

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОПЕРЕНОСУ В ҐРУНТІ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ

Протектор Денис Олегович, доктор філософії, доцент кафедри інформаційних технологій в фізико-енергетичних системах, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, e-mail: d.protector@karazin.ua, ORCID: [0000-0003-3323-7058](https://orcid.org/0000-0003-3323-7058)

Топонен Дар'я Олександрівна, студентка, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, e-mail: toponendasha1509@gmail.com

Гарячевська Ірина Василівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій в фізико-енергетичних системах, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, e-mail: i.garyachevskaya@karazin.ua, ORCID: [0000-0002-4630-9519](https://orcid.org/0000-0002-4630-9519)

Кокодій Микола Григорович, доктор фізико-математичних наук, професор кафедри інформаційних технологій в фізико-енергетичних системах, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, e-mail: mkokodiy@karazin.ua, ORCID: [0000-0003-1325-4563](https://orcid.org/0000-0003-1325-4563)

Удосконалення та розвиток технологій енергозбереження дає змогу відмовитися або значно скоротити використання вуглеводневої сировини. Одним із напрямів розвитку відновлювальних джерел енергії є геотермальні теплові насоси. Геотермальний тепловий насос – це пристрій, який використовує низькопотенційну теплову енергію ґрунту для обігріву або охолодження будинку.

Актуальність використання геотермальних теплових насосів зумовлена низкою чинників. По-перше, зростаюча вартість енергоресурсів та постійний тиск на зменшення викидів CO₂ в атмосферу змушують більшість країн шукати енергоефективні та екологічно чисті рішення для опалення та охолодження приміщень. По-друге, розвиток технологій у сфері геотермальних систем дозволяє знижувати вартість встановлення та експлуатації геотермальних теплових насосів. Це робить їх більш доступними для широкого кола споживачів і сприяє їх широкому поширенню. По-третє, геотермальні теплові насоси відзначаються високою надійністю та довговічністю, що робить їх привабливими в інвестиційному плані. Можливість отримання стабільного та ефективного джерела тепла протягом тривалого часу робить ці системи вигідними як для приватних, так і для комерційних об'єктів.

Принцип дії геотермального теплового насоса полягає в наступному (Рис. 1). Теплоносій (антифриз, пропіленгліколь або етиленгліколь), який за допомогою циркуляційного насоса, циркулює по ґрунтовому колектору, поглинає низькопотенційне тепло ґрунту. Ця теплова енергія передається холодоагенту з дуже низькою температурою закипання, який у випаровувачі перетворюється на пару. Компресор стискає пару, яка утворилася, що призводить до підвищення її температури. Далі холодоагент потрапляє в конденсатор, де він

охладжується і конденсується. Через дросельний клапан холодоагент потрапляє назад у випаровувач, і цикл повторюється знову.

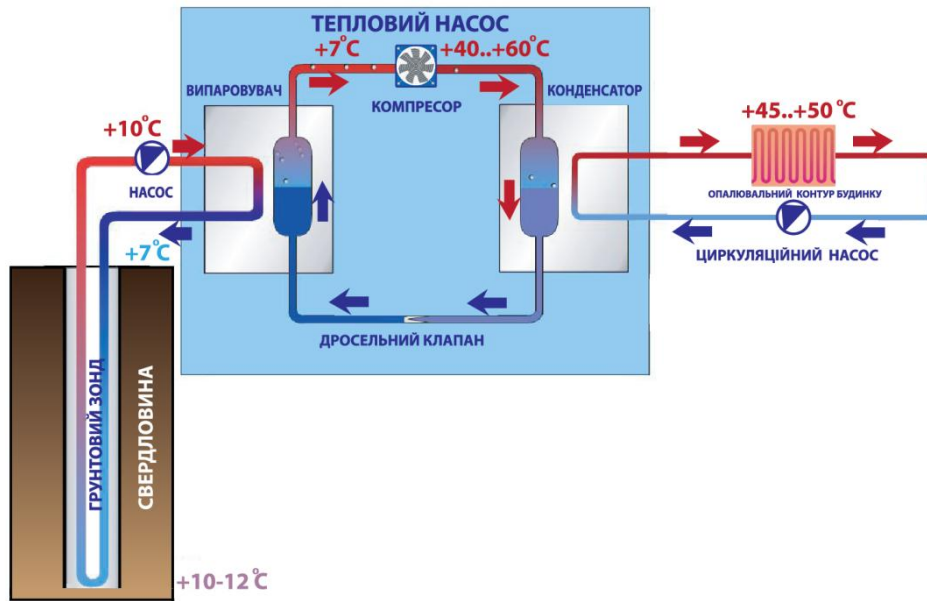


Рисунок 1 – Схема роботи геотермального теплового насоса

В процесі роботи геотермального теплового насоса відбувається теплообмін між ґрунтовим колектором і ґрунтом, який прилягає до нього. Перепади температури ґрунту поблизу колектора, а саме його надмірне охолодження або нагрівання, негативно впливає на роботу геотермального теплового насоса. У зв'язку з чим, актуальним і перспективним завданням є дослідження теплових процесів, які протікають в ґрунті при використанні геотермальних теплових насосів для подальшої оптимізації конструкції теплообмінників.

Метою даної роботи є моделювання нестационарних теплових процесів, які протікають в ґрунті при використанні геотермальних теплових насосів з різними схемами укладання ґрунтового колектора.

В роботі розглядається дві схеми укладання ґрунтового колектора: горизонтальний та спіральний. Геометрична область крайової задачі, яка являє собою ґрунтовий масив, в обох випадках, має форму прямокутного паралелепіпеда (Рис. 2).

На глибині h розглянутої області розташовується ґрунтовий колектор з циркулюючим теплоносієм (див. Рис. 2). Глибина залягання горизонтального колектора становить 2 м, а глибина залягання спірального колектора – 1 м.

Розміри геометричної області крайової задачі обираються таким чином, щоб процеси теплопереносу між колектором і ґрунтом мінімально впливали на температуру на границях розрахункової області. У випадку горизонтального колектора розміри геометричної області крайової задачі становлять $16 \times 16 \times 4$ м, у випадку спірального колектора – $2 \times 2 \times 5.5$ м.

Фізичні характеристики ґрунту: щільність $\rho = 1700$ кг/м³; теплопровідність $k = 1$ Вт/(м×К); питома теплоємність при постійному тиску $c_p = 2010$ Дж/(кг×К).

У випадку горизонтального колектора температура ґрунту обиралась однаковою і становила 8 °С. У випадку спірального колектора температура ґрунту змінювалась лінійно вздовж координатної осі z в діапазоні від 0 °С (на поверхні ґрунту) до 10 °С (на глибині 5.5 м).

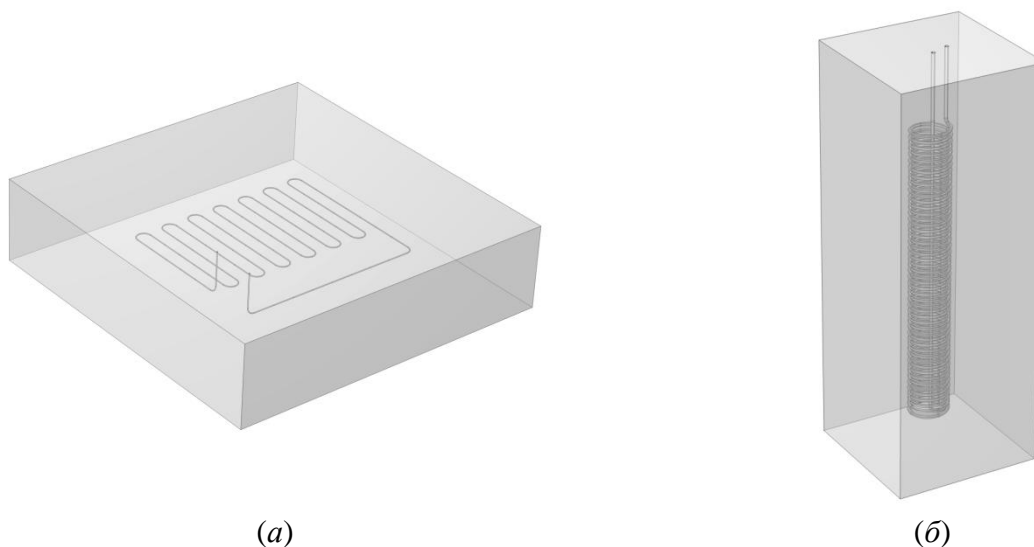


Рисунок 2 – Візуалізація геометричної області крайової задачі:
(а) – горизонтальний колектор, (б) – спіральний колектор

Геометричні розміри ґрунтового колектора: довжина колектора – 111 м, діаметр труби – 0.05 м. Температура теплоносія на вході в ґрунтовий колектор становить 1 °С, а на виході становить 6 °С.

Рівняння нестационарної теплопровідності для твердих тіл має наступний вигляд [1]:

$$\rho c_p \frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}(k \text{ grad}(u)), \quad (1)$$

де ρ – щільність; c_p – питома теплоємність при постійному тиску; $u = u(x, y, z, t)$ – температура; k – коефіцієнт теплопровідності.

Для його розв'язання на поверхні ґрунтового масиву повинні бути задані граничні умови. Оскільки межі ґрунтового масиву, в обох випадках, віддалені від ґрунтового колектора, то граничні умови на них можуть наближено вважатися умовами теплоізоляції:

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0. \quad (2)$$

Для числового розв'язання даної крайової задачі використовується метод скінченних елементів [2].

Часовий інтервал, на якому розв'язується задача нестационарної теплопровідності, становить 24 години з кроком 6 хвилин.

На Рис. 3 представлені результати числових розрахунків розподілу температурного поля в усьому об'ємі ґрунтового масиву в момент часу $t = 24$ год.

На Рис. 4 представлені результати числових розрахунків розподілу температурного поля всередині ґрунтового масиву в момент часу $t = 24$ год.

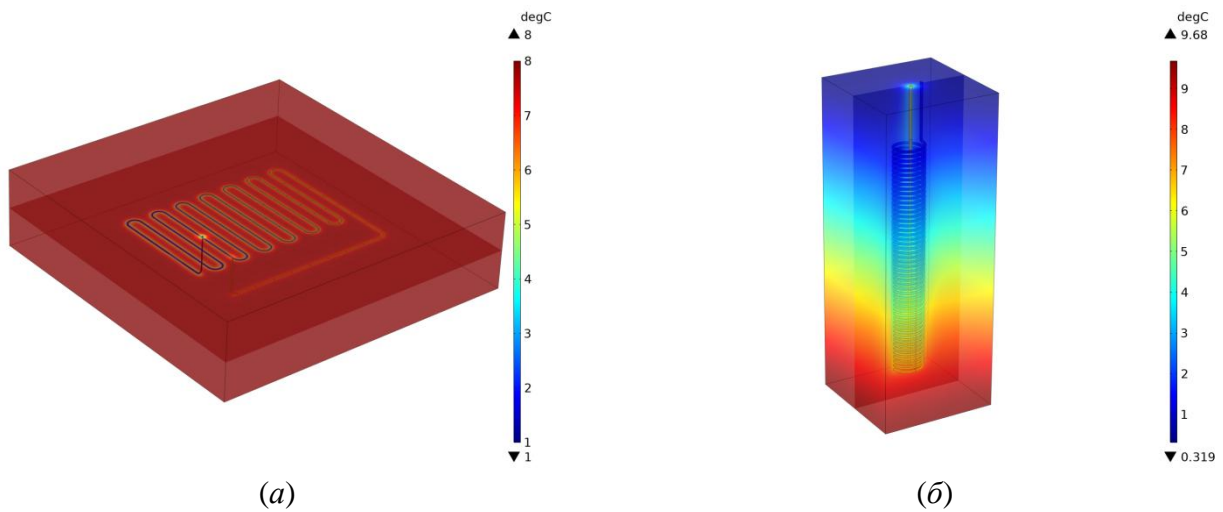


Рисунок 3 – Візуалізація розподілу температурного поля в усьому об'ємі ґрунтового масиву в момент часу $t = 24$ год.: (а) – горизонтальний колектор, (б) – спіральний колектор

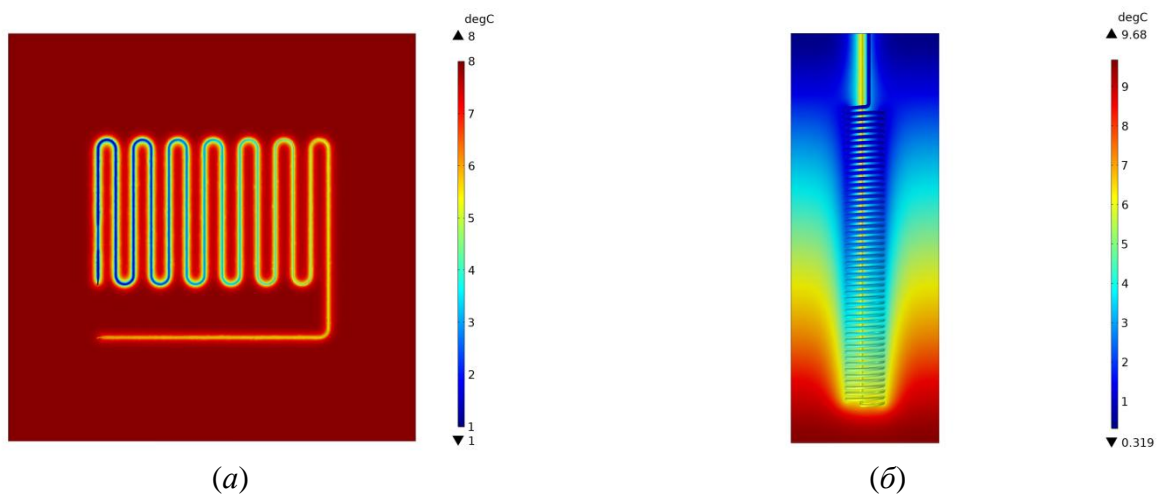


Рисунок 4 – Візуалізація розподілу температурного поля всередині ґрунту в момент часу $t = 24$ год.: (а) – горизонтальний колектор, (б) – спіральний колектор

Висновки

В роботі представлені результати моделювання теплових процесів в ґрунті, які виникають при використанні геотермальних теплових насосів з різними схемами укладання ґрунтового колектора. Визначено розподіл температурного поля в ґрунтовому масиві навколо горизонтального та спірального ґрунтового колектора.

Література

1. Protector, D.O., Kolodyazhny, V.M., Lisin, D.O. and Lisina, O.Yu. (2021). A Meshless Method of Solving Three-Dimensional Nonstationary Heat Conduction Problems in Anisotropic Materials. *Cybernetics and Systems Analysis*. **57**, 470-480. doi: <https://doi.org/10.1007/s10559-021-00372-8>
2. Reddy J. N. Introduction to the Finite Element Method, 4th ed. New York, 2019. 816 p.

INTELLIGENT ROAD TRANSPORT SYSTEMS

Bazhynov Oleksiy, Professor of the Department of Technical Operation and Service of Vehicles, Kharkiv National Automobile and Highway University,

e-mail: alexey.bazhinov@gmail.com ORCID [0000-0002-5755-8553](https://orcid.org/0000-0002-5755-8553)

Kateryna Kravchenko, Department of Transport and Handling Machines, University of Zilina, Zilina, Slovakia,

e-mail: kateryna.kravchenko@fstroj.uniza.sk ORCID [0000-0002-3775-6288](https://orcid.org/0000-0002-3775-6288)

In order to solve transport problems, it is advisable to introduce intelligent systems into the process of controlling the movement of transport in large settlements, the use of which will reduce the level of congestion on highways and increase their capacity, and optimise the use of road transport.

Intelligent systems allow for the creation of conditions for interaction with individual road vehicles or with traffic flow using information and communication technologies, as well as with road transport infrastructure.

Information and communication technologies are used to solve the following tasks: increasing the mobility of people and controlling the transportation of passengers and goods (by collecting, transmitting, processing and receiving information about the traffic process); organizing feedback in global transport systems (based on quantitative assessment of the results of practical observations of traffic flows); controlling the quality of transport services (safety, efficiency and environmental friendliness); expanding opportunities to meet the growing demand for cargo and passenger transportation.

The scope and level of saturation of vehicles with automation components depends on their purpose and the required level of vehicle traffic control and workflow management. The automation system is a complex of sensors and receivers of radiation of various types and ranges that can be installed on almost any wheeled vehicle before it is converted into an unmanned vehicle. The vehicle is controlled based on commands generated from the data of functional systems.

In recent years, the automotive industry has paid great attention to automation. As a rule, this refers to the creation of local automatic systems, such as automatic fuel injection and turbo charging devices, automatic transmissions, anti-lock braking systems, etc. However, the amount of information coming from individual functional