

О. В. Зур'ян<sup>1</sup>  
Г. О. Четверик<sup>1</sup>

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ ҐРУНТУ НА ГЛИБИНІ ВИЩЕ НЕЙТРАЛЬНОГО ШАРУ

<sup>1</sup>Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ

У процесі вирішення завдань ґрунтового акумулювання й вилучення теплоти з приповерхневих шарів Землі, виникає потреба отримати інформацію щодо глибини річних змін температури у ґрунті, яка визначає шар земної поверхні, що активно взаємодіє з навколоземною атмосферою. У холодну пору року температура в ній падає, а в теплу — підвищується. Відомо, що ефективність теплонасосної системи залежить як від різниці температур на виході з конденсатора теплового насоса та вході в його випарник, так і стабільністю температури джерела теплової енергії. Температура на вході у випарник теплового насоса визначається температурою ґрунту в місці встановлення колектора теплової енергії. Найбільшої ефективності досягають теплонасосні системи з колекторами, встановленими нижче нейтрального шару, температура якого стала і дорівнює середньорічній температурі ґрунту певної місцевості.

На геотермальному полігоні Інституту відновлюваної енергетики НАН України проведено експериментальні дослідження змін температури ґрунту в місцях установа вертикальних ґрунтових теплообмінників (колекторів). Описана методика проведення досліджень. Наведено характеристики вимірювального обладнання, встановленого на експериментальній установці, і програмного забезпечення, яке використовувалося для архівування і візуалізації даних, отриманих в процесі проведення досліджень. Визначена глибина нейтрального шару та обґрунтовані отримані залежності зміни температури від глибини з урахуванням температури навколишнього середовища та інших факторів екзогенного впливу.

Запропоновано математичну модель, яка дає змогу визначати температуру ґрунту  $T(z, t)$  залежно від глибини  $z \geq 0$  і часу  $t \geq 0$  за умов, що задано зміну температури поверхні ґрунту або зовнішнього повітря з часом з урахуванням припущення, що температура ґрунту не залежить від координати  $(x, y)$  і теплофізичні властивості ґрунту не змінюються з координатами  $(x, y, z)$  з часом. На основі математичної моделі отримані розрахункові дані та побудовані графіки залежності  $T(z, t)$  від глибини за добу та за рік. Визначено глибину нейтрального шару.

Як результат виконання науково-дослідної роботи експериментальні дані щодо термічного режиму ґрунту на геотермальному полігоні ІВЕ НАНУ корелюють з результатами, отриманими під час математичного моделювання. Глибина  $h$  річних змін температур у ґрунті, яка визначає шар земної поверхні, що активно взаємодіє з атмосферою Землі, в обох випадках знаходиться на позначці 15 м.

У ході проведеного дослідження підтверджено закономірності сезонної зміни температур у верхніх шарах Землі. Аналіз отриманих даних показав, що необхідно враховувати зміни температур ґрунту протягом року під час вирішення завдань акумулювання та вилучення теплоти геотермальними теплонасосними системами. Отримані теоретичні та практичні результати дозволяють оптимізувати побудову геотермальних систем. Мають перспективу подальші дослідження впливу геологічних, гідрогеологічних морфологічних та антропогенних умов на девіацію температури нижче нейтрального шару, та їхній вплив на ефективність роботи геотермальних теплонасосних систем.

**Ключові слова:** відновлювані джерела енергії, геотермальна енергетика, теплота ґрунту, нейтральний шар, геотермальна теплонасосна система.

### Вступ

Створення ефективних систем використання низькотемпературних джерел теплової енергії є важливою задачею для енергетики, промисловості, транспорту та армії. Основним джерелом всіх видів відновлюваної енергетики є Сонце. Якщо говорити про теплову форму сонячної енергії, то

можливі різні варіанти її використання, наприклад, за допомогою спеціальних пристроїв — сонячних колекторів або шляхом вилучення безпосередньо з верхніх шарів ґрунту. У першому випадку відбувається пряма дія випромінювання на приймач, а в другому — інтегральна дія радіації у формі, акумульованій у ґрунті енергії. Одним з високоєфективних пристроїв перетворення низькопотенційної відновлюваної енергії приповерхневих шарів Землі є теплові насоси. Для отримання необхідної первинної енергії для роботи теплового насоса використовуються системи відбору низькопотенціальної теплової енергії, які складаються з теплообмінника, встановленого горизонтально або вертикально в ґрунт, в якому по замкнутому контуру циркулює теплоносія. Ефективність роботи теплонасосної системи залежить від температури на виході з конденсатора теплового насоса та вході у його випарник. Як що температура на виході з конденсатора регулюється в залежності від навантаження та визначається комфортними умовами перебування людей, роботи техніки та технологічних процесів, то температура на вході в випарник визначається природнім джерелом відновлюваної енергії і може мати девіації які обумовлені його нестабільністю. Тому важливим є забезпечити постійну температуру теплоносія на вході до теплового насоса протягом часу його роботи. Це зазвичай можна досягнути у випадку, коли колектор заглиблено нижче нейтрального шару, у якому немає добових і сезонних коливань температури. Коли за певних технічних умов відбір теплової енергії з ґрунту, нижче нейтрального шару неможливий, актуальним є прогнозування величини коливань температури природного джерела. Практичне значення моделі, за якою можна прогнозувати величину коливань температури ґрунту в місці встановлення колектора теплового насоса, полягає в тому, що під час проектування даних систем можна заздалегідь визначити ефективність теплонасосної системи в конкретному місці монтажу за наперед заданих вхідних параметрів.

Науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи з підвищення ефективності теплових насосів проводяться як в Україні, так і у світі вже тривалий час. Перспективи застосування теплових насосів досліджені в роботах [1]—[3]. Аналіз ефективності використання теплового потенціалу доквілля та верхніх шарів Землі подано в роботах [4], [5]. В роботах [6]—[8] оцінено ефективність теплових насосів різних типів. Авторами [9], [10] проведено порівняльний енергетичний аналіз теплових насосів. Запропоновано математичну модель та наведені розрахунки теплообміну під час руху геотермального теплоносія у свердловині роботі в [11]. В дослідженні [12], пропонується новий підхід до вивчення стаціонарних енергетичних характеристик вертикальних геотермальних системи. Методологія для оцінки швидкості поглинання тепла ґрунту ґрунтовими теплообмінниками та продуктивність труби як ґрунтового теплообмінника в ґрунтовому тепловому насосі розглянуто в роботах [13], [14].

*Метою роботи* є визначення ефективності роботи геотермальної теплонасосної системи від глибини встановлення геотермального теплообмінника на основі проведених експериментальних досліджень зміни температури ґрунту на глибині вище нейтрального шару та математичного моделювання для визначення температури ґрунту  $T(z, t)$ .

Відповідно до поставленої мети дослідження мають бути вирішені такі завдання:

1. Розробити методіку, провести експериментальні дослідження та проаналізувати отримані дані змін температури ґрунту за глибиною та місцем установки вертикальних ґрунтових теплообмінників (колекторів).

2. Запропонувати математичну модель, яка дає змогу визначати температуру ґрунту  $T(z, t)$  залежно від глибини  $z \geq 0$  і часу  $t \geq 0$  за умови, що задано зміну температури поверхні ґрунту або зовнішнього повітря з часом з урахуванням припущення, що температура ґрунту не залежить від координати  $(x, y)$  і теплофізичні властивості ґрунту не змінюються з координатами  $(x, y, z)$  з часом. На основі математичної моделі отримати розрахункові дані та побудувати графіки залежності  $T(z, t)$  від глибини за добу, та за рік. Визначити глибину нейтрального шару.

3. Провести порівняльний аналіз отриманих експериментальних даних з розрахунковими.

4. Визначити відсоток падіння ефективності гідротермальної теплонасосної системи за нестабільних вхідних параметрів, пов'язаних з перепадами температури на вході до випарника теплонасосної системи.

5. Визначити подальші перспективні дослідження щодо залежності ефективності роботи геотермальних ТНУ від напрямку та інтенсивності фільтрації підземних вод та щільності й водопроникності ґрунту.

## Результати дослідження

Для проведення досліджень в Інституті відновлюваної енергетики НАН України (ІВЕ НАНУ) збудовано геотермальний полігон, на якому пробурені п'ять свердловин з різною глибиною та діаметром. Вони можуть використовуватися як для видобування низькопотенційної теплової енергії з ґрунту та води з водоносного горизонту для опалення та кондиціювання приміщень інституту, так і для проведення досліджень в залежності від поставлених завдань. Спеціальним чином змонтовані низькопотенціальні теплові мережі, що поєднують свердловини, теплові насоси та системи накопичення теплової енергії дають змогу моделювати різноманітні теплотехнічні системи для проведення досліджень.

В експериментальних дослідженнях задіяно свердловину № 1 глибиною 50 метрів та зібрано дві спеціальні вимірювальні коси. Перша коса, довжиною 25 метрів, опущена в свердловину. На ній розташовані температурні датчики на глибині 2,00 м, 5,00 м, 15,00 м, 25,00 м. Другу косу з розташованими на ній температурними датчиками, що відповідають глибині 0,02 м, 0,30 м, 0,70 м та 1,20 м на дерев'яній жердині окремо заглиблено вертикально у ґрунт на глибину 1,2 м.

Для вимірювань температури в контрольних точках використовувалися температурні датчики (термоперетворювачі опору) ТСП-204. Термоперетворювачі опору ТСП-204 внесені до Державного реєстру засобів вимірювальної техніки України, за номером У246-07. Робочий діапазон вимірюваних температур від  $-40$  до  $+270$  °С, показник теплової інерції — не більше 6 с, клас допуску 1, тип Т, максимально можлива похибка —  $0,5$  °С або  $0,004$  ( $t$ ).

З урахуванням особливих умов проведення вимірювань у свердловині (підвищена вологість і велика глибина) та необхідності розміщення до чотирьох пар датчиків на одній косі використано провід з вісьмома жилами та металевим екраном типу  $4 \times 2 \times 0,51$  (SF/UTP-cat.5E). Також місця можливого контакту проводу вологою ізольовано в гумований кожух, а місця пайки контактів датчика температури (термоперетворювача опору) залито епоксидною смолою.

Для збору даних з вимірювальних пристроїв використано контролер MAXYCON FLEXY приєднаний до персонального комп'ютера через шлюз USB і RS-485, призначений для приймання, перетворення й передавання цифрової інформації між цифровими лініями по інтерфейсу RS-485 та за протоколом Modbus-RTU (рис. 1).

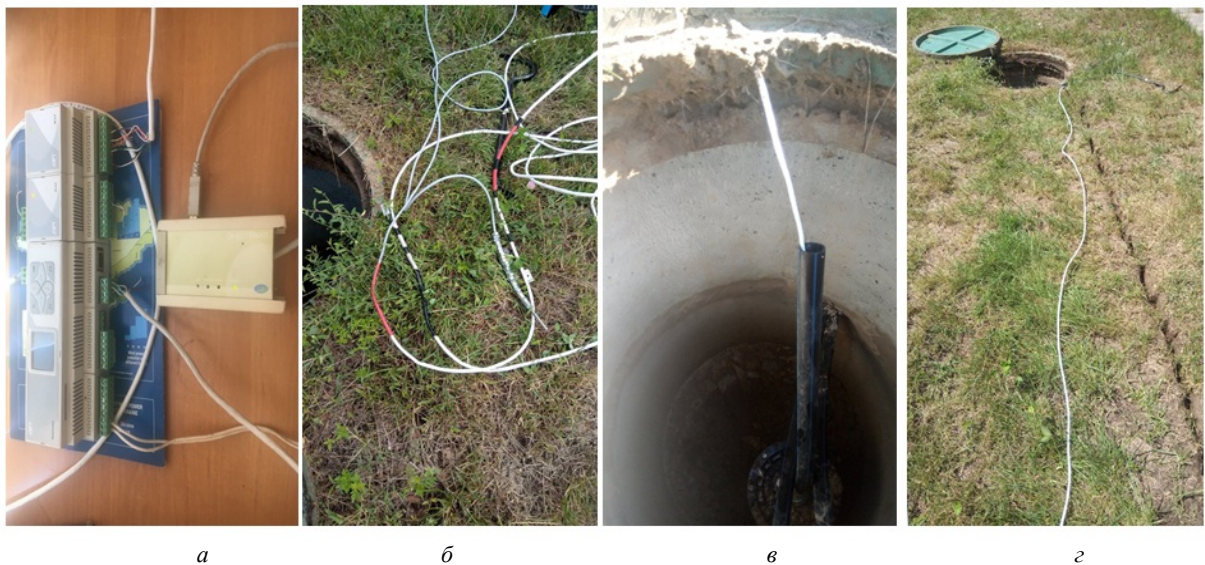


Рис. 1. Вимірювальні пристрої: *а* — Контролер MAXYCON FLEXY разом з блоками розширення та перетворювачем інтерфейсів RS 485/USB; *б* — вимірювальна коса зі встановленими термоперетворювачами опору ТСП-204; *в* — монтаж вимірювальної коси у свердловину; *г* — місце монтажу кабелю SF/UTP-cat.5E, яким поєднано датчики, встановлені в свердловині, з контролером, розташованим в будинку

За допомогою розробленої одним з авторів цієї статті інтерактивної системи диспетчеризації на базі програмного продукту ESM (Engineering Systems Manager) з використанням мови програмування FBD (Function Block Diagram|Continuous Function Chart) забезпечено збір даних з вимірювальних пристроїв та подальшим їхнім обробленням та записом в архів для інтерпретації та візуалізації в реальному часі на моніторі комп'ютера. Інформація з датчиків знімалася автоматично з часовим інтервалом у п'ять секунд.

Під час проведення дослідження отримано дані, що дозволяють проаналізувати попередні результати залежності зміни температур від глибини ґрунту на різних часових проміжках від доби до року, і вивести залежність середньомісячних температур  $T$  від глибини  $h$  для конкретного ґрунтового масиву м. Києва.

Попередньо зазначимо, що гідрогеологічний розріз ділянки досліджено за результатами буріння п'яти свердловин, він представлений такими горизонтами:

1. Алювіально-делювіальні відклади першої надзаплавної тераси. Горизонт складається з щільних піщанистих суглинків з включенням гравію і гальки, іноді з прошарками і лінзами піску. У складі водовмісних порід переважають пилуваті, глинисті фракції. Від 0,0 до 8,0 метрів — суглинок жовтий, а від 8,0 до 12,0 метрів — пісок дрібнозернистий.

2. Водонесний горизонт у відкладеннях межигірської, берекської та новопетрівської світ олігоцен-міоцену. Шари водовмісних відкладень не обмежені між собою водоупорами, гідравлічно пов'язані і розглядаються як єдиний водонесний горизонт. Цей горизонт відокремлюється від першого шаром бурих глин неогенового віку, товщина якого досягає 20 м. Покрівля горизонту знаходиться на глибині 32 м, а підосва — 50 м.

Аналіз теплофізичних характеристик шару ґрунту на глибині до 25 метрів в районі полігону, де проводилися дослідження зведено в табл. 1.

Таблиця 1

Усереднені теплофізичні характеристики шарів ґрунту в місці проведення дослідження

Номер шару	Назва порід	Потужність шару, м	Об'ємна теплоємність $C_v$ , Дж/м <sup>3</sup> ·°C	Теплопровідність $\lambda$ , Вт/м·°C	Температуропровідність $a$ , м <sup>2</sup> /с
1	Суглинок жовтий	0,0...8,0	1920...2880	0,5...1,5	$0,4 \cdot 10^{-6}$
2	Пісок дрібнозернистий	8,0...12,0	1600...2200	0,25...0,35	$0,3 \cdot 10^{-6}$
3	Глина бура щільна	12,0...32,0	1200...2200	0,2...2,0	$0,7 \cdot 10^{-6}$

На рис. 2 показано графіки зміни температури ґрунту протягом доби.

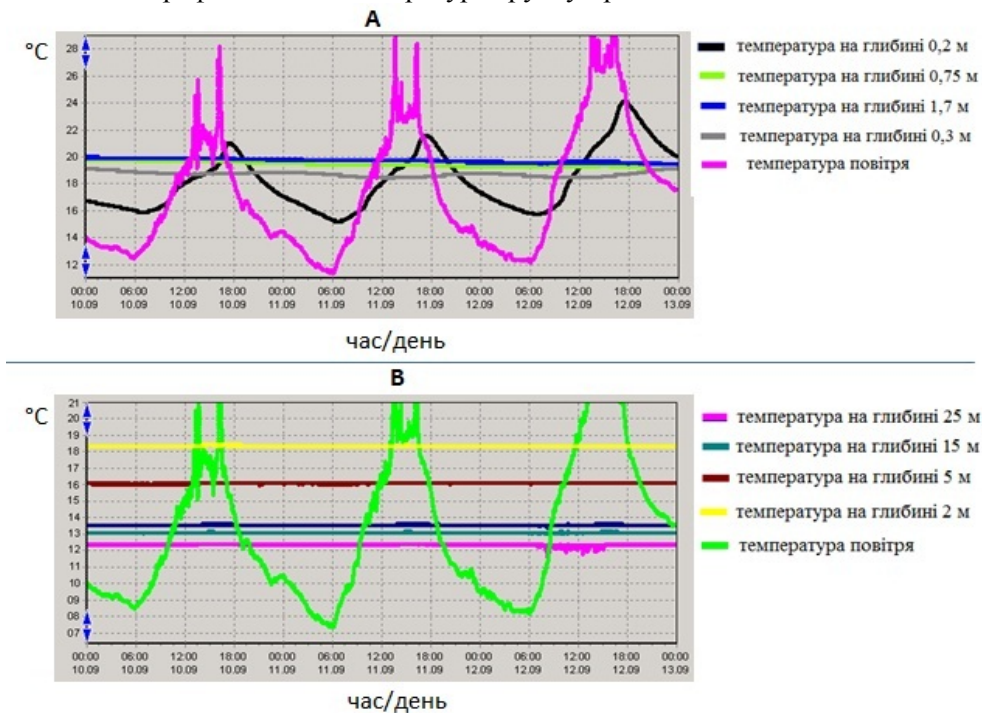


Рис. 2. Коливання температури ґрунту протягом трьох діб у вересні:  
 А — на глибині 0,02 м; 0,30 м; 0,70 м; 1,20 м; В — на глибині 2,00 м; 5,00 м; 15,00 м; 25,00 м

З наведених графіків (рис. 2) випливає, що добові коливання температури повітря, зумовлені зміною інтенсивності сонячного випромінювання, істотно впливають на температуру ґрунту, що знаходиться на глибині до 0,30 м. Вже починаючи з глибини 0,70 м та глибше, коливання температури повітря протягом доби не впливають на зміну температури ґрунту. Проте, якщо на графіку рис. 2А



спостерігається зниження температури ґрунту на позначці 0,70 м та 1,2 м, то на графіку рис. 2В немає значних змін температури на відмітках 15,0 м; 25,0 м у прийнятому масштабі вимірювання.

На рис 3 показано графіки зміни температур ґрунту протягом жовтня місяця, отримані експериментально. На них можна спостерігати, що температура ґрунту на глибині до 2 м протягом місяця має тенденцію до постійного зниження із загальною динамікою зниження температури повітря. На графіку рис. 3А відмічається істотна залежність зміни температури ґрунту на глибині до 0,70 м від температури повітря, тоді як на графіку рис. 3В видно, що температура повітря фактично не впливає на температуру ґрунту на глибині понад 5 метрів протягом місяця.

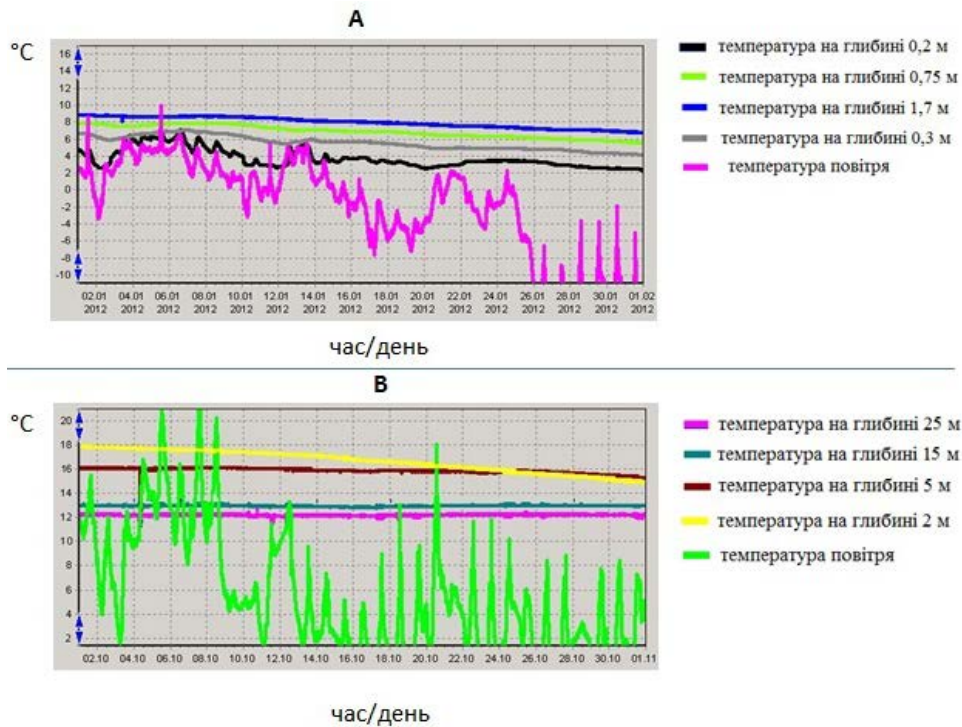


Рис. 3. Коливання температури ґрунту протягом одного місяця:  
А — на глибині 0,02 м; 0,30 м; 0,70 м; 1,20 м; В — на глибині 2,00 м; 5,00 м; 15,00 м; 25,00 м

При цьому можна спостерігати момент (рис. 3В), коли температура ґрунту на глибині 2 метри, падаючи від позначки на початку місяця 18 °С до позначки 15 °С наприкінці місяця, 24 жовтня, перетинає ізотерму ґрунту на глибині 5 метрів. Таким чином, можна припустити, що зазначені зміни температур ґрунту є результатом термодинамічних процесів, що залежать як від сонячної радіації, так і радіогенного тепла, що надходить з надр Землі.

Ефект зменшення впливу сонячного випромінювання та підвищення впливу радіогенного тепла, що надходить з надр землі до поверхні, спостерігається і в зимовий час на незначних глибинах ґрунту. Так на графіку (рис. 3А), можемо спостерігати картину, коли з середини січня (з 14.01 по 01.02), незважаючи на зниження інтенсивності сонячного випромінювання та суттєве зниження температури повітря на поверхні, температура ґрунту навіть на глибині 0,02 м перестає динамічно реагувати на її зміну, як це було з 01.01 до 14.01. Ми можемо припустити, що цей ефект зумовлений тим, що тепловим бар'єром стає сніговий покрив.

Результати науково-дослідного експерименту щодо вимірювання температур ґрунтового масиву, виконаних на експериментальному полігоні ІВЕ НАНУ протягом року, зведені у таблицю. Вибірка з експериментально отриманих даних подана в табл. 2.

Аналіз наведених даних дозволяє зробити висновок про незалежність середньорічних температур  $T$  від глибини  $h$  для кожного масиву вимірювань. Так для зазначених в табл. 2 даних змін температур за збільшення глибин маємо такі значення температури:

12,38; 12,63; 12,92; 13,04; 12,85; 12,31; 13,26; 12,98.

Отже, для розв'язання поставленої задачі, що полягає у визначенні  $hr$  і відповідної температури  $T(hr)$ , останню можна знаходити як середньоарифметичне значення середньорічних температур ( $T$ ).

Таблиця 2

## Залежність температури ґрунтового масиву від глибини та місяця року (отримані експериментально)

Місяць	Глибина $h$ , м							
	0,02	0,30	0,75	1,20	2,00	5,00	15,00	25,00
жовтень	8,0	13,0	15,0	16,5	17,0	16,8	12,2	12,1
листопад	5,0	9,0	11,0	12,5	13,8	14,2	12,2	12,2
грудень	4,5	8,0	9,0	10,5	11,8	13,0	12,0	12,2
січень	3,0	5,5	7,0	8,0	9,8	11,8	12,0	12,2
лютий	2,0	3,5	5,5	6,5	8,0	10,0	12,0	12,0
березень	5,0	4,0	4,0	6,0	7,0	6,5	12,0	12,0
квітень	14,0	11,5	9,5	8,0	7,0	7,4	12,0	12,0
травень	19,0	16,0	15,0	14,5	13,0	11,0	12,2	12,1
червень	21,0	18,0	17,0	16,0	13,8	11,0	12,2	12,1
липень	24,0	22,0	21,0	19,0	17,0	13,0	12,3	12,1
серпень	23,0	23,0	22,0	20,0	18,0	16,0	12,2	12,2
вересень	20,0	18,0	19,0	19,0	18,0	17,0	12,2	12,1
$T$ , °C	12,4	12,6	12,9	13,0	12,9	12,3	12,1	12,1
$\Delta T$ , °C	22,0	19,5	18,0	14,0	11,0	10,5	0,2	0,2

Шукане значення  $hr$ , задовольняє умові

$$(\Delta T)(hr) = 0.$$

Для даних, наведених в табл. 2, видно, що значення  $hr$ , яке задовольняє умові  $(\Delta T)(hr) = 0$ , знаходиться в межах 15 м.

Теоретично можна припустити, що це значення може бути завищено, враховуючи можливі неточності у вимірюваннях.

Виникає питання необхідності статистичного підходу, як до інтерпретації отриманих даних, так і їхнього розрахунку шляхом математичного моделювання, для перевірки отриманих результатів.

Наведемо математичну модель, яка дає змогу визначити температуру в ґрунті  $T(z, t)$  залежно від глибини  $z \geq 0$  і часу  $t \geq 0$  за умов, що задано: зміну температури поверхні ґрунту або зовнішнього повітря з часом; температуру ґрунту, коли  $z \rightarrow +\infty$ ; початкове значення температури ґрунту. Також вважатимемо, що температура ґрунту не залежить від координат  $(x, y)$  і теплофізичні властивості ґрунту не змінюються з координатами  $(x, y, z)$  і часом.

Тепло розповсюджується від більше нагрітих ділянок (точок) середовища до менш нагрітих ділянок (точок) середовища згідно із законом Фур'є. Температуру середовища у ґрунті опишемо рівнянням теплопровідності [15]

$$C_V \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2}, \quad (1)$$

де  $a = \lambda/C_V$ ;  $C_V$  — об'ємна теплоємність ґрунту, Дж/м<sup>3</sup>·°C;  $\lambda$  — теплопровідність ґрунту, Вт/м·°C;  $a$  — температуропровідність ґрунту, м<sup>2</sup>/с.

Розглянемо добові коливання температури ґрунту. Вважатимемо, що температура ґрунту дорівнює середній температурі поверхні ґрунту за добу за умови, що  $z \rightarrow +\infty$  [15]

$$T(z \rightarrow \infty, t) = \bar{T}_\delta. \quad (2)$$

Погодинні зміни температури поверхні ґрунту протягом доби опишемо синусоїдою [16]

$$T_\delta(z = 0, t) = \bar{T}_\delta + A_\delta \sin \left[ \frac{2\pi(t - t_\delta)}{24} \right], \quad (3)$$

де  $\bar{T}_\delta$  — середня добова температура поверхні ґрунту, °C;  $A_\delta$  — амплітуда добових коливань температури поверхні ґрунту, °C;  $t_\delta$  — часовий зсув мінімуму температури поверхні ґрунту протягом доби, год.

В початковий момент часу температура ґрунту дорівнює середній температурі поверхні ґрунту за добу [15]

$$T(z, t = 0) = \bar{T}_\delta. \quad (4)$$

Середньодобову температуру на поверхні ґрунту визначимо як середнє арифметичне від експериментальних значень температури, виміряних протягом доби або як середнє арифметичне від максимальної і мінімальної температури за добу [16]

$$\bar{T}_\delta = \frac{\sum_{i=1}^{i=8} T_{i,e}}{8}, \text{ або } \bar{T}_\delta = T_{\delta,\min} + \frac{T_{\delta,\max} - T_{\delta,\min}}{2}, \quad (5)$$

де  $T_{i,e}$ ,  $i = 1, 2, \dots, 8$  — експериментально визначена температура поверхні ґрунту, яку вимірюють раз на три години, °С,  $T_{\delta,\max}$  і  $T_{\delta,\min}$  — максимальна і мінімальна температура поверхні ґрунту протягом доби, °С.

Амплітуду добових коливань температури поверхні ґрунту обчислимо як різницю між максимальною температурою за добу і середньодобовою температурою

$$A_\delta = T_{\delta,\max} - \bar{T}_\delta. \quad (6)$$

Часовий зсув мінімуму температури поверхні ґрунту протягом доби  $t_\delta$  визначимо з умови

$$t_\delta : T(z = 0, t) \rightarrow \min. \quad (7)$$

Загальний розв'язок рівняння (1) з граничними умовами (2) і (3) і початковою умовою (4) отримують методом розділення змінних [17]

$$T_\delta(z, t) = \bar{T}_\delta + A_\delta \exp^{-z/d} \sin \left[ \frac{2\pi(t - t_\delta)}{24} - \frac{z}{d} - \frac{\pi}{2} \right], \quad (8)$$

$$\text{де } d = \sqrt{\frac{2a}{\omega}}, \quad \omega = \frac{2\pi}{24}.$$

Для виконання розрахунків температури ґрунту у заданій місцевості припустимо:

- температуру визначали на глибині 0,2 м, 0,3 м, 0,75 м, 1,7 м, 2 м, 5 м, 15 м і 25 м;
- температуру визначали за три доби, з 10 по 12 вересня 2012 року;
- температура поверхні ґрунту рівна температурі зовнішнього повітря;
- теплофізичні характеристики шару ґрунту на глибині до 25 метрів подано в табл. 1, що вище залягання водоносного горизонту. Тому температуропровідність ґрунту не суттєво змінюється з глибиною і можна вважати, що масив досліджуваного ґрунту є однорідним зі сталими теплофізичними характеристиками, температуропровідність якого становить  $0,54 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с (взято середнє вагове значення від температуропровідності трьох шарів ґрунту згідно з даними табл. 1;
- дані експериментально визначеної температури поверхні ґрунту  $T_{i,e}$ , °С протягом трьох днів наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Температура поверхні ґрунту

Час, год	0	3	6	9	12	15	18	21	24
День	Температура $T_{i,e}$ , °С								
10.09.21	14,0	13,2	12,4	15,5	19,2	21,0	17,8	15,4	14,0
11.09.21	14,0	12,4	11,5	16,1	20,2	22,8	20,0	14,4	13,6
12.09.21	13,6	12,5	12,2	18,8	23,7	28,2	21,9	18,0	17,2

За залежністю (5) визначено середню добову температуру поверхні ґрунту для заданої місцевості, яка становить 16,7, 17,1 і 20,2 °С для 10, 11 і 12 вересня відповідно. За залежністю (6) визначено амплітуду добових коливань температури поверхні ґрунту, яка становить 4,3, 5,6 і 8,0 °С для 10, 11 і 12 вересня відповідно. За залежністю (7) визначено часовий зсув мінімальної температури поверхні ґрунту протягом доби, який становить 6 год.

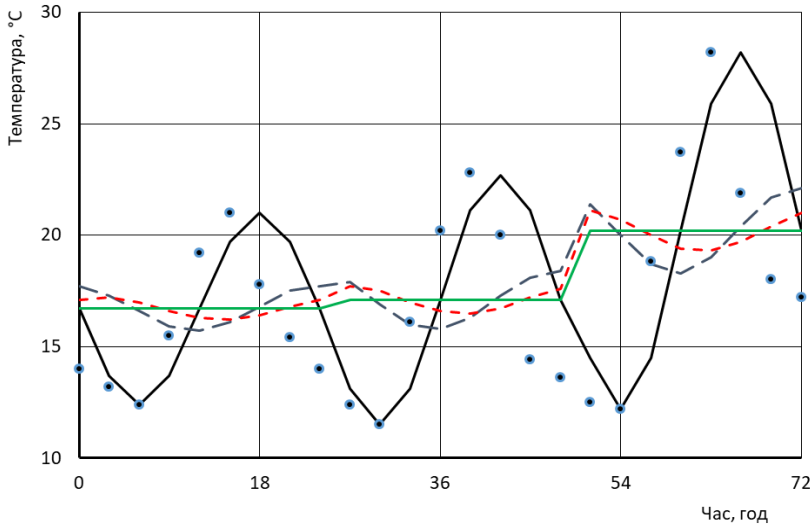


Рис. 4. Графік зміни температури ґрунту протягом трьох днів:

● — експериментальні дані; розрахунок за моделлю: — на поверхні ґрунту; — — — на глибині 20 см; - - - - на глибині 30 см; — на глибині 75 см

отримання аналітичного розв'язку для коливань температури ґрунту аналогічний до вищенаведеної задачі з добовими коливаннями, відмінність полягає лише в часовому проміжку. У ґрунті температуру середовища опишемо рівнянням теплопровідності (1).

Вважатимемо температуру ґрунту рівною середній температурі поверхні ґрунту за рік за умови, що  $z \rightarrow +\infty$  [15]

$$T(z \rightarrow \infty, t) = \bar{T}_p. \quad (9)$$

Добові зміни температури поверхні ґрунту протягом року опишемо синусоїдою [16]

$$T_p(z=0, t) = \bar{T}_p + A_p \sin\left[\frac{2\pi(t-t_p)}{365}\right], \quad (10)$$

де  $\bar{T}_p$  — середня річна температура поверхні ґрунту, °C;  $A_p$  — амплітуда річних коливань температури поверхні ґрунту, °C;  $t_p$  — часовий зсув мінімуму температури поверхні ґрунту протягом року, доба.

В початковий момент часу температура ґрунту дорівнює середній температурі поверхні ґрунту за рік [15]

$$T(z, t=0) = \bar{T}_p. \quad (11)$$

Середньорічну температуру поверхні ґрунту обчислимо як середнє арифметичне від середньодобових температур поверхні ґрунту або як середнє арифметичне від максимальної і мінімальної температури за рік [16]

$$\bar{T}_p = \frac{\sum_{i=1}^{365} \bar{T}_{\Delta,i}}{365}, \text{ або } \bar{T}_p = T_{p,\min} + \frac{T_{p,\max} - T_{p,\min}}{2}, \quad (12)$$

де  $\bar{T}_{\Delta,i}$ ,  $i=1, 2, \dots, 365$  — середньодобова температура поверхні ґрунту, °C,  $T_{\Delta,\max}$  і  $T_{\Delta,\min}$  — максимальна і мінімальна добова температура поверхні ґрунту протягом року, °C.

Амплітуду річних коливань температури поверхні ґрунту обчислимо як різницю між максимальною температурою за рік і середньорічною температурою

$$A_p = T_{p,\max} - \bar{T}_p. \quad (13)$$

Часовий зсув мінімуму температури поверхні ґрунту протягом року  $t_p$  визначимо з умови

На рис. 4 показано графік зміни температури ґрунту протягом трьох днів спостережень на глибині до 70 см включно, обчислені за залежністю (8), при цьому 0 год на графіку відповідає часу 0:00 год 10 вересня, а 72 год — відповідає 24:00 12 вересня.

З рис. 4 очевидно, що амплітуда коливань температури ґрунту з глибиною зменшується.

Підставивши числові значення в залежність (6) маємо, що амплітуда коливань температури ґрунту на глибині 20 см становить від 0,9 до 1,9 °C, на глибині 30 см — від 0,5 до 0,9 °C, а на глибині 75 см і більше — 0 °C.

Розглянемо сезонні коливання температури ґрунту. Метод



$$t_p : T(z=0, t) \rightarrow \min. \quad (14)$$

Загальний розв'язок рівняння (1) з граничними умовами (9) і (10) і початковою умовою (11) отримують методом розділення змінних [17]

$$T_p(z, t) = \bar{T}_p + A_p \exp^{-(z/d)} \sin \left[ \frac{2\pi(t-t_p)}{365} - \frac{z}{d} - \frac{\pi}{2} \right], \quad (15)$$

$$\text{де } d = \sqrt{\frac{2a}{\omega}}, \quad \omega = \frac{2\pi}{365}.$$

Для виконання розрахунків температури ґрунту в заданій місцевості за залежністю (15) необхідні середньодобові температури поверхні ґрунту за рік.

Також можна обчислити температуру ґрунту в заданій місцевості з використанням середньомісячної температури. Наведемо математичну модель для цього випадку. У ґрунті температуру середовища опишемо рівнянням теплопровідності (1). Температуру ґрунту за умови, що  $z \rightarrow +\infty$ , опишемо залежністю (9).

Добові зміни температури поверхні ґрунту протягом року опишемо синусоїдою [16]

$$T_p(z=0, t) = \bar{T}_p + A_p \sin \left[ \frac{2\pi(t-t_p)}{12} \right]. \quad (16)$$

Початкова умова (11) залишається без змін.

Середньорічну температуру поверхні ґрунту обчислимо як середнє арифметичне від середньомісячних температур поверхні ґрунту або як середнє арифметичне від максимальної і мінімальної температури за рік [16]

$$\bar{T}_p = \frac{\sum_{i=1}^{i=12} \bar{T}_{M,i}}{12}, \quad \text{або } \bar{T}_p = T_{p,\min} + \frac{T_{p,\max} - T_{p,\min}}{2}, \quad (17)$$

де  $\bar{T}_{M,i}$ ,  $i = 1, 2, \dots, 12$  — середньомісячна температура поверхні ґрунту, °С,  $T_{p,\max}$  і  $T_{p,\min}$  — максимальна і мінімальна місячна температура поверхні ґрунту протягом року, °С.

Середньомісячну температуру поверхні ґрунту обчислимо за залежністю

$$\bar{T}_M = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} \bar{T}_{d,i}}{N}, \quad (18)$$

де  $N$  — кількість днів у місяці;  $\bar{T}_{d,i}$  — середня добова температура поверхні ґрунту в  $i$ -й день місяця, °С.

Загальний розв'язок рівняння (1) з граничними умовами (9), (16) і початковою умовою (11) отримують методом розділення змінних [17]

$$T_p(z, t) = \bar{T}_p + A_p \exp^{-(z/d)} \sin \left[ \frac{2\pi(t-t_p)}{12} - \frac{z}{d} - \frac{\pi}{2} \right], \quad (19)$$

$$\text{де } d = \sqrt{\frac{2a}{\omega}}; \quad \omega = \frac{2\pi}{12}.$$

Для виконання розрахунків температури ґрунту в заданій місцевості візьмемо такі припущення:

- температуру ґрунту визначали на глибині 0,02 м, 0,3 м, 0,75 м, 1,2 м, 2 м, 5 м, 15 м і 25 м;
- температура поверхні ґрунту дорівнює температурі зовнішнього повітря;
- масив досліджуваного ґрунту є однорідним зі сталими теплофізичними характеристиками, температуропровідність його становить  $0,54 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  (взято середнє вагове значення від температуропровідності трьох шарів ґрунту згідно з даними табл. 1);
- дані середньомісячної температури поверхні ґрунту протягом досліджуваного періоду часу тривалістю один рік з жовтня 2020 по вересень 2021 року подані в табл. 4.

Таблиця 4

## Середньомісячна температура поверхні ґрунту

Порядковий номер місяця	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Місяць	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09
Рік	2020	2020	2020	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021
Температура $T_{i,e}$ , °C	10,6	3,1	-0,7	1,3	1,8	2,6	8,1	14,6	21,7	20,8	22,4	12,7

За залежністю (17) визначено середньорічну температуру поверхні ґрунту для заданої місцевості, яка становить 9,7 °C. За залежністю (13) визначено амплітуду добових коливань температури поверхні ґрунту, яка становить 11,5 °C. За залежністю (14) визначено часовий зсув мінімальної середньомісячної температури поверхні ґрунту, який становить у 3 місяці, протягом досліджуваного періоду, тривалістю один рік.

В табл. 5 подано значення середньомісячної температури ґрунту протягом досліджуваного періоду часу, тривалістю один рік на глибині до 25 м включно, обчислені за залежністю (18), зокрема наведено усереднену похибку  $\bar{\delta}$  і максимальну похибку  $\delta_{\max}$  між модельними розрахунками і експериментальними даними.

Таблиця 5

## Середньомісячна температура ґрунту

Місяць	Глибина $h$ , м							
	0,02	0,30	0,75	1,20	2,00	5,00	15,00	25,00
жовтень	4,1	5,6	7,6	9,2	10,9	11,4	9,7	9,7
листопад	-0,1	1,4	3,7	5,6	8,1	11,0	9,7	9,7
грудень	-1,7	-0,5	1,4	3,1	5,8	10,2	9,7	9,7
січень	-0,2	0,3	1,3	2,4	4,4	9,3	9,7	9,7
лютий	4,0	3,6	3,5	3,7	4,5	8,5	9,7	9,7
березень	9,7	8,6	7,3	6,5	6,0	8,0	9,7	9,7
квітень	15,4	13,8	11,8	10,2	8,5	8,0	9,7	9,7
травень	19,6	18,0	15,7	13,8	11,3	8,4	9,7	9,7
червень	21,1	19,9	18,0	16,3	13,7	9,2	9,7	9,7
липень	19,6	19,1	18,1	17,0	15,0	10,1	9,7	9,7
серпень	15,5	15,8	15,9	15,8	14,9	10,9	9,7	9,7
вересень	9,8	10,8	12,1	12,9	13,4	11,4	9,7	9,7
$T$ , °C	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7
$\Delta T$ , °C	22,8	20,4	16,8	14,6	10,5	3,4	0	0
$\delta_{\max}$ , °C	10,2	8,5	7,6	7,4	6,0	5,6	4,2	3,4
$\bar{\delta}$ , °C	4,1	4,7	4,4	3,8	3,4	3,0	3,5	3,2

З наведених даних очевидно, що амплітуда коливань температури ґрунту з глибиною зменшується. Підставивши числові значення в залежність (6), маємо, що амплітуда коливань температури ґрунту на глибині 15 м і більше дорівнює 0 °C. Порівняльний аналіз отриманих результатів з експериментальними даними свідчить про те, що експериментальні дані перевищують середньорічну температуру 9,7 °C приблизно на 3,2 °C. Це можна пояснити тим, що поряд з районом досліджень імовірно присутнє джерело теплової енергії. Якщо для моделювання задати середньорічну температуру 12,9 °C, тоді розбіжність між модельними і експериментальними результатами буде задовільною.

Отримані результати для визначення температур ґрунту можна поширити на інші території за умови, що зібрані усі необхідні для розрахунків дані, а саме відомо температуру на поверхні ґрунту і визначені значення температуропровідності кожного з геологічних шарів ґрунту.

Відповідно до другої поставленої задачі дослідження проаналізовано ефективність роботи гідротермальної теплонасосної системи за нестабільних вхідних параметрів, пов'язаних з перепадами температури на вході до теплонасосної системи.

Для оцінки енергетичної ефективності теплонасосної установки використовується коефіцієнт трансформації  $K$  (перетворення теплоти), який є відношенням кількості енергії, що генерується

тепловим насосом, до кількості енергії, що витрачається на процес перенесення тепла. Чим більший  $K$ , тим доцільніше використання теплонасосної установки. Визначається коефіцієнт трансформації за формулою

$$K = \frac{T_{out}}{T_{out} - T_{in}}, \quad (20)$$

де  $T_{out}$  — температура на виході з теплового насоса;  $T_{in}$  — температура теплоносія, що надходить до теплового насоса.

Введемо коефіцієнт  $k$ , який визначає відсоток, на який зменшується ефективність роботи теплонасосної системи в залежності від падіння температури теплоносія на вході до випарника теплового насоса. Цей коефіцієнт визначається за формулою

$$k = \left(1 - \frac{k_i}{k_s}\right) \cdot 100\%, \quad (21)$$

де  $k_i$  — коефіцієнт трансформації теплонасосної установки для  $i$ -ї температури теплоносія на вході до випарника теплового насоса;  $k_s$  — коефіцієнт трансформації гідротермальної теплонасосної системи для стабільної вхідної температури теплоносія. В нашому випадку стабільна вхідна температура дорівнює  $10^\circ\text{C}$ .

З урахуванням (1), коефіцієнт  $k$  набуває значення

$$k = \left(1 - \left[ \frac{T_{iout}}{T_{iout} - T_{in}} \frac{T_{sout} - T_{sin}}{T_{sout}} \right]\right) \cdot 100\%, \quad (22)$$

де  $T_{iout}$  — температура на виході з конденсатора теплового насоса за  $i$ -ї температури теплоносія на вході до випарника теплового насоса;  $T_{sout}$  — температура на виході з конденсатора теплового насоса за стабільної температури теплоносія на вході до випарника теплового насоса;  $T_{in}$  —  $i$ -та температура на вході у випарник теплового насоса гідротермальної теплонасосної системи;  $T_{sin}$  — стабільна температура на вході у випарник теплового насоса гідротермальної теплонасосної системи (дорівнює  $10^\circ\text{C}$ ).

Результати розрахунків зведено в табл. 6 та табл. 7.

Таблиця 6

**Результати розрахунку відсотку, на який може зменшуватися ефективність роботи теплонасосної системи в залежності від глибини встановлення ґрунтового колектора теплонасосної системи, від оптимального в певній місцевості (на основі даних, отриманих експериментально)**

	Глибина $h$ , м							
	0,2	0,35	0,7	1,2	2	5	15	25
$\Delta T$ , $^\circ\text{C}$	22,0	19,5	18,0	14,0	11,0	10,5	0,2	0,2
$K$ , %	33,3	29,5	27,3	21,2	16,7	15,9	0,3	0,3

Таблиця 7

**Результати розрахунку відсотку, на який може зменшуватися ефективність роботи теплонасосної системи в залежності від глибини встановлення ґрунтового колектора теплонасосної системи, від оптимального в певній місцевості (на основі даних, отриманих на основі математичних розрахунків)**

	Глибина $h$ , м							
	0,2	0,35	0,7	1,2	2	5	15	25
$\Delta T$ , $^\circ\text{C}$	22,8	20,4	16,8	14,6	10,5	3,4	0	0
$K$ , %	34,5	31,8	25,5	22,1	15,9	5,2	0	0

Дані щодо ефективності роботи теплонасосної системи на різній глибині встановлення геотермального колектора експериментально корелюють з даними, отриманими на основі математичного моделювання. Розбіжності можливі у наслідок геологічних, гідрогеологічних, морфологічних і антропогенних умов місця проведення досліджень. Найбільший коефіцієнт трансформації має система з колектором, встановленим нижче нейтрального шару. Зі зменшенням глибини встановлення колектора коефіцієнт трансформації зменшується.

Під час проектування систем цього типу на етапі техніко-економічного обґрунтування визначається оптимальне поєднання складових вартості та ефективності системи. Перша складова залежить від складності встановлення колектора, а друга — від значення коефіцієнта перетворення теплонасосної системи. Причому обидві складові пропорційні глибині встановлення ґрунтового колектора. Таким чином, застосування запропонованого математичного апарату встановлення нейтрального шару температур та розрахунку відсотка, на який може зменшуватися коефіцієнт перетворення теплонасосної системи від глибини встановлення ґрунтового колектора дозволяють оптимізувати побудову геотермальних (гідротермальних) систем на стадії проектування.

### Висновки

1. Тепловий режим ґрунту приповерхневих шарів Землі має вікову, багаторічну, річну і добову циклічність, пов'язану зі зміною режимів інсоляції і випромінювання. Головне джерело теплової енергії, що надходить в ґрунт є сонячна радіація.

2. Експериментально отримані дані щодо термічного режиму ґрунту на геотермальному полігоні ІВЕ НАНУ корелюють з результатами, отриманими в процесі математичного моделювання. Глибина річних змін температур у ґрунті  $h$ , яка визначає шар земної поверхні, що активно взаємодіє з атмосферою Землі в обох випадках знаходиться на позначці 15 м.

3. Експериментально та аналітично доведено, що найбільшу ефективність мають геотермальні теплонасосні системи з колектором теплової енергії, змонтованим нижче нейтрального шару температур.

4. Обґрунтовано, що у разі монтажу колектора геотермальної теплонасосної системи на глибину менше 1,2 м, коефіцієнт трансформації цієї системи наближається до повітряних теплонасосних систем, ефективність яких суттєво залежить від температури навколишнього середовища.

5. Експериментально доведено, що можливі аномалії геотермального поля нижче нейтрального шару зумовлені фільтрацією підземних вод.

6. Аналіз отриманих даних дозволив зробити висновок про необхідність урахування змін температур ґрунту протягом року під час вирішення завдань вилучення теплоти геотермальними теплонасосними системами. Отримані теоретичні та практичні результати дозволяють оптимізувати побудову геотермальних систем.

7. Мають перспективу подальші дослідження впливу геологічних, гідрогеологічних морфологічних та антропогенних умов на девіацію температури нижче нейтрального шару, та їхній вплив на ефективність роботи геотермальних теплонасосних систем.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] М. К. Безродний, І. І. Пуховий, і Д. С. Кутра, *Теплові насоси та їх використання*, навч. посіб. Київ, Україна: НТУУ «КПІ», 2013, 312 с.
- [2] А. А. Долінський, і Б. Х. Драганов, «Теплові насоси у системі тепlopостачання будівель», *Промислова теплотехніка*, т. 30, № 6, с. 71-83, 2008.
- [3] С. О. Кудря, *Відновлювані джерела енергії*. ІВЕ НАН України. Київ, Україна, 2020, 354 с.
- [4] Ю. П. Морозов, Д. М. Чалаєв, Н. В. Ніколаєвська, і М. П. Добровольський, «Оцінка ефективності використання теплового потенціалу доквілля та верхніх шарів землі України», *Відновлювана енергетика*, № 4 (63), с. 80-88, 2019. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4\(63\).80-88](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4(63).80-88) .
- [5] Ke Zhu, Philipp Blum, Grant, Klaus-Dieter Balke, and Peter Bayer, “The geothermal potential of urban heat islands,” *Environ. Res. Lett.*, no. 5, pp. 1-6, 2010. <http://Ferguson dx.doi.org/10.1088/1748-9326/6/1/019501> .
- [6] Ю. П. Морозов, А. А. Барило, Д. М. Чалаєв, і М. П. Добровольський, «Енергетична ефективність використання перших від поверхні водоносних горизонтів для тепло- і хладопостачання», *Відновлювана енергетика*, № 2, с. 70-78, 2019. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2\(57\).70-78](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57).70-78) .
- [7] O. V. Zurian, “Comparison of efficiency of geothermal and hydrothermal energy systems,” *XIX International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. Renewable Energy Sources and Clean Tech*. Varna. Bulgaria, 2019, с. 83-90. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/4.1/S17.011> .
- [8] Е. С. Малкін, і Є. О. Кулінко, «Перспективи та аспекти застосування систем теплохолодопостачання, які використовують приповерхневі шари води в якості теплового акумулятора», *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*, № 17, с. 63-69, 2014.
- [9] O. I. Denisov, “Comparative energy analysis of heat pumps and traditional heating systems,” *Tehnicheskaya teplofizika i promyshlennaya teploenergetika*. Ukraine. vol. 2, pp. 22-34, 2010.
- [10] О. В. Зур'ян, і В. Г. Олійніченко, «Гідротермальна система отримання теплової енергії, фізичні процеси, ефективність», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 40-46, 2021. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-157-4-40-46> .
- [11] Ю. П. Морозов, і А. С. Жохін, «Теплообмін при русі геотермального теплоносія у свердловині», *Відновлювана енергетика*, № 4 (71), с. 83-89, 2023. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4\(71\).83-89](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4(71).83-89) .

- [12] Olga Kordas, and Eugene Nikiforovich, “A phenomenological theory of steady-state vertical geothermal systems: A novel approach <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.030> .” *Energy*, no. 175, pp. 23-35, 2019.
- [13] S. Yoon, et al, “Evaluation of stainless steel pipe performance as a ground heat exchanger in ground-source heat-pump system,” *Energy*, 2016; 113:328e37. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.057> .
- [14] I. Stylianou, G. Florides, S. Tassou, E. Tsiolakis, and P. Christodoulides, “Methodology for estimating the ground heat absorption rate of Ground Heat Exchangers,” *Energy*, 2017;127:258e70. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.070> .
- [15] А. Пуди, А. Прокопенко, Неоднорідні крайові задачі теплопровідності. Харків, Україна: ХНПУ, 2013, 226 с.
- [16] X. Liang, E. Wood, and D. Letenmaier, “Modeling ground heat flux in land surface parameterization schemes,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 104, pp. 9581-9600.
- [17] В. Бондаренко, *Рівняння математичної фізики*. Київ, Україна: НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», 2018, 100 с.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 28.08.2022

**Зур'ян Олексій Володимирович** — канд. техн. наук, заступник директора з наукової роботи, e-mail: alexey\_zuryan@ukr.net ;

**Четверик Геннадій Олександрович** — канд. техн. наук, завідувач відділу відновлюваних органічних енергоносіїв.

Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ

**O. V. Zurian<sup>1</sup>**  
**G. O. Chetveryk<sup>1</sup>**

## Experimental Investigations and Simulation of Soil Temperature Distribution at a Depth Above the Neutral Layer

<sup>1</sup>Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine

*In the process of solving the problems of soil accumulation and extraction of heat from the near-surface layers of the Earth, there is a need to obtain information on the depth of annual temperature changes in the soil, which determines the layer of the earth's surface that actively interacts with the near-Earth atmosphere. In the cold season, the temperature in it drops, and in the warm season it rises. It is known that the efficiency of a heat pump system depends both on the temperature difference at the outlet of the heat pump condenser and the inlet to its evaporator, and on the temperature stability of the heat source. The temperature at the inlet to the evaporator of the heat pump is determined by the temperature of the ground at the location of the heat collector. The greatest efficiency is achieved by heat pump systems with collectors installed below the neutral layer — the temperature of which is constant and equal to the average annual temperature of the soil in the area.*

*At the geothermal test site of the Institute of Renewable Energy Sources of the National Academy of Sciences of Ukraine, experimental studies of soil temperature changes at the installation site of vertical heat exchangers (collectors) were carried out. The research methodology is described. The characteristics of the measuring equipment installed on the experimental setup and the software used for archiving and visualization of the data obtained during the research are given. The depth of the neutral layer was determined and the obtained dependences of temperature change on depth were substantiated, taking into account the ambient temperature and other factors of exogenous impact.*

*Mathematical model is presented that makes it possible to determine the soil temperature  $T(z, t)$  depending on the depth  $z \geq 0$  and time  $t \geq 0$ , provided that the change in the temperature of the soil surface or outdoor air over time is given, taking into account the assumption that the soil temperature does not depend on the coordinates  $(x, y)$  and the thermophysical properties of the soil do not change with the coordinates  $(x, y, z)$  over time. Based on the mathematical model, calculated data were obtained and graphs of the dependence of  $T(z, t)$  on depth per day and per year were plotted. The depth of the neutral layer is determined. Experimentally obtained as a result of research work on the thermal regime of the soil at the geothermal test site of the Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, correlate with the results obtained during mathematical modelling. The depth of annual temperature changes in the soil  $h$ , which determines the layer of the earth's surface that actively interacts with the Earth's atmosphere, in both cases is at around 15 m.*

*In the course of the study, the patterns of seasonal temperature changes in the upper layers of the Earth were confirmed. The analysis of the data obtained made it possible to conclude that it is necessary to take into account changes in soil temperatures during the year when solving the problems of accumulation and extraction of heat by geothermal heat pump systems. The obtained theoretical and practical results make it possible to improve the construction of geothermal systems. There are prospects for further studies of the influence of geological, hydrogeological morphological and anthropogenic conditions on the temperature deviation below the neutral layer and their influence on the efficiency of geothermal heat pump systems.*

**Keywords:** renewable energy sources, geothermal energy, soil heat, neutral layer, geothermal heat pump system.

**Zurian Oleksii V.** — Cand. Sc. (Eng.), Deputy Director of Research, e-mail: alexey\_zuryan@ukr.net ;

**Chetveryk Hennadii O.** — Cand. Sc. (Eng.), Head of the Department of Renewable Organic Energy Carriers