

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ГЛИБИНИ ПОШИРЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ХВИЛІ ПІД ЧАС ПОБУДОВИ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ ТЕПЛОНАСОСНИХ СИСТЕМ

Отримано 24 лист. 2024 р.; рекомендовано до публікації 27 лист 2024 р.
Доступно онлайн 11 груд. 2024 р.

Зур'ян О. В.¹, Олійніченко В. Г.²

Автор для кореспонденції: Олійніченко Валерій,
e-mail: geotherm@ukr.net

¹ канд. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0002-2391-1611>

² наук. співроб.
<https://orcid.org/0000-0003-4651-9628>

^{1, 2} Інститут відновлюваної енергетики НАН
України, м. Київ, Україна

Особливістю системи добування геотермальної теплоти є поєднання технічних і природного елементів таких систем, при цьому природний об'єкт досліджень перебуває в глибинних шарах Землі, які малодоступні для вивчення і спостережень. За таких обставин майже єдиними методами дослідження теплових і гідродинамічних процесів у глибинних шарах Землі є математичні. Основний з них – математичне моделювання. Відомо, що температура ґрунту має добову та річну періодичність. Ступінь нагрівання ґрунту залежить від його теплопровідності, під якою розуміють здатність ґрунту проводити тепло від більш нагрітих шарів до менш нагрітих. А зміни температури ґрунту можуть істотно залежати від його вологонасиченості та рослинного покриву, характеру ґрунту й висоти його протягом року. Водночас залишаються недостатньо дослідженими системи теплообмінник–ґрунт, ефективність використання яких безпосередньо залежить від розподілу температури в ґрунті та чинників, які на цей розподіл впливають. До складу основного математичного апарату для опису таких процесів входять диференціальні рівняння, що враховують залежність температури від часу та просторових координат. Цей підхід дозволяє оцінити, як сонячне нагрівання поверхні викликає теплові хвилі, що поширюються вниз у ґрунт. Метою цього дослідження є обґрунтування вихідних даних поширення температурної хвилі, обґрунтування спрощеної методики визначення поширення теплової хвилі та розраховані глибини поширення температурної хвилі залежно від типу ґрунту, вологості та рослинного покриву на поверхні. Робота виконана відповідно до плану науково-дослідних робіт Інституту відновлюваної енергетики НАН України.

Ключові слова: геотермальна енергетика, математичне моделювання, теплова хвиля.

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE DEPTH OF TEMPERATURE WAVE PROPAGATION IN THE CONSTRUCTION OF GEOTHERMAL HEAT PUMP SYSTEMS

Received Nov. 24, 2024; accepted Nov. 27, 2024
Available online Dec. 11, 2024

Zurian O.¹, Oleynichenko V.²

Author for correspondence: Oleynichenko Valerii,
e-mail: geotherm@ukr.net

¹ Cand. of Tech. Sciences
<https://orcid.org/0000-0002-2391-1611>

² Researcher
<https://orcid.org/0000-0003-4651-9628>

^{1, 2} Institute of renewable energy, NAS of
Ukraine, Kyiv, Ukraine

The peculiarity of the geothermal heat extraction system is the combination of technical and natural elements of such systems, while the natural object of research is located in the deep layers of the Earth, which are inaccessible for study and observation. In such circumstances, mathematical methods are almost the only method for studying thermal and hydrodynamic processes in the deep layers of the Earth.

The main one is mathematical modelling. It is known that soil temperature has a daily and annual periodicity. The degree of soil heating depends on its thermal conductivity, which is the ability of the soil to conduct heat from more heated layers to less heated layers. And the course of soil temperature can significantly depend on the moisture content and vegetation cover of the soil, its nature and height throughout the year. At the same time, heat

exchanger-soil systems remain insufficiently studied, the efficiency of which directly depends on the temperature distribution in the soil and the factors that affect this distribution. The basic mathematical apparatus for describing such processes includes differential equations that take into account the dependence of temperature on time and spatial coordinates. This approach allows us to estimate how solar heating of the surface causes heat waves to propagate down into the soil. The purpose of this study is to substantiate the initial data of temperature wave propagation, to substantiate a simplified methodology for determining the heat wave propagation and to calculate the depths of temperature wave propagation depending on the type of bent, humidity and vegetation cover on the surface. The work was performed in accordance with the research plan of the Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Keywords: *geothermal energy, mathematical modelling, heat wave.*

Вступ. Україна належить до країн з обмеженими власними паливно-енергетичними ресурсами та імпортує близько 60 % рідких і газоподібних енергоносіїв. У цей час енергоемність основних галузей промисловості та комунального господарства в Україні одна з найбільших у світі й не відповідає сучасним вимогам. Одним з перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є розвиток технологій енергозабезпечення з використанням теплових насосів. Однак широкомасштабне впровадження таких систем потребує детальнішого вивчення процесів перетворення енергії з урахуванням багатьох чинників. Математичні моделі, що відображають поточну потужність цих систем на певній території, мають враховувати як часову нестабільність, так і глибинні неоднорідності теплового потоку.

Науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи з підвищення ефективності геотермальних теплових насосів проводяться як в Україні, так і світі вже тривалий час. Досліджено перспективи застосування теплових насосів [1–3]. Аналіз ефективності використання теплового потенціалу доквілля та верхніх шарів Землі наведено в роботах [4, 5]. У роботах [6–8] проведено оцінку ефективності теплових насосів різних типів, а в роботах [9, 10] виконано порівняльний енергетичний аналіз теплових насосів. Дослідження щодо встановлення теплового балансу в ґрунті під час експлуатації ГеотНС описані авторами в [11, 12]. З використанням води підземних горизонтів проводяться активні науково-дослідницькі роботи з вивчення фізичних особливостей та енергетичної ефективності акумулювання тепла та холоду [14–16].

Результати цих досліджень підтверджують перспективність напряму підвищення енергоефективності за рахунок використання низькопотенційної теплової енергії верхніх шарів Землі для потреб опалення, кондиціювання, гарячого водопостачання та забезпечення технологічних потреб споживачів.

Постановка завдання. Під час багатьох теплових процесів відбувається періодичне перенесення теплової енергії з послідовним нагріванням та охолодженням. Наприклад, поверхневий шар Землі, перебуває під впливом коливань температури – річних, добових тощо.

При інсталяції геотермальних теплообмінників, що розташовуються горизонтально у верхніх шарах ґрунту, під час побудови геотермальних теплонасосних систем, які використовують низькопотенційну теплову енергію

ґрунту, необхідно враховувати глибину, на яку розповсюджується теплова хвиля. Залишаються недостатньо дослідженими системи теплообмінник–ґрунт, ефективність використання яких безпосередньо залежить від розподілу температури в ґрунті та чинників, які на цей розподіл впливають.

За таких обставин основними методами дослідження теплових і гідродинамічних процесів у системах видобування низькопотенційних геотермальних ресурсів з приповерхневих шарів Землі та системах її перетворення на енергію, комфортну для застосування в теплоенергетиці, є теоретичні методи. Основний з них – математичне моделювання. Отже, тема дослідження надзвичайно актуальна.

Таким чином, в разі аналітичного розв’язку задачі основна проблема полягає в обґрунтованому спрощенні математичної моделі й умов однозначності. Обґрунтування їх проводимо як на підставі аналізу даних дослідників в інших галузях, які вважаються доведеними, так і власних спрощень, достовірність яких обґрунтовується.

Виклад основного матеріалу

Для визначення глибини поширення теплової хвилі від поверхні ґрунту, що нагрівається Сонцем у природних умовах, є доцільним використовувати методику, засновану на рівнянні теплопровідності з періодичним граничним нагріванням. Цей підхід дозволяє оцінити, як сонячне нагрівання поверхні викликає теплові хвилі, що поширюються вниз у ґрунт.

Методика розрахунку глибини поширення теплової хвилі полягає в формулюванні задачі, а саме рівняння теплопровідності з періодичними граничними умовами.

Під періодичними граничними умовами маються на увазі такі умови, за яких температура на поверхні ґрунту змінюється за певним періодичним законом, що повторюється з фіксованим інтервалом часу. Вони застосовуються, коли джерело тепла (в цьому разі сонячне нагрівання поверхні ґрунту) змінюється циклічно – наприклад, протягом доби або року.

Загальна ідея періодичних граничних умов у фізиці й математичному моделюванні полягає в тому, що періодичні граничні умови означають, що значення певного

параметра (тут температури) на межі області (наприклад, на поверхні ґрунту) змінюються за законом, який періодично повторюється. Це дозволяє використовувати математичні методи для аналізу процесів, що мають циклічний характер, як-от добові або сезонні коливання температури, електромагнітні хвилі, коливання тиску в трубопроводах тощо.

Конкретно для нашого випадку, при розгляді проникнення теплової хвилі в ґрунт від поверхні з урахуванням сонячного нагрівання, ми використовуємо періодичні граничні умови на поверхні Землі. Це означає, що температура на поверхні змінюється циклічно залежно від часу доби або пори року.

Для формулювання періодичних граничних умов для добових змін ми можемо задати граничну умову на поверхні як періодичну функцію з періодом 24 год (86 400 с), наприклад:

$$T(0,t) = T_{cp} + A \cdot \sin \frac{2\pi t}{T_{доб}}, \quad (1)$$

де:

$T(0,t)$ – температура на поверхні ґрунту в момент часу;

T_{cp} – середня добова температура;

A – амплітуда добових коливань температури;

$T_{доб}$ – період добових коливань (24 год).

Для сезонних коливань температура на поверхні змінюється з періодом 1 рік (365 днів, або 31 536 000 с). Гранична умова для сезонних коливань температури може мати вигляд:

$$T(0,t) = T_{cp.сезон} + A_{сезон} \cdot \sin \frac{2\pi t}{T_{сезон}}, \quad (2)$$

де:

$T_{cp.сезон}$ – середня добова температура;

$A_{сезон}$ – амплітуда добових коливань температури;

$T_{сезон}$ – період добових коливань (1 рік).

У нашій задачі на поверхні ґрунту відбувається періодичне нагрівання впродовж доби або року. Це приводить до того, що теплові хвилі проникають у ґрунт з періодичністю, визначеною граничними умовами на поверхні. З урахуванням добових або сезонних коливань поверхневої температури ми можемо прогнозувати, як глибоко у ґрунті ці коливання будуть впливати на температуру.

Розповсюдження теплоти описується рівнянням теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (3)$$

де:

T – температура на глибині z у момент часу t ;

a – температуропровідність ґрунту ($\text{м}^2/\text{с}$);

z – глибина поширення теплової хвилі (м).

Для періодичного нагріву розв'язок рівняння теплопровідності набирає вигляду:

$$T(z,t) = T_{cp} + A \cdot e^{-\frac{z}{\delta}} \sin 2\frac{\pi t}{\tau} - \frac{z}{\delta}, \quad (4)$$

де:

$T(z,t)$ – загальна функція температури T на глибині z у момент часу t . Розв'язок показує, як змінюється температура в ґрунті на глибині z протягом часу, враховуючи, що поверхнева температура змінюється періодично (наприклад, через добовий або сезонний цикл).

T_{cp} – середня температура ґрунту на глибині z протягом часу. Вона визначає базовий рівень температури, навколо якого відбуваються коливання.

A – амплітуда температурних коливань на поверхні, тобто максимальне відхилення температури від середнього значення T_{cp} на поверхні ґрунту. Наприклад, якщо температура на поверхні коливається від 10 до 20 °C, амплітуда A становитиме 5 °C (оскільки середня температура 15 °C і відхилення від неї в будь-який бік становить 5 °C).

$e^{-\frac{z}{\delta}}$ – експоненційний множник, який відповідає за загасання амплітуди коливань у глибину ґрунту. Цей множник показує, як амплітуда температурних коливань зменшується з віддаленням від поверхні. На глибині $z = \delta$ амплітуда зменшується приблизно до 36,8 % (тобто до $1/e$) від початкової поверхневої амплітуди A .

$\sin 2\frac{\pi t}{\tau} - \frac{z}{\delta}$ – складова, що описує періодичний характер температурних коливань у часі та зміщення фази в глибину.

δ – глибина проникнення теплової хвилі, яка визначається за формулою:

$$\delta = \sqrt{\frac{2a\tau}{\pi}} \quad (5)$$

де:

a – температуропровідність ґрунту, що визначає, як швидко тепло поширюється у середовищі. Вона залежить від властивостей ґрунту (теплопровідність, щільність і теплоємність).

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (6)$$

τ – період коливань (наприклад, 24 год для добових коливань або 1 рік для сезонних коливань).

Що більший період коливань τ або температуропровідність a , то більша глибина проникнення теплової хвилі δ .

Цей параметр вказує, на якій глибині амплітуда температурних коливань зменшиться приблизно до 37 % поверхневої амплітуди.

Зменшення амплітуди до 37 % (точніше, $\approx 36,8\%$) базується на властивостях експоненційної функції. Це пов'язано з тим, як розподіляється тепло і як амплітуда температурних коливань зменшується в глибину ґрунту при поширенні теплової хвилі.

Розглянемо розв'язок рівняння теплопровідності (4) де $e^{-\frac{z}{\delta}}$ – це експоненційний множник, який описує зменшення амплітуди температурних коливань у глибину. Коли z дорівнює глибині δ , тоді:

$$e^{-\frac{z}{\delta}} = e^{-1} \approx 0,368$$

Це означає, що на глибині $z = \delta$ амплітуда температурних коливань зменшується до 36,8 % початкової амплітуди на поверхні, тобто трохи більше третини. Ця властивість є наслідком експоненційного загасання, яке притаманне багатьом фізичним процесам, зокрема тепlopередачі в середовищі.

Отже, глибина δ є характеристичною глибиною, на якій амплітуда коливань зменшується до $1/e$ (або 36,8 %) початкового значення на поверхні.

Значення δ показує глибину, на якій теплові коливання ще мають помітного впливу. Далі амплітуда коливань зменшується експоненційно, тому температуру на більшій глибині можна вважати стабільною, без впливу добових або сезонних коливань.

Для визначення глибини проникнення добових коливань температури для різних типів ґрунтів використаємо формулу глибини проникнення теплової хвилі (5).

Наведемо параметри λ , ρ і c для п'яти основних типів ґрунту (табл. 1.). Потім обчислимо α і, відповідно, δ .

Таблиця 1. Параметри теплопровідності, щільності й питомої теплоємності для п'яти основних типів ґрунту

Table 1. Parameters of thermal conductivity, density and specific heat capacity for five main soil types

Тип ґрунту	Параметри		
	Теплопровідність, λ Вт/(м·°C)	Щільність, ρ кг/м	Питома теплоємність, c Дж/(кг·°C)
Піщаний ґрунт	0,3	1600	800
Супісок	0,25	1500	850
Суглинок	0,4	1700	900
Глинистий ґрунт	0,5	1800	1000
Торф'яний ґрунт	0,2	1300	1500

Використовуючи значення параметрів теплопровідності, щільності й питомої теплоємності для кожного типу ґрунту, обчислимо температуропровідність α і глибину проникнення δ .

Приклад обчислення для піщаного ґрунту:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} = \frac{0,3}{1600 \cdot 800} = 2,34 \times 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}$$

Підставимо значення α та $\tau = 86\,400$ с у формулу для δ :

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot 2,34 \times 10^{-7} \cdot 86400}{\pi}} \approx 0,256 \text{ м}$$

Таким чином, для піщаного ґрунту добові коливання температури поширюються на глибину приблизно 0,256 м, аналогічно виконаємо розрахунок для інших типів ґрунту. Отримані данні зведено в табл. 2.

Таблиця 2. Глибина проникнення добової теплової хвилі для різних типів ґрунту

Table 2. Depth of penetration of daily heat wave for different soil types

№ п.п	Тип ґрунту	Температуропровідність, α (м ² /с)	Глибина проникнення, δ (м)
1	Піщаний ґрунт	$2,34 \times 10^{-7}$	0,256
2	Супісок	$1,96 \times 10^{-7}$	0,232
3	Суглинок	$2,61 \times 10^{-7}$	0,274
4	Глинистий ґрунт	$2,78 \times 10^{-7}$	0,284
5	Торф'яний ґрунт	$1,03 \times 10^{-7}$	0,179

З табл. 2 видно, що глибина проникнення добових коливань температури δ змінюється залежно від типу ґрунту. Як бачимо, найменша глибина проникнення спостерігається у вологому торф'яному ґрунті (0,179 м), а найбільша – у глинистому (0,284 м).

Якщо протягом усього дня йтиме дощ, це вплине на процес нагрівання і тепlopередачу в ґрунті. Дощ зазвичай охолоджує ґрунт, підвищує його вологість і може змінити теплопровідність ґрунту. Вологий ґрунт має більшу теплопровідність порівняно з сухим, що означає швидше поширення теплової хвилі, оскільки вода значно підвищує теплопровідність ґрунту.

Виконаємо розрахунок для глибини проникнення добових коливань температури для різних типів ґрунтів, враховуючи вищу теплопровідність, зумовлену проникненням води в ґрунт (табл. 3).

Таблиця 3. Параметри теплопровідності, щільності й питомої теплоємності для п'яти основних типів ґрунту з урахуванням проникнення води в ґрунт

Table 3. Parameters of thermal conductivity, density and specific heat capacity for five main soil types taking into account moisture penetration into the soil

Тип ґрунту	Параметри		
	Теплопровідність, λ Вт/(м·°C)	Щільність, ρ кг/м	Питома теплоємність, c Дж/(кг·°C)
Піщаний ґрунт	0,45	1600	800
Супісок	0,38	1500	850
Суглинок	0,6	1700	900
Глинистий ґрунт	0,75	1800	1000
Торф'яний ґрунт	0,3	1300	1500

Використовуючи значення параметрів теплопровідності, щільності й питомої теплоємності для кожного типу ґрунту, обчислимо температуропровідність α і глибину проникнення δ з урахуванням проникнення води в ґрунт використовуючи формули (5) та (6). Результати розрахунку занесемо в табл. 4.

Таблиця 4. Значення температуропровідності α й глибини проникнення температурної хвилі δ з урахуванням поширення води в ґрунт

Table 4. Values of thermal conductivity α and depth of penetration of temperature wave δ taking into account moisture spread into the soil

№ п.п	Тип ґрунту	Температуропровідність, α ($\text{м}^2/\text{с}$)	Глибина проникнення, $\delta_{\text{вологий}}$ (м)
1	Піщаний ґрунт	$3,52 \times 10^{-7}$	0,318
2	Супісок	$2,98 \times 10^{-7}$	0,292
3	Суглинок	$3,92 \times 10^{-7}$	0,336
4	Глинистий ґрунт	$4,17 \times 10^{-7}$	0,348
5	Торф'яний ґрунт	$1,54 \times 10^{-7}$	0,225

З порівняння значень глибини проникнення для сухого та вологого ґрунту можна зробити такі висновки, що вологий ґрунт має більшу теплопровідність, тому теплові хвилі проникають глибше, а також що дощ підвищує теплопровідність ґрунту і, відповідно, глибина проникнення добових коливань температури у вологий ґрунт зростає. Це означає, що при тривалих дощах температура ґрунту на більших глибинах зазнаватиме впливу поверхневих температурних коливань.

Рослинний покрив, такий як трава, створює додатковий шар, що впливає на проникнення теплової хвилі в ґрунт. Трава виконує функцію теплоізолятора, знижуючи кількість сонячної енергії, що досягає поверхні ґрунту, і змінюючи процес теплопередачі. Основні впливи рослинного покриву на глибину розповсюдження температурної хвилі такі. По-перше, трава затримує частину сонячного тепла, через що ґрунт прогривається менш інтенсивно. Це зменшує амплітуду коливань температури на поверхні ґрунту, що, відповідно, знижує глибину проникнення теплової хвилі. По-друге, рослинний покрив зменшує втрати тепла вночі, оскільки затримує частину тепла біля поверхні. Це зберігає температуру ґрунту стабільнішою. По-третє, рослинний покрив активно поглинає і випаровує воду, що додатково охолоджує ґрунт, особливо в спекотні дні. Це зменшує ефективну температуру на поверхні ґрунту.

Отже, для обчислення точної зміни глибини проникнення необхідно врахувати теплоізоляційний ефект трави. Зазвичай цей ефект враховується корекцією амплітуди температурних коливань на поверхні. Дослідження показують, що трав'яний покрив може знижувати амплітуду температурних коливань на поверхні ґрунту на 20–50 % залежно від густоти трави та її висоти.

Припустімо, що трава висотою 4 см зменшує амплітуду температурних коливань на поверхні на 30 %. Тоді амплітуда температури $A_{\text{пов}}$ на поверхні ґрунту зменшиться, що в свою чергу знизить глибину проникнення теплової хвилі.

Глибина проникнення теплової хвилі δ залежить від температуропровідності ґрунту α та періоду τ , однак наявність рослинного покриву змінює лише ефективну амплітуду, а не формулу глибини. У нашій ситуації зменшення амплітуди температурних коливань на поверхні на 30 % означатиме, що тепловий вплив на поверхні зменшується, відповідно, теплові коливання проникатимуть на меншу глибину. Для наочності наведемо результати у вигляді табл. 5, де глибина проникнення зменшена на 30 % для ґрунту, вкритого травою.

Таблиця 5. Розрахункові значення та глибини проникнення температурної хвилі δ з урахуванням типу ґрунту та зовнішніх умов

Table 5. Calculated values and depths of penetration of temperature wave δ taking into account soil type and external conditions

№ п.п	Тип ґрунту	Глибина проникнення, $\delta_{\text{сухий}}$ (м)	Глибина проникнення, $\delta_{\text{вологий}}$ (м)	Глибина проникнення, $\delta_{\text{покрита}}$ (м)
1	Піщаний ґрунт	0,256	0,318	0,223
2	Супісок	0,232	0,292	0,204
3	Суглинок	0,274	0,336	0,236
4	Глинистий ґрунт	0,284	0,348	0,243
5	Торф'яний ґрунт	0,179	0,225	0,157

З розрахункових даних видно, що за наявності трав'яного покриву глибина проникнення теплової хвилі зменшується приблизно на 30 % через ізолювальний ефект рослинного покриву. Це робить температуру ґрунту стабільнішою і менш схильною до добових коливань, що сприяє створенню стабільного температурного режиму на менших глибинах у ґрунті з травою.

Для розрахунку глибини проникнення сезонних коливань температури для різних типів ґрунтів з використанням формули глибини проникнення теплової хвилі, нам потрібно врахувати, що період сезонних коливань значно більший, ніж добових. Тому для розрахунку будемо використовувати формулу (5) за умови, що τ – (період коливань) для сезонних коливань дорівнює одному року, тобто 365 днів або 31 536 000 с.

Для розрахунку α і, відповідно, δ використаємо значення теплопровідності λ , щільності ρ і питомої теплоємності c для п'яти основних типів ґрунту наведених у табл. 1.

Результати розрахунку глибини проникнення сезонної теплової хвилі для різних типів ґрунту наведено в табл. 6.

Таблиця 6. Глибина проникнення сезонної теплової хвилі для різних типів ґрунту**Table 6. Depth of penetration of seasonal heat wave for different soil types**

№ п.п	Тип ґрунту	Температуро- провідність, α (м ² /с)	Глибина проникнення, δ (м)
1	Піщаний ґрунт	$2,34 \times 10^{-7}$	3,13
2	Супісок	$1,96 \times 10^{-7}$	2,82
3	Суглинок	$2,61 \times 10^{-7}$	3,44
4	Глинистий ґрунт	$2,78 \times 10^{-7}$	3,57
5	Торф'яний ґрунт	$1,03 \times 10^{-7}$	2,11

Таким чином сезонні коливання температури мають істотно більший вплив на глибші шари ґрунту порівняно з добовими коливаннями. У типових ґрунтах вплив сезонних температурних змін може відчуватися на глибині до 3,6 м, залежно від типу ґрунту і його температуропровідності.

Якщо ми врахуємо конвективну складову теплопередачі, пов'язану з рухом води у вологому ґрунті, глибина проникнення теплової хвилі суттєво збільшиться. Це пов'язано з тим, що рух води сприяє швидшій передачі тепла в глибші шари ґрунту, додаючи до звичайної теплопровідності ефект переносу тепла через конвекцію.

Конвекція виникає, коли вода (волога) рухається крізь пори ґрунту, переносячи тепло. Вологий ґрунт при цьому передає тепло за рахунок: по-перше, теплопровідності ґрунту (як у сухому ґрунті); по-друге, конвекції через рух води – додаткова складова, що виникає завдяки руху води в пористому середовищі.

Загальне рівняння теплопередачі з урахуванням конвекції можна записати так:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c v \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (7)$$

де:

v – швидкість руху води в ґрунті (м/с), інші змінні мають ті самі значення, що й раніше.

Конвективна складова $\rho c v \frac{\partial T}{\partial z}$ прискорює теплопередачу, оскільки тепло переноситься разом із рухом води, що значно знижує час досягнення температурою глибинних шарів ґрунту.

Для оцінки того, як конвекція збільшує глибину проникнення теплової хвилі, ми можемо скористатися приблизним методом.

З урахуванням конвекції, температуропровідність ґрунту α зростає, і її можна оцінити як:

$$\alpha_{\text{ефф}} = \alpha + \frac{v \cdot c_{\text{води}}}{\rho \cdot c_{\text{ґрунту}}} \quad (8)$$

де:

$c_{\text{води}}$ – питома теплоємність води (4182 Дж/(кг·°C));

v – швидкість руху води (наприклад, для повільного фільтраційного потоку може бути в межах 10^{-6} м/с, але змінюється залежно від вологості й складу ґрунту).

Використовуючи підвищене значення $\alpha_{\text{ефф}}$, можна повторити розрахунок глибини проникнення теплової хвилі для кожного типу ґрунту.

Припустімо:

температуропровідність $\alpha = 2,34 \times 10^{-7}$ м²/с для сухого ґрунту;

швидкість руху води $v = 10^{-6}$ м/с.

Розрахуємо $\alpha_{\text{ефф}}$:

$$\alpha_{\text{ефф}} = 2,34 \times 10^{-7} + \frac{10^{-6} \cdot 4182}{1600 \cdot 800} \approx 3,63 \times 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}.$$

Розрахуємо глибину проникнення $\delta_{\text{ефф}}$ для сезонних коливань ($\tau = 31\,536\,000$ с):

$$\delta_{\text{ефф}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3,63 \times 10^{-7} \cdot 31\,536\,000}{\pi}} \approx 4,12 \text{ м}$$

Аналогічно виконано розрахунок для інших типів ґрунту, й результати зведено в табл. 7.

Таблиця 7. Глибина проникнення сезонної теплової хвилі для різних типів ґрунту з урахуванням конвекції**Table 7. Depth of penetration of seasonal heat wave for different soil types taking into account convection**

Тип ґрунту	Параметри		
	Температуро- провідність, α (м ² /с)	Температуро- провідність, α (м ² /с)	Глибина проникнення, δ (м)
Піщаний ґрунт	$2,34 \times 10^{-7}$	$3,63 \times 10^{-7}$	4,12
Супісок	$1,96 \times 10^{-7}$	$3,25 \times 10^{-7}$	3,84
Суглинок	$2,61 \times 10^{-7}$	$3,9 \times 10^{-7}$	4,26
Глинистий ґрунт	$2,78 \times 10^{-7}$	$4,05 \times 10^{-7}$	4,34
Торф'яний ґрунт	$1,03 \times 10^{-7}$	$2,32 \times 10^{-7}$	3,2

Отже, вологий ґрунт завдяки руху води передає теплоту на більші глибини, ніж сухий ґрунт, через додатковий конвективний перенос теплоти. Це слід враховувати у розрахунках сезонного впливу температури в умовах підвищеної вологості.

Висновки

Добові коливання температури в більшості типових ґрунтів поширюються на глибину приблизно від 0,18 до 0,28 м. Ці результати дають уявлення про те, на якій глибині ґрунт залишається відносно стабільним, незважаючи на добові коливання температури поверхні.

Сезонні коливання температури мають істотно більший вплив на глибші шари ґрунту порівняно з добовими коливаннями. У типових ґрунтах вплив сезонних температурних змін може відчуватися на глибині до 5 м, залежно від типу ґрунту і його теплопровідності.

Вологий ґрунт завдяки руху води передає тепло на більші глибини, ніж сухий ґрунт, через додатковий конвективний перенос тепла. Це слід враховувати у розрахунках сезонного впливу температури в умовах підвищеної вологості.

Аналітично обґрунтовано, що зміни температури ґрунту залежать від рослинного покриву ґрунту, характеру та висоти його протягом року. За наявності трав'яного покриву глибина проникнення теплової хвилі зменшується приблизно на 30 % через ізолювальний ефект рослинного покриву. Це робить температуру ґрунту стабільнішою і менш схильною до добових коливань, що сприяє створенню стабільного температурного режиму на менших глибинах у ґрунті з травою.

Мають перспективу подальші дослідження щодо складання математичної моделі поширення температурної хвилі, що враховує рух теплоти не тільки по вертикалі, а й по латералі з урахуванням конвективної складової.

ПОСИЛАННЯ

- Безродний М. К., Пуховий І. І., Кутра Д. С. Теплові насоси та їх використання: навч. посіб. К.: НТУУ «КПІ». 2013. 312 с.
- Долинський А. А., Драганов Б. Х. Тепловые насосы в системе теплоснабжения зданий. Промышленная теплотехника. 2008. Т. 30. № 6. С. 71–83.
- Кудря С. О. Відновлювані джерела енергії. К.: ІБЕ НАН України. 2020. 354 с.
- Lund J., Sanner B., Rybach L., Curtis R., Hellstrom G. Geothermal (ground-source) heat pumps a world overview. *GHC bulletin*. 2004. Vol. 9. Pp. 1–10.
- Морозов Ю. П., Чалаєв Д. М., Ніколаєвська Н. В., Добровольський М. П. Оцінка ефективності використання теплового потенціалу довкілля та верхніх шарів Землі України. *Відновлювана енергетика*. 2019. № 4(63). С. 80–88. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4\(63\).80-88](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4(63).80-88)
- Zhu Ke, Blum Philipp, Ferguson Grant, Balke Klaus-Dieter, Bayer Peter. The geothermal potential of urban heat islands. 2010. *Environ. Res. Lett.* No. 5. Pp. 1–6. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/6/1/019501>
- Морозов Ю. П., Зур'ян О. В. Аналітичний розрахунок глибини поширення температурної хвилі при побудові геотермальних теплонасосних систем. *Відновлювана енергетика*. 2023. № 3. С. 127–140. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3\(74\).127-140](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3(74).127-140)
- Zurian O. V. Comparison of efficiency of geothermal and hydrothermal energy systems. XIX International Multi-disciplinary 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>
- Малкін Е. С., Кулінко Є. О. Перспективи та аспекти застосування систем теплохолодопостачання, які використовують приповерхневі шари води в якості теплового акумулятора. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. 2014. № 17. С. 63–69.
- Denisov O. I. Comparative energy analysis of heat pumps and traditional heating systems. *Tehnicheskaya teplofizika i promyshlennaya teploenergetika. Ukraine*. 2010. Vol. 2. Pp. 22–34.
- Bayer P., Saner D., Bolay S., Rybach L., Blum P. Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. № 16. 1256–1267. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.027>
- Зур'ян О. В., Олійніченко В. Г. Гідротермальна система отримання теплової енергії, фізичні процеси, ефективність. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2021. № 4. С. 40–46. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-157-4-40-46>
- Goshovskiy S., Zurian O. Human-induced load on the environment when using geothermal heat pump wells. *Journal of Geology, Geography and Geocology*. 2020. Vol. 29. No. 1. Pp. 57–68. <https://doi.org/10.15421/112006>
- Зур'ян О. В. Експериментальні дослідження теплового режиму гідротермальної теплонасосної системи. *Відновлювана енергетика*. 2021. № 4(67). С. 77–89. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4\(67\).77-89](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4(67).77-89)
- Морозов Ю. П., Чалаєв Д. М., Олійніченко В. Г., Величко В. В. Експериментальне дослідження добового акумулювання холоду шляхом використання води підземних горизонтів м. Києва. *Відновлювана енергетика*. 2019. № 3. С. 67–77. [https://doi.org/10.36296/1819-058.2019.3\(58\).67-77](https://doi.org/10.36296/1819-058.2019.3(58).67-77)
- Глибина промерзання ґрунту. Website. URL: <https://royalbud.com.ua/blog/glubina-promerzaniya-grunta>
- Морозов Ю. П. Видобування геотермальної енергії: монографія. К.: ІБЕ НАНУ. 2022. 245 с

REFERENCES

1. Bezrodnyi M. K., Pukhovyi I. I., Kutra D. S. Teplovi nasosy ta yikh vykorystannia. [Heat pumps and their use]: navch. posib. K.: NTUU «KPI». 2013. 312 s.
2. Dolynskiy A. A., Drahanov B. Kh. Teplovye nasosy v sisteme teplosnabzheniya zdaniy. [Heat pumps in the heat supply system are installed] Promishlennaia teplotekhnika. 2008. T. 30. № 6. C. 71–83.
3. Kudria S. O. Vidnovliuvani dzherela enerhii. [Renewable energy sources]. Kyiv: IVE NAN Ukrainy. 2020. 354 c.
4. Lund J., Sanner B., Rybach L., Curtis R., Hellstrom G. Geothermal (ground-source) heat pumps a world overview. GHC bulletin. 2004. Vol. 9. Pp. 1–10.
5. Morozov Yu. P., Chalaiev D. M., Nikolaievskia N. V., Dobrovolskyi M. P. Otsinka efektyvnosti vykorystannia teplovoho potentsialu dokillia ta verkhnikh shariv Zemli Ukrainy. [Evaluation of the effectiveness of the use of the thermal potential of the environment and the upper layers of the Earth of Ukraine]. Vidnovliuvana enerhetyka. 2019. № 4(63). C. 80–88. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4\(63\).80-88](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4(63).80-88)
6. Zhu Ke, Blum Philipp, Ferguson Grant, Balke Klaus-Dieter, Bayer Peter. The geothermal potential of urban heat islands. 2010. Environ. Res. Lett. No. 5. Pp. 1–6. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/6/1/019501>
7. Morozov Yu. P., Zurian O. V. Analichnyi rozrakhunok hlybiny poshyrennia temperaturnoi khvyli pry pobudovi heotermalnykh teplonasosnykh system. [Analytical calculation of the temperature wave propagation depth in the construction of geothermal heat pump systems]. Vidnovliuvana enerhetyka. 2023. № 3. C. 127–140. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3\(74\).127-140](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3(74).127-140)
8. Zurian O. V. Comparison of efficiency of geothermal and hydrothermal energy systems. XIX International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. Renewable Energy Sources and Clean Tech. Varna. Bulgaria. 2019. C. 83–90. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/4.1/S17.011>
9. Malkin E. S., Kulinko Ye. O. Perspektyvy ta aspekty zastosuvannia system teplokhodopostachannia, yaki vykorystovuiut prypoverkhnevi shary vody v yakosti teplovoho akumulatora. [Prospects and aspects of the application of heat and cold supply systems that use near-surface layers of water as a heat accumulator]. Ventyliatsiia, osvillennia ta teplohapostachannia. 2014. № 17. C. 63–69.
10. Denisov O. I. Comparative energy analysis of heat pumps and traditional heating systems. Tehnicheskaya teplofizika i promyshlennaya teploenergetika. Ukraine. 2010. Vol. 2. Pp. 22–34.
11. Bayer P., Saner D., Bolay S., Rybach L., Blum P. Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. № 16. Pp. 1256–1267. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.027>
12. Zurian O. V., Oliinichenko V. H. Hidrotermalna systema otrymannia teplovoi enerhii, fizychni protsesy, efektyvnist. [Hydrothermal system for obtaining thermal energy, physical processes, efficiency]. Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. 2021. № 4. C. 40–46. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-157-4-40-46>
13. Goshovskiy S., Zurian O. Human-induced load on the environment when using geothermal heat pump wells. Journal of Geology, Geography and Geoecology. 2020. Vol. 29 No. 1 C. 57–68. <https://doi.org/10.15421/112006>
14. Zurian O. V. Eksperymentalni doslidzhennia teplovoho rezhymu hidrotermalnoi teplonasosnoi systemy. [Experimental studies of the thermal regime of the hydrothermal heat pump system]. Vidnovliuvana enerhetyka. 2021. No. 4(67). C. 77–89. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4\(67\).77-89](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4(67).77-89)
15. Morozov Yu. P., Chalaie D. M., Olynichenko V. G., Velichko V. V. Eksperymentalne doslidzhennia dobovoho akumuluvannia kholodu shliakhom vykorystannia vody pidzemnykh horyzontiv m. Kyieva. [Experimental study of daily accumulation of cold by using water from the underground horizons of the city of Kyiv]. Renewable energy. 2019. No. 3. Pp. 67–77. [https://doi.org/10.36296/1819-058.2019.3\(58\).67-77](https://doi.org/10.36296/1819-058.2019.3(58).67-77)
16. Hlybina promerzannia gruntu [Depth of soil freezing]. Website. URL: <https://royalbud.com.ua/blog/glybina-promerzaniya-grunta>
17. Morozov Yu. P. Vydobuvannia heotermalnoi enerhii: monohrafiia. [Extraction of geothermal energy]. Kyiv: IVE NANU. 2022. 245 s.