

MODELING THE TEMPERATURE FIELD IN THE SOIL MASSIF

O. Zolotovska*, H. Tesliuk, V. Boiko

Dnipro State Agrarian and Economics University, Dnipro, Ukraine



ABSTRACT

The ever-increasing cost of energy resources, especially fossil fuels, makes it necessary to find new ways of generating energy. In the field of energy and energy saving, new methods of energy production are being researched and developed. In particular, traditional production methods are being improved, resource-saving processes are being developed, equipment efficiency is being increased and renewable energy sources are being used. One effective method of saving fuel and protecting the environment is the widespread use of heat pumps. Heat pumps can play an important role in the use of renewable energy sources, especially in agriculture. The article presents the results of the study of the temperature field in the soil massif around the soil heat exchanger using a heat pump. An increase in heat productivity is ensured by reducing the temperature difference of the heat carrier in the soil heat exchanger and in the evaporator. Therefore, an additional heat source selected from the heat supply system is proposed. The reduction of the temperature range between the evaporator and the coolant from the soil heat exchanger is also influenced by: the temperature of the soil layers; the heat flow in the soil; the distance between the boreholes at which the energy potential of the soil mass is maintained. The process of adding (removing) heat from a low potential energy source is a function of time and space. The temperature field is formed from the geometric center – the axis of the borehole. A well and a low-potential heat source is a complex calculation object and is characterized by variable boundary conditions. Therefore, the solution of this problem is performed using an implicit difference scheme and a volume control method with a shifted grid. The article calculates the temperature field of multi-layered soil massifs with different coolant temperatures, taking into account the thermos-physical parameters of the soil around the borehole. This technique can also be used to predict the thermal regime of the soil, which makes it possible to control the accumulation of heat around the soil heat exchanger.

Key words:

soil,
heat source,
pump,
soil heat exchanger,
heat output

Article history:

Received 10.05.2023

Accepted 09.06.2023

***Corresponding author:**

zolotovska.o.v@dsau.dp.ua

DOI: 10.36910/acm.vi49.1021

To cite this article:

Zolotovska, O., Tesliuk, H., & Boiko, V. (2023). Modeling the temperature field in the soil massif. *Agricultural Machines*, 49, 60-67. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1021>

УДК 662.9

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ҐРУНТОВОМУ МАСИВІ

О.В. Золотовська*, Г.В. Теслюк, В.Б. Бойко

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Дніпро, Україна

AGRICULTURAL MACHINES



АНОТАЦІЯ

Постійне зростання вартості енергоресурсів, зокрема викопного палива, спричиняє необхідність пошуку нових способів виробництва енергії. Ефективний метод економії палива та захисту навколишнього середовища полягає в широкому використанні теплонасосних установок. Теплові насоси можуть відіграти вирішальну роль у використанні відновлювальних джерел енергії, зокрема в сільському господарстві. В статті подані результати дослідження температурного поля в ґрунтовому масиві навколо ґрунтового теплообмінника з використанням теплового насоса. Підвищення теплопродуктивності забезпечується внаслідок зменшення різниці температур теплоносія в ґрунтовому теплообміннику та у випарнику. Тому запропоноване додаткове джерело тепла, яке відбирається з системи теплопостачання. Також на зменшення діапазону температур між випарником та теплоносієм з ґрунтового теплообмінника впливають: температура шарів ґрунту; тепловий потік ґрунту; відстань між свердловинами, за якої зберігатиметься енергетичний потенціал масиву ґрунту. Процес підведення (відведення) тепла в низькопотенційне джерело енергії є функцією часу та простору. Температурне поле формується від геометричного центру – осі свердловини. Свердловина та низькопотенційне джерело теплоти є складним комплексним об'єктом розрахунку та характеризується змінними граничними умовами. Тому розв'язування цієї задачі виконується з використанням неявної різницевої схеми та методу контролю об'єму зі зміщеною сіткою. У статті подані результати обчислення температурного поля багатошарових ґрунтових масивів з різними температурами теплоносія, під час яких враховані теплофізичні параметри ґрунту навколо свердловини. Ця методика також може бути використана для прогнозування термічного режиму ґрунту, що дозволяє контролювати накопичення теплоти навколо ґрунтового теплообмінника.

Ключові слова:

ґрунт,
джерело тепла,
тепловий насос,
ґрунтовий теплообмінник,
теплопродуктивність

Історія публікації:

Отримано 10.05.2023

Затверджено 09.06.2023

***Автор для листування:**

zolotovska.o.v@dsau.dp.ua

DOI: 10.36910/acm.vi49.1021

Цитувати цю статтю:

Золотовська, О. В., Теслюк, Г. В., & Бойко, В. Б. (2023). Моделювання температурного поля в ґрунтовому масиві. *Сільськогосподарські машини*, 49, 60-67. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1021>

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Зростання вартості енергетичних ресурсів, зокрема викопного палива, спричиняє пошук нових способів виробництва енергії. У галузі енергетики та енергозбереження проводиться розроблення нових методів виробництва енергії, удосконалюються традиційні методи виробництва, розробляються енергозберігаючі процеси, підвищується ефективність роботи обладнання, використовуються відновлювальні джерела енергії. Розв'язати важливу проблему здешевлення енергоресурсів можна шляхом використання енергії сонця, вітрової енергії, геотермальної та інших видів енергії. Це дозволить зекономити матеріальні ресурси та мінімізувати забруднення навколишнього середовища.

Ефективний метод економії палива та захисту навколишнього середовища полягає у використанні теплонасосних установок, які дозволяють з мінімальними витратами комплексно розв'язувати нагальні проблеми енергозбереження. У перспективі теплові насоси (ТН) можуть відіграти вирішальну роль у використанні відновлювальних джерел енергії, зокрема в сільському господарстві. Теплонасосна установка (ТНУ) ефективно трансформує електроенергію в теплову енергію. Використання ТНУ може забезпечити значну економію палива порівняно з використанням палива в котельнях.

Особливий інтерес поміж споживачів викликає використання низькопотенційної теплоти ґрунту. Перевагою цього джерела є повсюдна доступність та відносно постійна температура. Системи теплопостачання з використанням теплоти ґрунту, зокрема на основі парокомпресійних теплових насосів, набувають широкого поширення в країнах, для яких актуальними є проблема збереження енергії і енергетична безпека. Їх застосування дозволяє частково відмовитися від дорогого імпортованого викопного палива, замінивши його споживання відновлюваною і екологічно чистою теплою ґрунту. Проте, в Україні напрям використання теплоти ґрунту не знайшов широкого розвитку.

Способи підвищення ефективності ТНУ висвітлені в наукових працях (Голуб & Кепко, 2002; Нікулішин & Височин, 2014; Босий & Кузик, 2020), де проведено обчислення параметрів ТНУ. Необхідно зауважити, що в

цих наукових працях розглянуто розрахунки статичних характеристик ТН, незалежно від характеристик споживача і джерела вторинної енергії. У наукових джерелах виконано аналіз перспектив використання геотермальної енергії ТНУ та досліджено ефективність роботи гідротермальної теплонасосної системи шляхом обґрунтування термодинамічних та техніко-економічних характеристик ТНУ (Ткачук, 2015; Зур'ян & Олійніченко, 2021).

Проведені теоретичні розрахунки та експериментальні дослідження ефективності теплонасосних систем дозволяють встановити зв'язок між параметрами первинного джерела низькопотенційного тепла та конструктивними особливостями системи теплопостачання. У науковій праці (Горобець & Яценко, 2014) подано результати дослідження процесів аеродинаміки та температурного поля в системах опалення, що дозволяють визначити максимальні та мінімальні швидкості руху повітря та його температуру.

Відомо досить мало інформації щодо накопичення теплоти в ґрунті для використання ґрунтових теплообмінників в системі теплового насосу. Тепловий режим ґрунту поверхневих шарів планети формується під дією двох основних факторів: сонячної радіації та потоку радіогенного тепла із надр планети. Сезонні та добові зміни інтенсивності сонячної радіації та температури зовнішнього повітря спричиняють коливання температури верхніх шарів ґрунту. Глибина впливу добових коливань температури зовнішнього повітря та сонячної радіації, залежно від конкретних ґрунтово-кліматичних умов, коливається в межах від декількох десятків сантиметрів до 1,5 м. Глибина впливу сезонних коливань температури зовнішнього повітря та сонячної радіації не перевищує, як правило, 15–20 м.

Мета дослідження – обґрунтування підвищення ефективності використання ТНУ з ґрунтовими теплообмінниками для потреб теплозабезпечення в сільському господарстві (наприклад, опалення ферм, адміністративних та житлових приміщень, теплиць, сушіння сільськогосподарських культур тощо).

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Теоретичні дослідження базуються на методах теплофізики, математичної фізики та тепломасообміну, які охоплюють основи

теплопровідності в нестационарному режимі. Ці дослідження є складним комплексним об'єктом розрахунку, що характеризується змінними граничними умовами.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

На сьогодні актуальним завданням є пошук альтернативи викопному паливу. Науковцями досліджується можливість заміни газових котлів теплонасосними установками.

Теплове навантаження залежить як від температури навколишнього середовища, так і від теплоти ґрунту. ТН в холодну пору року працюють на максимальному навантаженні. Водночас, збільшується перепад температури між теплоносієм та джерелом тепла, що спричиняє збільшення затрат енергії в ТН. Очевидно, що систему теплопостачання котельні з'єднують для догріву теплоносія з тепловими насосами. Тому пропонується дослідження ТН з використанням додаткового тепла із тепломережі, що дозволить підтримати температуру теплоносія. Якщо розглядати варіанти схем теплопостачання, то постає питання вибору конструкції ТН та джерела теплоти з необхідним діапазоном температур. Схема цієї системи містить три взаємопов'язані контури: 1 – первинний контур (система ґрунтових теплообмінників); 2 – ТН; 3 – споживач. На ефективність цієї системи впливають параметри джерела тепла (температура й теплофізичні властивості ґрунту) і ґрунтових теплообмінників (розміри, властивості матеріалів, режим течії теплоносія), які до того ж є однією з найбільш витратних складових усієї системи (Ткаченко & Остапенко, 2009). Ця особливість вимагає розроблення підходу, що дозволить оцінити ґрунтові теплообмінники. ТН є сполучною ланкою між джерелом та споживачем тепла і призначений для підвищення потенціалу теплоти ґрунту. Для точного аналізу системи потрібен достовірний аналіз контуру ТН. Споживачем тепла можуть бути: технологічні комплекси, системи гарячого водопостачання та опалення.

Функціонування контуру ТН є складним процесом спільної роботи теплообмінної апаратури контуру (випарника, конденсатора, теплообмінних апаратів), компресорного обладнання і терморегулюючого вентиля.

Для детального аналізу роботи контуру ТН необхідно враховувати параметри в характерних точках циклу, характеристики компресора, процеси нагрівання, охолодження і фазових переходів у теплообмінних апаратах контуру. У випарнику ТН холодоагент у джерела теплоти з температурою до 10°C забирає необхідне для випаровування тепло. У компресорі пар холодоагенту стискається до 30 бар та надходить в конденсатор. При цьому досягається температура до 75°C і віддається тепло теплоносію споживача. Із тепломережі, як додаткове джерело теплоти, відбирається частина теплової енергії та подається в пластинчатий теплообмінник, який працює за принципом «протитоку» із раціональним використанням енергії. Після цього холодоагент надходить у випарник та цикл роботи повторюється.

Для підвищення теплопродуктивності ТН необхідно зменшити різницю температур теплоносія в ґрунтовому теплообміннику та у випарнику. Пропонується додаткове джерело тепла (рис. 1), яке відбирається з системи теплопостачання (опалення та ГВС) та подається в пластинчатий теплообмінник.

У результаті аналізу з'ясували, що використання ТН з додатковим відбиранням теплоти від тепломережі є доцільним. Внаслідок збільшення температури фреону у випарнику до 13°C витрачається менше енергії на стиск парів фреону в компресорі, де на виході з нього температура теплоносія зростає з 30–35°C до 45–55°C, та до споживача теплоносії надходить з температурою 75°C. Також при відбиранні теплоти з тепломережі зростає теплопродуктивність до 323 кДж/кг, що дозволяє отримати на 1,8 кВт більше тепла та зекономити електроенергії до 7 кВт·год. На результат зменшення діапазону температур між випарником та теплоносієм з ґрунтового теплообмінника також може вплинути: температура шарів ґрунту; тепловий потік ґрунту; відстань між свердловинами, яка зберігатиме енергетичний потенціал ґрунту.

Температурний режим шарів ґрунту, що розташовані нижче 15–20 м, формується під дією теплової енергії з надр планети і не залежить від сезонних та добових коливань. Сонячна радіація становить 1,4 кВт/м² за добу, вона формує запаси тепла, безпосередньо, на поверхні ґрунту.

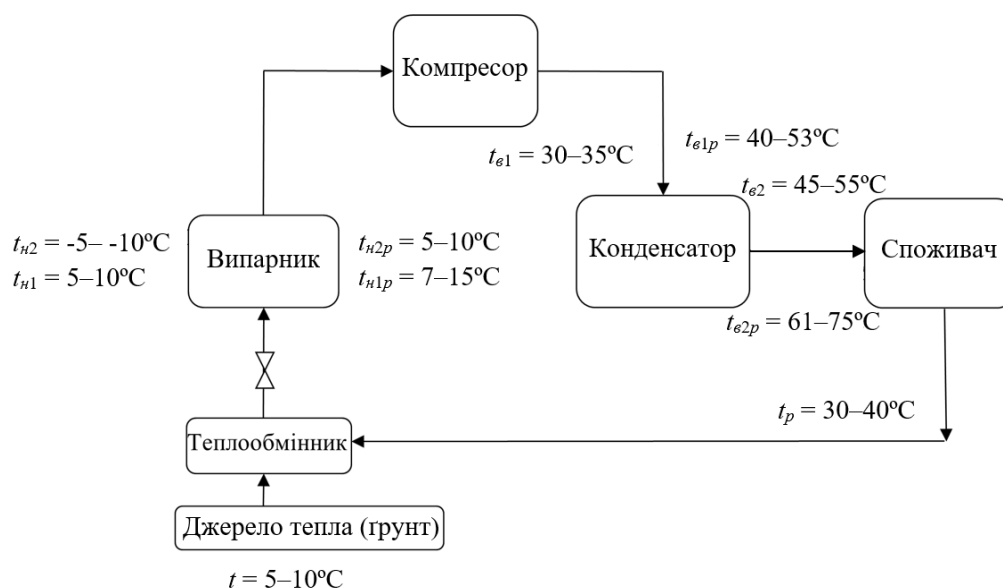


Рис. 1 – Розрахункова модель схеми ТН з ґрунтовим теплообмінником

Кількісною характеристикою запасів тепла є залежність розподілу температури ґрунтів від глибини та пори року. Динаміка зміни температури ґрунту на різних глибинах, а також максимальне і мінімальне значення температур на поверхні дозволяють визначити запаси теплової енергії. Процес підведення (чи відведення) тепла в низькопотенційне джерело енергії є функцією часу та простору.

Температурне поле формується від осі свердловини, що є геометричним центром. Розрахункова модель в ґрунті приймається як циліндричне тіло, яке складається з кількох контурів (рис. 2):

- зовнішня межа контуру – це контур впливу теплового потоку;

- внутрішня межа контуру – це трубка теплообмінника в свердловині, через стінку якого проходить теплообмін між циркулюючим теплоносієм та низькопотенційним джерелом енергії.

Відстань між свердловинами повинна бути такою, щоб їхні температурні поля не перетиналися та в період експлуатації навколишній ґрунтовий масив не піддавався заморожуванню. Розв'язання цієї задачі дозволить встановити необхідні межі поверхні ґрунту під поле свердловин та зробити оптимальне розмежування території. Знаючи скільки енергії ґрунтовий теплообмінник забирає з масиву ґрунту, а також властивості теплоносія та його температуру на вході в

ґрунтовий теплообмінник, властивості масиву ґрунту, матеріалу труб теплообмінника та наповнювача свердловини, можна обчислити об'єм ґрунту, що потрібен для покриття необхідного навантаження на систему тепlopостачання. Для цього пропонується масив ґрунту, що оточує свердловину, у формі циліндра.

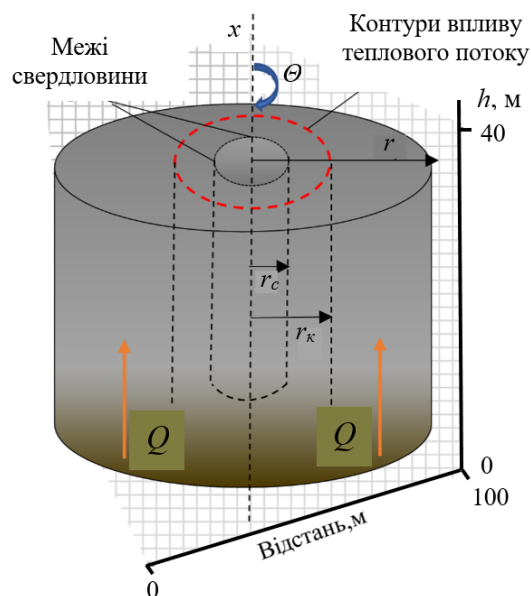


Рис. 2 – Модель поширення тепла навколо ґрунтового теплообмінника

Кількість теплоти, яка відбирається від однієї свердловини:

$$Q = 86400q_{cv} \cdot L_{cv} \cdot n, \quad (1)$$

де Q – кількість теплоти, яка відбирається від однієї свердловини, Дж; q_{cv} – середній тепловий потік з 1 м свердловини, Вт/м; L_{cv} – глибина свердловини, м; n – тривалість опалювального періоду.

Контур ґрунтового масиву теплового потоку навколо свердловини:

$$V_{zp} = \frac{Q}{c_{zp} \cdot \rho_{zp} \cdot \left[t_{zp} - \left(\frac{t_{вх.} + t_{вих.}}{2} \right) \right]}, \quad (2)$$

де V_{zp} – контур ґрунтового масиву теплового потоку, м³; c_{zp} – питома теплоємність ґрунтового масиву, Дж/(кг·К); ρ_{zp} – щільність ґрунтового масиву, кг/м³; t_{zp} – температура ґрунтового масиву, °С; $t_{вх.}$, $t_{вих.}$ – температура входу та виходу робочої рідини в ґрунтовому теплообміннику, °С.

Відстань від центра свердловини з ґрунтовим теплообмінником до межі контуру ґрунтового масиву:

$$r_k = \sqrt{\frac{V_{zp}}{\pi \cdot L_{cv}}}, \quad (3)$$

де r_k – радіус контуру свердловини, тобто розповсюдження теплоти, м.

Відстані між свердловинами:

$$R_{cv} = 2 \sqrt{\frac{86400q_{cv} \cdot n}{\pi c_{zp} \cdot \rho_{zp} \cdot \left[t_{zp} - \left(\frac{t_{вх.} + t_{вих.}}{2} \right) \right]}}, \quad (4)$$

де R_{cv} – відстань між свердловинами, м.

Для проведення обчислень прийнято початкові дані: температура теплоносія з ТН – 0°С; температура в зворотній трубці – 5°С; температура на глибині 10 м – 15°С.

Зовнішня межа контуру r_k в обчисленнях приймається як умовна межа, на якій температура під час роботи свердловини змінюється в межах похибки вимірювань. Для теплового контуру одиночної свердловини виконуємо обчислення у межах $r_k = 20$ –25 м. Температуру ґрунтового масиву знаходимо в зоні впливу свердловини.

Оскільки свердловина і низькопотенційне джерело теплоти є складним комплексним об'єктом розрахунку та характеризується змінними граничними умовами, відповідно, розв'язування цієї задачі виконується із використанням неявної різницевої схеми та методу контролю об'єму зі зміщеною сіткою. Товщина контрольованого об'єму в напрямку осі z приймається за 1. Ділянка зі штриховими лініями (рис. 3) – це розрахункова область елементарної комірки.

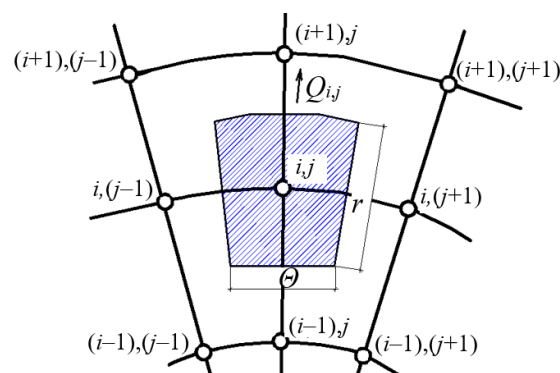


Рис. 3 – Розрахункова сітка ґрунтового масиву в полярних координатах r , θ (θ – кут між радіусом-вектором та віссю x ; r – радіальна координата; Q_{ij} – тепловий потік)

Тепловий потік через поверхню масиву обчислюється з використанням температур $t_{i,j}$, $t_{i,(j+1)}$, $t_{(i+1),j}$, $t_{i,(j-1)}$, $t_{(i-1),j}$ у вузлах сітки (рис. 3), що зміщені відносно ґрунтового масиву навколо ґрунтового теплообмінника, що, в свою чергу, дозволяє підвищити стійкість розв'язку. Тобто тепловий потік обчислюється посередині відрізка, який з'єднує вузли, через які знаходиться градієнт.

Для розв'язання задачі використовуємо спрощене рівняння за умови, що $r_c < r < r_k$:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right), \quad (5)$$

де r_c – радіус ґрунтового теплообмінника, м.

Спрощення задачі відбувається шляхом переходу від тримірної до двомірної моделі, що виключає тепловий потік вздовж осі свердловини. Водночас, тепловий потік у вертикальному напрямку має бути враховано, оскільки він неперервний в часі, навіть у випадку зупинки ТН.

Для розв'язання цієї задачі вводиться компенсуюча поправка – об'ємні джерела та додаткове тепло з тепломережі:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{q_v}{c}, \quad (6)$$

де t – температура ґрунту, °С; τ – час, с; a – коефіцієнт теплопровідності, м²/с; r – радіальна координата, м; q_v – джерела тепла, обумовлені тепловими потоками з глибини та із тепломережі, Вт/м²; c – теплоємність, Дж/(м³·К).

Рівняння (6) в дискретному вигляді матиме вигляд:

$$\frac{a_{i,j} t_{i,j}}{\Delta \tau} = \frac{a_{i,j}^0 \Delta \tau}{\Delta r^2} [t_{(i-1),j(\tau)} - 2t_{i,j(\tau)} + t_{(i+1),j(\tau)}] +$$

$$+ \frac{\Delta x^2}{\Delta y^2} [t_{i,(j-1)(\tau)} + t_{i,(j+1)(\tau)}] + \frac{1}{r} [t_{i,(j-1)(\tau)} - 2t_{i,j(\tau)} + t_{i,(j+1)(\tau)}] + q_{i,j} \frac{\Delta \tau}{c}. \quad (7)$$

З отриманого рівняння (7) визначається температурне поле, зокрема температура ґрунтового масиву навколо свердловини. На **рис. 4** та **рис. 5** подано результати досліджень температурного поля ґрунтового масиву навколо свердловини. Аналіз даних показує, що теплота в ґрунті акумулюється: в радіусі 15–25 мм та зберігається близько 3,5 год (за температура теплоносія 20–40°С); в радіусі 15–35 мм та зберігається протягом 3,4–4,2 год (за температура теплоносія 60–80°С). Зі збільшенням радіуса r тривалість зберігання теплового потоку і температури зменшується.

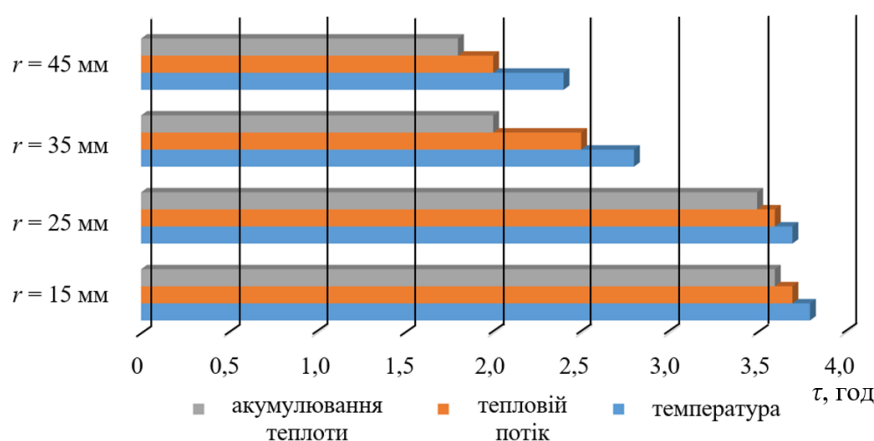


Рис. 4 – Результати досліджень температурного поля в ґрунті з температурою теплоносія 20–40°С

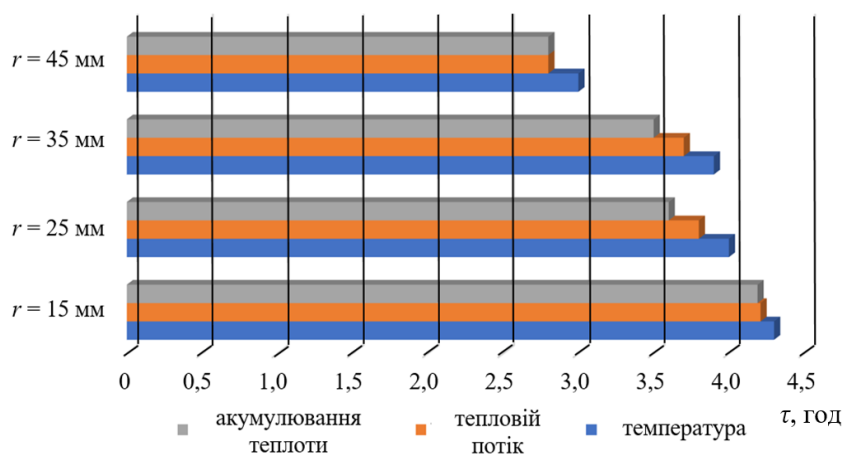


Рис. 5 – Результати досліджень температурного поля в ґрунті з температурою теплоносія 60–80°С

ВИСНОВКИ

Отримана математична модель дозволяє виконувати обчислення температурного поля багатошарових ґрунтових масивів із різними температурами теплоносія, урахуваючи теплофізичні параметри ґрунту навколо свердловини. Необхідно зазначити, що запропонована методика може бути основою не лише для аналізу, але й для прогнозу термічного режиму ґрунту.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Босий, М. В., & Кузик, О. В. (2020). Ефективність циклу теплового насоса для тепlopостачання (*Heat pump cycle efficiency for heat supply*). *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*, 3(34), 136–142. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).136-142](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).136-142)
- Голуб, Г. А., & Кепко, О. І. (2002). Математична модель теплонасосної системи тепlopостачання споруд закритого ґрунту (*Mathematical model of heat pump system of heat supply of closed ground structures*). *Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства*, 10, 275-278.
- Горобець, В. Г., & Яценко, О. В. (2014). Розробка системи опалення та математичної моделі процесів тепло- і масопереносу в теплицях з використанням альтернативних джерел енергії (*Development of a heating system and a mathematical model of heat and mass transfer processes in greenhouses using alternative energy sources*). *Енергетика і автоматика*, 1, 25-37.
- Зур'ян, О. В., & Олійніченко, В. Г. (2021). Гідротермальна система отримання теплової енергії, фізичні процеси, ефективність (*Hydrothermal system of thermal energy, physical processes, efficiency*). *Вісник Вінницького політехнічного інституту. Енергетика, електротехніка та електромеханіка*, 4, 40-46. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-157-4-40-46>
- Нікулішин, В. О., & Височин, В. В. (2014). *Теплові насоси та кондиціонери (Heat pumps and air conditioners)*. Одеса: Медіа-Арт.
- Ткаченко, С. Й., & Остапенко, О. П. (2009). *Парокомпресійні теплонасосні установки в системах тепlopостачання (Steam compression heat pump installations in heat supply systems)*. Вінниця: ВНТУ.
- Ткачук, К. К. (2015). Перспективи застосування теплових насосів в Україні (*The prospect of heat pumps using in Ukraine*). *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*, 27, 144-153.