґрунту для ТН [2].

Світову динаміку зростання у ГВт·рік встановленої потужності ГТНС наведено графіками (рис. 1, 2).

Темпи зростання встановленої потужності ГТНС мають експоненціальний характер. Протягом 1995 – 2010 рр. цей показник становив 19,4%, протягом 2010 – 2020 рр. – 8,5 % (рис. 1). Річні темпи зростання обсягів теплоти (рис. 2) у ПДж/рік від ГТНС протягом 1995 – 2010 рр. становили 17,4%, з 2010 по 2020 рр. – 11,0% [3].

© Денисова А.Є., Іванов П.О., 2023

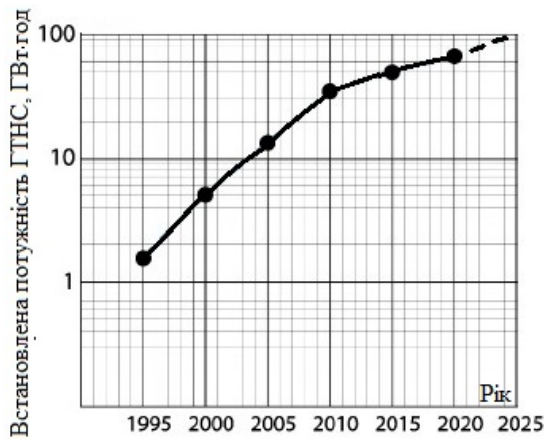


Рис. 1. Темпи глобального розвитку встановленої потужності ГТНС

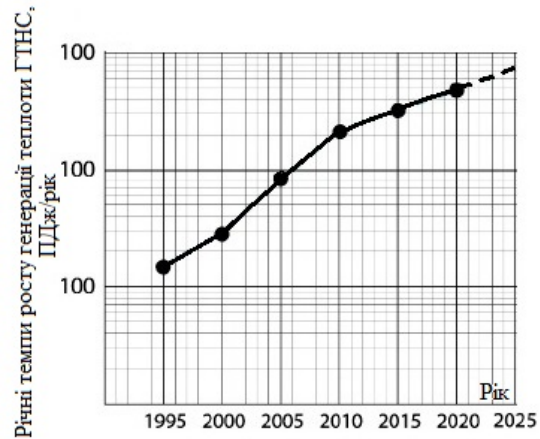


Рис. 2. Річні темпи росту генерації теплоти

Слід зауважити, що ГТНС у всьому світі є ефективними технологіями для утилізації енергії ґрунту. Відсоток використання ґрунтової і геотермальної енергії від усіх інших технологій (централізованого опалення приміщень, теплиць, ставків, басейнів і промислового використання) виявився менш значимим у 1995 р. – 13 %, хоча у 2020 р. збільшився до 59% (рис. 3) [4].

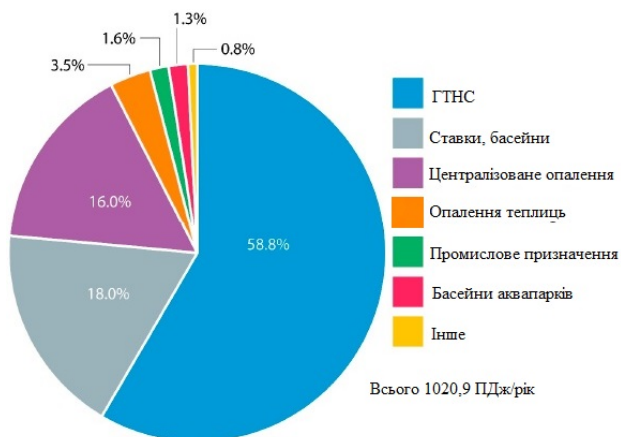


Рис. 3. Глобальне використання ґрунтової та геотермальної енергії у 2020 році

**Аналіз стану питання.** При використанні ГТНС мають бути враховані три виміри стійкості системи: екологічний, економічний і соціальний. Стійкість є метою багатьох областей науки і техніки. В нашому випадку термін стійкість ГТНС характеризує здатність системи задовольняти потреби споживачів без шкоди для навколишнього середовища, витримуючи зміни параметрів довкілля. Три виміри стійкості ГТНС, безумовно, важливі, але коли йдеться про використання ресурсів, постає питання про те, як довго вони можуть використовуватись. По відношенню до ґрунтових ресурсів, а особливо при використанні геотермальної енергії, сталість означає здатність системи підтримувати рівень виробництва енергії тривалий період. На відміну від мінеральних

ресурсів, які не відновлюються, геотермальні ресурси відновлюються як біомаса.

При цьому, надійна і стабільна робота системи є ключовою вимогою споживачів і вимагає науково обґрунтованих знань. Незважаючи, що світові розробки ключових засад стабільності виробництва ГТНС, існують, але необхідна впевненість в надійності роботи системи на основі теоретичних і експериментальних досліджень з урахуванням регіонального технічного потенціалу джерела енергії, з метою удосконалення стабільності і надійності постачання теплоти протягом тривалих періодів часу. Вказане необхідно для розвитку ринку впровадження ГТНС в Україні та світі.

Слід зауважити, що для опалення, гарячого водопостачання і кондиціонування житлових та громадських будівель нині використовується більше 40% видобувного викопного палива (нафта, газ, кам'яне вугілля), спалювання якого завдає суттєвої шкоди навколишньому середовищу, спричиняючи зміни клімату. Технічний потенціал ґрунтової енергії є альтернативою використання викопних палив. У зрівнянні з традиційними джерелами енергії очевидними є наступні переваги використання геотермальних ресурсів: невичерпність, регіональна доступність, близькість до споживача, можливість забезпечення споживача теплотою та електрикою, мала чисельність персоналу для видобутку геотермальної енергії, техніко-економічна доцільність, можливість будівництва установок малої потужності та екологічність.

У нашому дослідженні необхідним є використання методів математичного моделювання для розробки науково обґрунтованого інструментарію забезпечення надійної роботи ГТНС у короткостроковій і довгостроковій перспективі.

Використання математичних моделей дозволяє вести дослідження теплових процесів при незрівнянно менших витратах часу, ніж натурні випробування на реальному устаткуванні чи фізичних моделях.

**Мета.** Розробка математичної моделі нестационарних теплових процесів для підвищення надійності роботи теплонасосних систем з використанням енергії ґрунту у короткостроковій і довгостроковій перспективі

**Метод дослідження.** Перспективним шляхом підвищення ефективності роботи ГТНС є використання інструментарію математичного моделювання нестационарних процесів в ґрунтовому контурі теплового насосу, що дозволяє науково-обґрунтовано підходити до вибору шляхів та методів

удосконалення теплонасосної системи з утилізацією енергії ґрунту для цілей теплопостачання.

Схема ґрунтового контуру ГТНС з ґрунтовими вертикальними теплообмінниками коаксіального типу наведено на рис. 4, а, б). Нагріте в ГТ робоче тіло піднімається на ґрунтову поверхню і поступає в випарник ТН. При цьому, перебіг теплових процесів здійснюється найбільш ефективно в шарах ґрунту, які наближені до ґрунтових трубок (ГТ), а зі збільшенням відстані від ГТ інтенсивність процесів теплообміну зменшується.

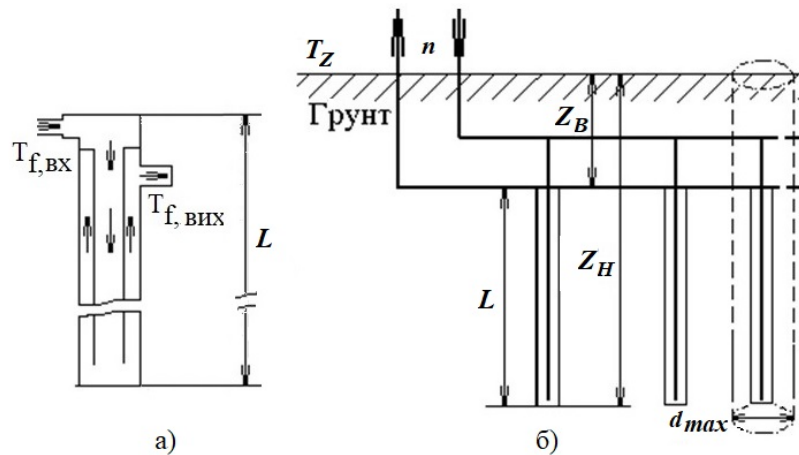


Рис. 4. Схема ґрунтових теплообмінників ГТНС:  
а – схема потоків робочого тіла ГТ; б – конфігурація системи з вертикальними ГТ

Для теплових процесів в ГС, де теплофізичні параметри суттєво змінюються у просторі та часі, для встановлення залежності між змінними величинами звертаються до методів математичної фізики, які відрізняються тим, що обмеженню підлягає просторово-часовий інтервал, в якому розглядається елементарний об'єм, де відбувається теплообмін [2]. Це дає можливість у межах обраного об'єму та елементарного відрізка часу знехтувати зміною деяких параметрів, які характеризують процес теплообміну [5, 6].

Оскільки процес теплообміну в ГТНС має нестационарний характер, задачею моделювання є визначення поля температур у ґрунті протягом часу роботи системи та рішення рівняння нестационарної теплопровідності [7]. Для рішення рівняння нестационарної теплопровідності в ґрунті розглянемо процес теплообміну, що відбувається на зовнішній границі циліндричної поверхні елементарного об'єму ґрунту навколо ГТ, з урахуванням крайових умов.

Для однорідного твердого тіла з постійними фізичними параметрами, без внутрішніх джерел теплоти, що характерно для нашого випадку, справедливим є диференціальне рівняння Фур'є, яке дозволяє визначити розподілення температур в довільній точці тіла при усталеному процесі в циліндричних координатах [8]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right], \quad (1)$$

де  $a$  – коефіцієнт температуропровідності,  $\text{m}^2/\text{s}$ .

Оскільки розподіл температур в ґрунті в початковий момент  $t_0 = 0$  залежить від глибини ґрунту  $z$ , початкові граничні умови становлять:

$$T(r, z, t) = T_0(z). \quad (2)$$

Для поверхні теплообміну елементарного об'єму ґрунту 1, який обмежений циліндричною поверхнею навколо ГТ 2 позначено (рис. 5), де:  $z_B$ ,  $z_H$  – глибина верхнього та нижнього торців циліндру;  $r_{max}$  – зовнішній радіус циліндру;  $r_0$  – внутрішній радіус циліндру на границі з ГТ.

Граничні умови, що відносяться до верхнього та нижнього торців циліндричного об'єму ґрунту, відповідають граничним умовам першого роду або задачі Діріхле, рішення якої дозволяє знайти температуру всередині тіла в довільний момент часу за відомим розподіленням температур на його поверхні.

Припускаючи, що нижній торець елементарного циліндру на глибині  $z = z_H$ , по відношенню до розподілення температур всередині виділеного циліндру протягом певного часу є ізотермічною поверхнею, то ГТ на нього не здійснює суттєвого впливу.

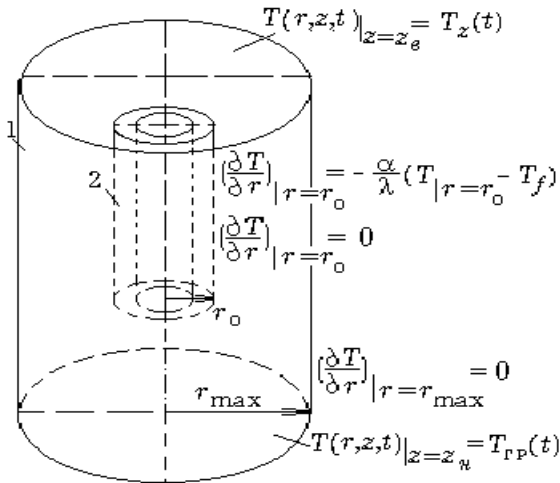


Рис. 5. Елементарний об'єм ґрунту навколо ГТ  
1 – об'єм ґрунту; 2 – ґрунтова трубка

Тоді гранична умова першого роду при температурі  $T_H(t)$  нижнього торця ґрунту, яку можна визначити в початковий момент для  $0 \leq r \leq r_{max}$  за формулою:

$$T(r, z, t)|_{z=z_H} = T_H(t). \quad (3)$$

Верхній торець циліндру навколо ГТ, який міститься на поверхні ґрунту ( $z = z_B$ ), є ізотермічною поверхнею. Його температура відповідає температурі навколишнього повітря, яка, в свою чергу, визначається кліматичними умовами регіону. Гранична умова першого роду для температури на верхній горизонтальній поверхні для  $0 \leq r \leq r_{max}$  буде:

$$T(r, z, t)|_{z=z_B} = T_Z(t). \quad (4)$$

На поле температур внутрішньої бокової поверхні циліндру ґрунту вздовж вертикальної осі, здійснює вплив ГТ. Зовнішня і внутрішня поверхні трубки є коаксіальними відносно одна одній та містяться всередині елементарного циліндру ґрунту. Крім того, зовнішню поверхню ГТ будемо вважати адіабатичною. Тоді в довільний момент часу у кожній точці поверхні ГТ, що знаходиться по нормалі до її поверхні, густина теплового потоку та похідна температури дорівнюють нулю.

Гранична умова щодо температури бокової поверхні ГТ відповідає другій крайовій задачі (задачі Неймана), що є граничною умовою другого роду за умови  $z_B \leq z \leq z_H$ :

$$\frac{\partial T}{\partial r} |_{r=r_{max}} = 0. \quad (5)$$

Гранична умова для внутрішньої бокової поверхні елементарного ґрунтового циліндру на границі системи “теплоносій-ґрунт” буде

змінюватись в залежності від наявності чи відсутності відбору тепла від ґрунту.

В першому випадку (при наявності відбору теплоти від ґрунту), тепловий потік від ґрунту з температурою  $T|_{r=r_0}$  передається теплоносію, що циркулює в ГТ, температура якого  $T_f$ . З урахуванням закону збереження енергії потік теплоти, що підводиться до системи теплопровідністю, дорівнює потоку теплоти, що відводиться від системи конвекцією [7, 8]. В цьому випадку теплообмін між поверхнею твердого тіла та рідиною описується рівнянням Ньютона–Ріхмана, а теплообмін на боковій границі ґрунту відбувається шляхом теплопровідності та описується рівнянням Фур'є [8, 9]. Гранична умова для внутрішньої бокової поверхні елементарного об'єму ґрунту на границі з ГТ, в якій рухається теплоносій, є граничною умовою третього роду, що враховує рівність потоків тепла на границі системи “теплоносій-ґрунт”.

Граничну умову третього роду, для першого випадку, можна записати для  $z_B \leq z \leq z_H$  так:

$$\frac{\partial T}{\partial r} |_{r=r_0} = -\frac{\alpha}{\lambda} [T|_{r=r_0} - T_f], \quad (6)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К).

Другий випадок (відбір теплоти від ґрунту відсутній) спостерігається, коли циркуляція теплоносія в трубках ГТ відсутня, тобто досягнута теплова рівновага між ГТ та ґрунтом. Як наслідок внутрішня бокова поверхня елементарного об'єму ґрунту на границі системи “теплоносій-ґрунт” є адіабатичною, а потік теплоти, що відводиться від вказаної поверхні, дорівнює нулю.

Гранична умова в цьому випадку відповідає другому роду, що при  $z_B \leq z \leq z_H$  набуває вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial r} |_{r=r_0} = 0. \quad (7)$$

В безпосередньому наближенні до ГТ процес теплообміну характеризується найбільшою інтенсивністю, а зі збільшенням відстані від ГТ вздовж радіуса  $r$  елементарного циліндру навколо ґрунтової трубки його інтенсивність зменшується.

Представимо елементарний крок  $dx$  вздовж радіуса елементарного циліндра ґрунту навколо ГТ (при  $r > r_0$ ), що співпадає з напрямком вздовж осі  $x$  в логарифмічному вигляді, бо логарифмічна форма є зручною для подальших обчислень:

$$x = \ln r, \quad (8)$$

звідки одержимо:

$$dx = dr / r. \quad (9)$$

Якщо координату  $r_0$  на внутрішній поверхні елементарного циліндру замінити координатою  $x_0$ , а координату  $r_{max}$  на зовнішній його поверхні замінити координатою  $x_{max}$ , то з урахуванням (9) одержимо:

$$x_{max} - x_0 = \int_{r_0}^{r_{max}} \left(\frac{dr}{r}\right) = \ln(r_{max} - r_0) \quad (10)$$

З урахуванням співвідношень (7) та (10), після перетворень диференційного рівняння (1), одержимо диференційне рівняння нестационарної теплопровідності в ґрунті для інтервалу  $x_0 \leq x \leq x_{max}$ , яке можна використовувати для визначення поля температур в елементарному об'ємі ґрунту навколо ГТ чисельними методами.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{a}{r^2} \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right] + a \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right]. \quad (11)$$

Слід зауважити, що при логарифмічній формі представлення радіусу циліндра  $r$ , гранична умова другого роду, яка представлена рівнянням (5), декілька зміниться, а граничні умови, що представлені рівняннями (2 – 4), не зміняться.

Гранична умова другого роду (5), з урахуванням рівняння (9), на зовнішній вертикальній боковій поверхні циліндру ґрунту навколо ГТ для глибини, яка змінюється у межах  $z_B \leq z \leq z_H$ , набуває вигляд:

$$\frac{1}{r_{max}} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_{max}} = \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_{max}} = 0 \quad (12)$$

Аналогічно, гранична умова третього роду (6) на вертикальній внутрішній боковій поверхні елементарного циліндру на границі системи “ґрунт-теплоносій” в інтервалі  $z_B \leq z \leq z_H$ , набуває вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_0} = -\frac{\alpha \cdot r_0}{\lambda} [T \Big|_{x=x_0} - T_f]. \quad (13)$$

Гранична умова з урахуванням формули (7) для інтервалу  $z_B \leq z \leq z_H$  буде:

$$\frac{1}{r_0} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_0} = \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_0} = 0. \quad (14)$$

Оскільки задачі теплопровідності вирішити аналітично не вдається, їх вирішують числовими методами [7 – 9].

**Результати досліджень.**

Одним з найбільш ефективних числових методів рішення задач теплопровідності є метод кінцевих різниць або метод сітки [8]. При використанні методу кінцевих різниць в елементарному циліндричному об'ємі ґрунту представляється у вигляді сітки з розмірами комірок  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ .

Виконаємо апроксимацію частинних похідних, що входять до диференційного рівняння теплопровідності (11) та граничних умов (2 – 4),

кінцевими різницями, записаними для точок, що знаходяться в вузлах сітки, з урахуванням рівнянь (12 – 14), де поточне значення координати представлено в логарифмічному вигляді.

Диференційне рівняння теплопровідності у формі кінцевих різниць, що пов'язує значення шуканої функції температури, представлена у дискретній формі, з координатами вузлів просторово-часової сітки (рис. 6), дозволяє вирішити задачу нестационарної теплопровідності в елементарному циліндричному об'ємі ґрунту навколо ґрунтової трубки.

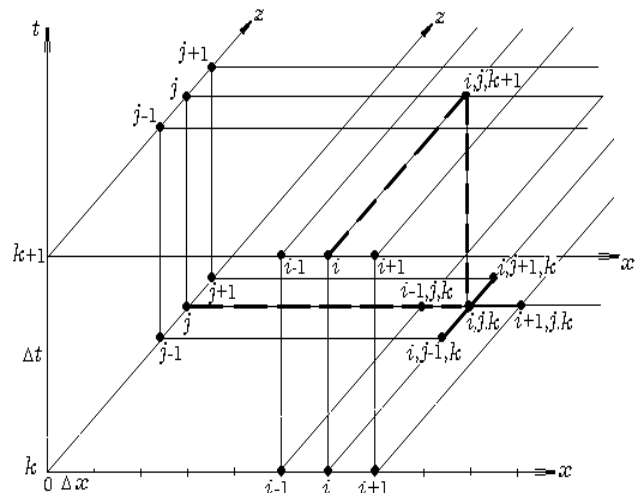


Рис. 6. Елементарний об'єм ґрунту у вигляді просторово-часової сітки

З урахуванням рівняння (10) крок сітки  $\Delta x_i$  відповідає  $\Delta r_i$ , а дискретні змінні величини  $r(i)$  та  $x(i)$  взаємозалежні. Відстань до внутрішньої границі циліндру ґрунту навколо ГТ вздовж координатної осі  $x_0$  (відповідає  $r_0$ ), а також до зовнішньої границі циліндру  $x_{max}$  (відповідає  $r_{max}$ ) можна визначити за рівнянням (10).

Постійний крок  $\Delta x$  між вузлами просторово-часової сітки при кількості вузлів  $n$  на осі  $x$ :

$$\Delta x = \frac{\ln(r_{max}/r_0)}{n-1}. \quad (15)$$

Поточна відстань між внутрішньою та зовнішньою границями становить:

$$x(i) - x_0 = \ln \left[ \frac{r(i)}{r_0} \right]. \quad (16)$$

Змінну  $r(i)$  в функції  $x$  можна представити залежністю:

$$r(i) = r_0 \cdot \exp[x(i) - x_0]. \quad (17)$$

При цьому:



$$x(i) - x - (i - 1) \cdot \Delta x. \quad (18)$$

Для довільного вузла просторово-часової сітки з координатами  $(i, j)$ , з урахуванням логарифмічної трансформації осі, для довільного моменту часу  $t$ , що в сітці відповідає вузлу з координатою  $(k+1)$ , рівняння буде мати вигляд:

$$\frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^k}{\Delta t} = \frac{\alpha}{r(i)^2} \left( \frac{T_{i,j-1}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i,j+1}^k}{\Delta x^2} \right) + \alpha \left( \frac{T_{i-1,j}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i+1,j}^k}{\Delta z^2} \right). \quad (19)$$

Звідки температура  $T_{i,j}^{k+1}$  (20) в поточний момент часу  $(k+1)$  у вузлі  $(i, j)$  в функції температури в попередній момент часу  $(k)$  у вузлах сітки з відповідними координатами:

$$T_{i,j}^{k+1} = \alpha \Delta t \left[ \frac{1}{\Delta x^2} \frac{1}{r(i)^2} (T_{i,j-1}^k + T_{i,j+1}^k - 2T_{i,j}^k) + \frac{1}{\Delta z^2} (T_{i-1,j}^k + T_{i+1,j}^k - 2T_{i,j}^k) \right] + T_{i,j}^k$$

Граничні температури на торцях елементарного циліндру ґрунту при  $i = 1, \dots, n$ :

$$T_{i,j}^{k+1} = T_{Tz}. \quad (21)$$

Гранична умова для відстані  $z$  між початком проекції координатної осі у вузлі  $j=1$ , що лежить на нижній горизонтальній торцевій поверхні, та її кінцем в вузлі сітки  $j = m$ , для  $j = 1, \dots, m$ :

$$z = \Delta z(m - j). \quad (22)$$

Гранична умова для температури  $T_z$  (рис. 5) на верхньому горизонтальному ізотермічному торці елементарного циліндру ґрунту має вигляд:

$$T_{i,m}^{k+1} = T_z. \quad (23)$$

Перейдемо до представлення функції температури у відповідних вузлах сітки, що лежать на внутрішній та зовнішній бокових границях елементарного циліндру ґрунту, у вигляді розкладення в ряд Тейлора зблизь відповідних вузлів. Так, для внутрішньої границі, тобто при  $x = x_0$ , представимо функцію температури  $T(x, z)$  у вигляді розкладення в ряд Тейлора зблизь вузла з координатою  $i = 1$  вздовж осі  $x$ , а саме у вузлах, які мають координати  $i = 2$  та  $i = 3$ . Для цих вузлів одержимо відповідні рівняння, до складу яких входить друга похідна температури:

### Висновки.

Запропонована методика оцінки ефективності використання теплового насосу на базі енергії ґрунту дозволяє розрахувати параметри, які впливають на енергетичні показники ґрунтової теплонасосної системи теплозабезпечення.

Розроблена методика розрахунку та аналізу нестационарних процесів теплообміну в ґрунтовому

контурі теплонасосної системи дозволяє визначати потужність теплового потоку, що відводиться від ґрунту, з урахуванням: зміни кліматичних факторів, розподілу температур у ґрунті навколо вертикальної ґрунтової трубки та по довжині ГТ протягом часу, схемно-конструктивних особливостей ГТ для подальшої оптимізації параметрів ГТНС та режимів її роботи.

Запропонована математична модель нестационарного теплообміну є зручною для числового моделювання потужності змінного теплового потоку, що надходить до випарника теплового насоса від вертикальних ґрунтових трубок в процесі експлуатації системи.

Встановлено, що потужність теплового потоку залежить від ряду впливових факторів, а саме, від режиму течії робочої рідини, що циркулює в ґрунтовому теплообмінному контурі, від фізичних властивостей робочого тіла ГТ, кількості ґрунтових трубок, від розподілу температур в ґрунті навколо ГТ і вздовж ГТ, які змінюються при доготівальній експлуатації ГТНС, впливаючи суттєво на перебіг процесів теплообміну у всіх елементах системи. Оскільки вказані впливові чинники визначають температурний потенціал робочої рідини ГТ, від якого залежить температура теплоносія на виході з ґрунтових трубок та на вході до випарника ГТНС, відповідно.

Методика визначення температури теплоносія на виході з ґрунтового теплообмінника є підґрунтям для виконання подальшого числового моделювання і аналізу теплових процесів в складових елементах теплового насоса для оптимізації параметрів ГТНС.

Таким чином, запропонована методика є науково-обґрунтованим інструментарієм оцінки надійності і ефективності використання теплонасосної системи з утилізацією ґрунтової енергії, що дозволяє визначати всі параметри, які впливають на енергетичні параметри ГТНС.

### Список літератури

1. Rybach, L. Global Status, Development and Prospects of Shallow and Deep Geothermal Energy. *Int. J. Terr. Heat Flow Appl. Geotherm.* 2022, 5, 20–25.
2. Denysova A.E., Klymchuk O.A., Ivanova L.V., Zhaivoron O.S. Energy Efficiency of Heat Pumps Heating Systems at Subsoil Waters for South-East Regions of Europe // *Problemele energeticii regionale*, 2020, 4 (48), pp. 78–89. <https://journal.ie.asm.md/ru/contents/electronmi-jurnal-448-2020>
3. Rybach, L. Shallow Systems – Geothermal Heat Pumps. In *Comprehensive Renewable Energy*, 2nd ed.; Letcher, T.M., Ed.; Elsevier: Oxford, UK, 2022; pp. 197–219.
4. Lund, J.; Toth, A. Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review. In *Proceedings of the World Geothermal Congress 2020, Reykjavik, Iceland, 24–27 October 2021*.
5. Perestuk M.O., Marinets B.B. *Teoria ravnian matematychnoi fizyky.* – Kyiv: Lybid, 2006.–421 p.

6. Marinets B.B, Rego B.J., Marinets K.B. Teoria kraiovykh zadach dlia zvychnykh dyferencialnykh rivnian: Navchalnyi posibnyk. – Ugrod: UGNU «Goverla», 2013. – 196 p. <https://www.uzhnu.edu.ua/uk/infocentre/get/27991>
7. Konstantinov S.M. Teploobmin [Text]: Textbook dlia studentiv VTNZ. – K.: VPI BPK «Politehnika», Inres, 2005. – 304 p. <http://pdf.lib.vntu.edu.ua>
8. Kulinchenko V.R. Teploperedacha z elementami masoobminu (teoria i praktyka procesu) [Text]: textbook dlia studentiv VNZ / V.R. Kulinchenko, O.Yu. Shevchenko, B.A. Piddubnyi; za red. prof. Kulinchenko V.R.; Nat. univ kharch. tehnologii. – Kyiv: Feniks, 2014. – 918 p. [https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fbteg/kulinchenko\\_teplooper/3.htm](https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fbteg/kulinchenko_teplooper/3.htm)
9. Bashlii S.V., Moseiko Yu.V. Osnovy rozrakhunkiv teplomasoobminnykh procesiv: Navchalnyi posibnyk. – Zapogiggia: ZDIA, 2012. – 192 p. <https://studfile.net/preview/4193930/>
3. Rybach, L. Shallow Systems – Geothermal Heat Pumps. In Comprehensive Renewable Energy, 2nd ed.; Letcher, T.M., Ed.; Elsevier: Oxford, UK, 2022; pp. 197–219.
4. Lund, J.; Toth, A. Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review. In Proceedings of the World Geothermal Congress 2020, Reykjavik, Iceland, 24–27 October 2021.
5. Perestuk M.O., Marinets B.B. Teoria ravnian matematychnoi fizyky.– Kyiv: Lybid, 2006.–421 p.
6. Marinets B.B, Rego B.J., Marinets K.B. Teoria kraiovykh zadach dlia zvychnykh dyferencialnykh rivnian: Navchalnyi posibnyk. – Ugrod: UGNU «Goverla», 2013. – 196 p. <https://www.uzhnu.edu.ua/uk/infocentre/get/27991>
7. Konstantinov S.M. Teploobmin [Text]: Textbook dlia studentiv VTNZ. – K.: VPI BPK «Politehnika», Inres, 2005. – 304 p. <http://pdf.lib.vntu.edu.ua>
8. Kulinchenko V.R. Teploperedacha z elementami masoobminu (teoria i praktyka procesu) [Text]: textbook dlia studentiv VNZ / V.R. Kulinchenko, O.Yu. Shevchenko, B.A. Piddubnyi; za red. prof. Kulinchenko V.R.; Nat. univ kharch. tehnologii. – Kyiv: Feniks, 2014. – 918 p. [https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fbteg/kulinchenko\\_teplooper/3.htm](https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fbteg/kulinchenko_teplooper/3.htm)
9. Bashlii S.V., Moseiko Yu.V. Osnovy rozrakhunkiv teplomasoobminnykh procesiv: Navchalnyi posibnyk. – Zapogiggia: ZDIA, 2012. – 192 p. <https://studfile.net/preview/4193930/>

#### References (transliterated)

1. Rybach, L. Global Status, Development and Prospects of Shallow and Deep Geothermal Energy. Int. J. Terr. Heat Flow Appl.Geotherm. 2022, 5, 20–25.
2. Denysova A.E., Klymchuk O.A., Ivanova L.V., Zhaivoron O.S. Energy Efficiency of Heat Pumps Heating Systems at Subsoil Waters for South-East Regions of Europe //Problemele energeticii regionale, 2020, 4 (48), pp. 78–89. <https://journal.ie.asm.md/ru/contents/electronni-jurnal-448-2020>
3. Rybach, L. Shallow Systems – Geothermal Heat Pumps. In Comprehensive Renewable Energy, 2nd ed.; Letcher, T.M., Ed.; Elsevier: Oxford, UK, 2022; pp. 197–219.
4. Lund, J.; Toth, A. Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review. In Proceedings of the World Geothermal Congress 2020, Reykjavik, Iceland, 24–27 October 2021.
5. Perestuk M.O., Marinets B.B. Teoria ravnian matematychnoi fizyky.– Kyiv: Lybid, 2006.–421 p.
6. Marinets B.B, Rego B.J., Marinets K.B. Teoria kraiovykh zadach dlia zvychnykh dyferencialnykh rivnian: Navchalnyi posibnyk. – Ugrod: UGNU «Goverla», 2013. – 196 p. <https://www.uzhnu.edu.ua/uk/infocentre/get/27991>
7. Konstantinov S.M. Teploobmin [Text]: Textbook dlia studentiv VTNZ. – K.: VPI BPK «Politehnika», Inres, 2005. – 304 p. <http://pdf.lib.vntu.edu.ua>
8. Kulinchenko V.R. Teploperedacha z elementami masoobminu (teoria i praktyka procesu) [Text]: textbook dlia studentiv VNZ / V.R. Kulinchenko, O.Yu. Shevchenko, B.A. Piddubnyi; za red. prof. Kulinchenko V.R.; Nat. univ kharch. tehnologii. – Kyiv: Feniks, 2014. – 918 p. [https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fbteg/kulinchenko\\_teplooper/3.htm](https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fbteg/kulinchenko_teplooper/3.htm)
9. Bashlii S.V., Moseiko Yu.V. Osnovy rozrakhunkiv teplomasoobminnykh procesiv: Navchalnyi posibnyk. – Zapogiggia: ZDIA, 2012. – 192 p. <https://studfile.net/preview/4193930/>

Надійшла (received) 19.10.2023

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Денисова Алла Євсївна (Денисова Алла Евсеевна, Denysova Alla Evsiivna)** – доктор технічних наук, професор, Національний університет Одеська політехніка, професор кафедри теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики, директор Українсько-польського інституту; м. Одеса, Україна;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3906-3960>; Scopus Author ID: 57193405766,  
e-mail: [alladenysova@gmail.com](mailto:alladenysova@gmail.com)

**Іванов Павло Олександрович (Иванов Павел Александрович, Ivanov Pavlo Oleksandrovych)** – аспірант кафедри теплових електричних станцій та енергозберігаючих технологій Національний університет Одеська політехніка, м. Одеса, Україна,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8897-0222>,  
e-mail: [7873780@ukr.net](mailto:7873780@ukr.net)