

УДК 621.577.2; 532.546

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА І ГІДРОДИНАМІКА ФІЛЬТРАЦІЇ В СИСТЕМІ ҐРУНТ – ТЕПЛООБМІННИК

Басок Б.І.¹, член-кореспондент НАН України, **Давиденко Б.В.¹**, докт. техн. наук, **Павленко А.М.^{1,2}**, **Новіков В.Г.¹**, канд. техн. наук, **Кошлак Г.В.²**, докт. техн. наук

¹ - Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, 03057, Україна;

² - Келецький Технологічний Університет; ал. Тисячоліття Панства Польського-7, 25-314 Кельце, Польща

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2022.7>

Методом чисельного моделювання досліджено процес теплопередачі від ґрунтового масиву до теплоносія, що циркулює в U-подібному вертикальному ґрунтовому теплообміннику. Чисельні дослідження виконуються шляхом скінчено-різницевого розв'язання системи рівнянь, що описують фільтраційну течію в пористому середовищі, та рівнянь перенесення теплоти в ґрунтовому масиві і в каналі теплообмінника. Визначено вплив градієнта тиску в ґрунтовому масиві, що викликає фільтраційну течію ґрунтових вод, та діаметра частинок ґрунту на гідродинаміку фільтраційної течії та теплову ефективність теплообмінника.

The process of heat transfer from the soil massif to the heat carrier circulating in a U-tube vertical ground heat exchanger was studied by numerical simulation. Numerical simulations are carried out by finite-difference solution of the system of equations describing the filtration flow in a porous medium, and the heat transfer equations in the soil massif and in the heat exchanger channel. The influence of the pressure gradient in the soil massif, which causes the filtration flow of groundwater, and the diameter of the soil particles on the hydrodynamics of the filtration flow and the thermal efficiency of the heat exchanger are determined.

Бібл. 12, рис. 6.

Ключові слова: ґрунтовий теплообмінник, тепловий насос, пористе середовище, фільтрація, чисельне моделювання.

c_F – коефіцієнт Форхаймера;
 C – теплоємність, Дж/(кг·К);
 d – діаметр часточок ґрунту, мм;
 D – довжина сторони теплообмінника, м;
 g – прискорення сили тяжіння, м/с²;
 G – об'ємна витрата, м³/с;
 K – проникність, м²;
 L – довжина каналу теплообмінника, м;
 H – глибина занурення теплообмінника, м;
 p – тиск, Па;
 Δp – перепад тиску, Па;
 q – густина теплового потоку, Вт/м²;
 t – температура, °С;
 u, v, w – проекції вектора швидкості, м/с;
 U – середня швидкість руху теплоносія, м/с;
 V – вектор швидкості, м/с;
 x, y, z – Декартові координати, м;
 α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К);

β – коефіцієнт температурного розширення рідини, 1/К;
 δ – товщина стінки теплообмінника, мм;
 λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);
 μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, Па·с;
 ρ – густина, кг/м³;
 τ – час, с;
 φ – пористість;
Нижні індекси:
 0 – початковий;
 z – зовнішня поверхня теплообмінника;
 k – стінка каналу теплообмінника;
 t – теплоносій в теплообміннику;
 max – максимальний;
 p – пористе середовище;
 f – рідкий компонент;
 s – твердий компонент;
 w – ґрунтові води;
 ∞ – нескінченність.

Вступ

Важливим елементом теплового насосу типу "ґрунт - вода" є підземний теплообмінник, за допомогою якого теплота вилучається з ґрунту. Від його ефективності залежить якість роботи теплонасосної установки у цілому. Питанням вдосконалення цих пристроїв на сьогоднішній день приділяється велика увага. Найчастіше ґрунтові теплообмінники бувають горизонтального або

вертикального типів. Горизонтальні теплообмінники розташовуються на відносно невеликій глибині і мають, як правило, форму змійовиків [1-3]. Вертикальні теплообмінники зазвичай мають U - подібну форму і облаштовуються на більш велику глибину, ніж горизонтальні. Кожен з цих типів має свої переваги та недоліки. Одним з факторів, що впливають на показники роботи ґрунтового теплообмінника, є рух ґрунтових вод. Цей

рух може здійснюватися як рахунок термогравітаційної конвекції, так і внаслідок наявності перепаду тиску вздовж ґрунтового масиву. Перепад тиску може виникати, наприклад, при наявності ухилу місцевості.

Більшість чисельних моделей, що застосовуються для визначення теплотехнічних характеристик ґрунтових теплообмінників, враховують лише перенесення теплоти теплопровідністю в ґрунтовому масиві. Моделі, що не враховують конвекційне перенесення теплоти, можуть в ряді випадків бути недостатньо точними для прогнозування теплових режимів ґрунтових теплообмінників на тривалий період експлуатації.

1. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Математична модель перенесення теплоти в ґрунтовому масиві при роботі U-подібного вертикального ґрунтового теплообмінника розглядається в [4, 5]. В цих роботах досліджується сумісне перенесення теплоти теплопровідністю та конвекцією в ґрунтовому масиві. Конвекційне перенесення теплоти виникає внаслідок руху ґрунтових вод. В роботах запропоновано явне аналітичне розв'язання рівняння енергії в наближенні моделі кінцевого лінійного джерела. Показано, що адвекція ґрунтових вод в пористому середовищі може суттєво впливати на розподіл температури в масиві. Узагальнено вплив гідравлічних і теплообмінних властивостей ґрунтів на конвекційне перенесення теплоти в ґрунтовому масиві. Запропоновані математичні моделі можуть застосовуватися при проектуванні пристроїв для вилучення теплоти з ґрунту за допомогою теплових насосів.

В [6] відзначається, що більшість моделей, що застосовуються для прогнозування характеристик роботи ґрунтових теплообмінників, враховують лише перенесення теплоти теплопровідністю, що в ряді випадків приводить до неточних результатів. В цій роботі запропоновано більш повну чисельну модель теплообміну між U-подібним вертикальним ґрунтовим теплообмінником та ґрунтовим масивом. Дана модель поєднує механізми теплопровідності та конвекції з потоком ґрунтових вод. Чисельне розв'язання задачі перенесення теплоти виконується методом скінчених елементів. Розглядаються різні емпіричні вирази, що характеризують проникність пористого ґрунтового середовища.

В [7] розглядається тривимірна чисельна модель для дослідження течії підземних вод і перенесення теплоти в обмеженому просторі, в якому знаходяться дві системи для акумулювання і вилучення теплової енергії у водоносному горизонті. Ці системи працюють у сусідніх будівлях і використовують один водоносний горизонт. Розглядаються наслідки взаємного теплового

впливу цих двох систем. Таким наслідком може бути утворення теплового шлейфу, який може погіршувати роботу таких систем.

Для оцінки теплової ємності водоносного горизонту, що є важливим показником працездатності ґрунтових теплонасосних систем, в [8] застосовується ряд методів, серед яких: метод чисельного моделювання процесу теплоперенесення в ґрунтовому масиві, метод енергетичного балансу та метод накопичення теплоти. Одержані результати свідчать про те, що метод чисельного моделювання адекватніше відображає процеси перекачування та поповнення підземних вод, ніж метод енергетичного балансу та метод накопичення теплоти.

В [9] запропоновано математичну модель для розрахунку теплового режиму вертикального ґрунтового теплообмінника, що враховує вплив потоку ґрунтових вод. Наведено результати аналітичного розв'язання задачі теплоперенесення в ґрунтовому масиві при роботі теплообмінника. Ці результати одержано для умов, що у пористому середовищі з течією ґрунтових вод теплообмін між теплообмінником та ґрунтом здійснюється у формі теплопровідності та конвекції. Вважається, що ґрунтовий масив є однорідним і складається з насиченого водою ґрунту з постійними властивостями. Температура поверхні ґрунту - постійна. Ґрунтові води течуть рівномірно вздовж горизонтальної осі зі швидкістю Дарсі. На основі запропонованої моделі проаналізовано вплив числа Пекле на характеристики роботи теплообмінника.

В [10] наведено результати аналізу температурного впливу на ґрунтовий масив системи теплових насосів при наявності в ґрунті течії підземних вод. Цей аналіз проводиться з використанням наближених аналітичних розв'язань рівняння перенесення теплоти в ґрунтовому масиві. Розглядається їх придатність для прогнозування теплового впливу на температурний стан ґрунту при різних гідрогеологічних умовах. Зазначається, що ці наближені аналітичні вирази не призначені для заміни чисельного моделювання, а є додатковим інструментом для вдосконалення управління підземними та геотермальними ресурсами.

Вплив природної конвекції ґрунтових вод на інтенсивність перенесення теплоти від ґрунтового масиву до теплоносія в U - подібному вертикальному теплообміннику досліджується в [11]. В цій роботі представлено результати чисельного розв'язання системи рівнянь, що описують вільну конвекцію ґрунтових вод та теплообмін в пористому ґрунтовому масиві. Для чисельних досліджень течії рідини в пористому середовищі застосовується модель Дарсі-Брінкмана-Форхаймера.

Ефективність роботи теплообмінника оцінюється за швидкістю вилучення енергії з ґрунту та за температурою рідини на виході з теплообмінника. Визначено умови, за яких вплив природної конвекції на теплообмін можна не враховувати, і коли цей вплив буде суттєвим.

Вплив вимушеної конвекції ґрунтових вод на характеристики роботи ґрунтового U-подібного вертикального теплообмінника досліджується в [12]. Розглядалися чотири варіанти конфігурацій теплообмінників. Виконувалися як чисельні так і експериментальні дослідження. Чисельні дослідження виконувалися за двовимірною моделлю. За результатами досліджень визначалася ефективність роботи теплообмінників різної конфігурацій.

2. Мета роботи

З результату аналізу літературних джерел випливає, що проблема впливу течії ґрунтових вод на характеристики експлуатації ґрунтових теплообмінників та теплових насосів на сьогоднішній день доволі актуальна. Визначення впливу перепаду тиску в ґрунтовому масиві, швидкості течії ґрунтових вод та діаметру частинок ґрунту на ефективність роботи теплообмінників вимагає подальших додаткових досліджень. У вивченні цих питань полягає мета даної роботи

3. Математична постановка задачі

Динаміка ґрунтових вод, що рухаються крізь пористе ґрунтове середовище, та процес перенесення теплоти ґрунтовими водами описується системою рівнянь, до якої входять:

- рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0; \quad (1)$$

- рівняння перенесення імпульсу:

$$\rho_w \left(\frac{1}{\varphi} \frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{u}{\varphi^2} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{v}{\varphi^2} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{w}{\varphi^2} \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\varphi} \nabla^2 u - \frac{\mu}{K} u - \frac{\rho_w c_F}{\sqrt{K}} |V| u; \quad (2)$$

$$\rho_w \left(\frac{1}{\varphi} \frac{\partial v}{\partial \tau} + \frac{u}{\varphi^2} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{v}{\varphi^2} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{w}{\varphi^2} \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\varphi} \nabla^2 v - \frac{\mu}{K} v - \frac{\rho_w c_F}{\sqrt{K}} |V| v; \quad (3)$$

$$\rho_w \left(\frac{1}{\varphi} \frac{\partial w}{\partial \tau} + \frac{u}{\varphi^2} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{v}{\varphi^2} \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{w}{\varphi^2} \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\varphi} \nabla^2 w - \frac{\mu}{K} w - \frac{\rho_w c_F}{\sqrt{K}} |V| w + g \beta (t_p - t_\infty) \quad (4)$$

- рівняння перенесення теплоти:

$$C_p \rho_p \left(\frac{\partial t_p}{\partial \tau} + u \frac{\partial t_p}{\partial x} + v \frac{\partial t_p}{\partial y} + w \frac{\partial t_p}{\partial z} \right) = \lambda_p \nabla^2 t_p \quad (5)$$

де: $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ - оператор Лапласа; $|V|$

- модуль вектора швидкості руху рідини. Координата z спрямована вертикально вгору. Вважається, що пори повістю заповнені водою. Теплофізичні властивості пористого середовища розраховуються за виразами:

$$\lambda_p = \varphi \lambda_f + (1 - \varphi) \lambda_s;$$

$$C_p \rho_p = \varphi C_f \rho_f + (1 - \varphi) C_s \rho_s.$$

Якщо вважати частинки ґрунту сферичними, то для визначення коефіцієнтів K та c_F , що містяться в рівняннях динаміки (2)-(4), можна застосовувати співвідношення

$$K = \frac{d_p^2}{150} \frac{\varphi^3}{(1 - \varphi)^2}; \quad (6)$$

$$c_F = \frac{1,75}{\varphi^{3/2} 150^{1/2}}; \quad (7)$$

де φ - пористість ґрунту; d_p - середній діаметра його частинок.

Рух ґрунтових вод відбувається в напрямку осі OY . Умови на границях розрахункової області приймаються у вигляді:

$$x = 0; x = x_{max}: u = 0; w = 0; \frac{\partial v}{\partial x} = 0; \frac{\partial t}{\partial x} = 0;$$

$$y = 0: u = 0; w = 0; p = p_0; t = t_\infty;$$

$$y = y_{max}: u = 0; w = 0; p = p_0 - \Delta p; \frac{\partial t}{\partial y} = 0;$$

$$z=0; z=z_{max}: u=0; w=0; \frac{\partial v}{\partial z}=0; \frac{\partial t}{\partial z}=0,$$

де Δp – заданий за умов задачі перепад тиску.

Для теплоносія в каналі теплообмінника складаються рівняння теплового балансу. На вертикальній опускній ділянці його каналу теплоносії рухається в напрямку, що протилежний напрямку осі OZ . Тому рівняння перенесення теплоти теплоносієм на цій ділянці записується у вигляді

$$C_T \rho_T \left(\frac{\partial t_T}{\partial \tau} - U_T \frac{\partial t_T}{\partial z} \right) = \lambda_T \nabla^2 t_T; \quad (8)$$

де $U_T = \frac{G}{D^2}$ – середня швидкість руху теплоносія в каналі теплообмінника.

За аналогією складаються рівняння теплового балансу на горизонтальній і на вертикальній підйомній ділянках каналу теплообмінника. На поверхні контакту теплообмінника з ґрунтом застосовуються наступні умови спряження:

$$u=0; v=0; w=0; -\lambda_p \frac{\partial t_p}{\partial n} = \frac{t_p - t_T}{\frac{\delta}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_T}}, \quad (9)$$

де n – напрямок зовнішньої нормалі до зовнішньої поверхні каналу; α_T – коефіцієнт тепловіддачі в каналі, який розраховується в залежності від режиму течії теплоносія.

4. Результати чисельних досліджень.

З метою визначення впливу ґрунтових вод на температурний режим ґрунтового теплообмінника проведено відповідні чисельні дослідження. Вони полягають у скінчено-різницевого розв'язанні системи рівнянь (1)-(9) з наведеними граничними умовами. Чисельні дослідження проведено для області ґрунтового масиву, що має форму прямокутного паралелепіпеда. Його довжина (y_{max}) і ширина (x_{max}) дорівнюють 3,5 м. Висота розрахункової області $z_{max}=17$ м. Ґрунтовий теплообмінник квадратного перерізу виготовлено з поліетиленових труб. Сторона квадрата $D=0,1$ м. Товщина стінок каналу $\delta=2$ мм. Вважається, що довжина каналу теплообмінника складає $L=32,8$ м. Глибина його зарушення в ґрунт $H=16$ м. Витрата теплоносія (водний розчин поліпропіленгліколю) дорівнює $G=0,25 \cdot 10^{-3}$ м³/с. Температура теплоносія на вході в теплообмінник $t_0=5^\circ\text{C}$. Температура ґрунтових вод, що надходять в досліджувану область, дорівнює $t_\infty=10^\circ\text{C}$.

Рухаючись по каналу теплообмінника, теплоносії нагрівається, відбираючи теплоту від ґрунтового масиву. Результати чисельних досліджень представлено у

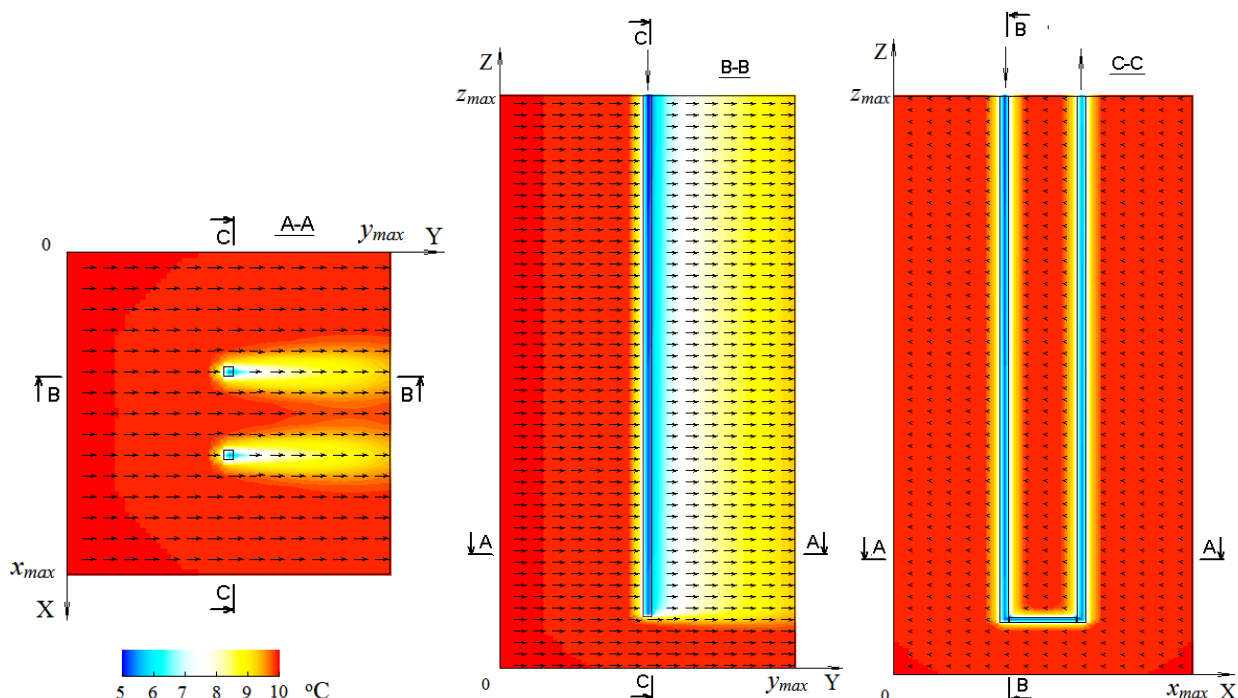


Рис. 1. Розподіли швидкості і температури в ґрунтовому масиві: $\Delta p=10000$ Па; $\varphi=0,4$; $d_p=0,1$ мм

вигляді полів швидкості руху ґрунтових вод і температури в ґрунтовому масиві (рис. 1). Розрахунки виконано для пористості ґрунту $\varphi=0,4$. Середній діаметр його частинок $d_p=0,1$. Дані результати відповідають умовам стаціонарного теплообміну. Коефіцієнт розраховується за відомою залежністю для коефіцієнта тепловіддачі в каналі при турбулентному русі теплоносія і складає для даного випадку $\alpha_m=145,7$ Вт/(м²К). Перепад тиску в даному випадку дорівнює $\Delta p=10000$ Па.

За результатами чисельного моделювання визначається температура теплоносія на виході з каналу теплообмінника. В даному випадку вона складає 5,62 °С. Тобто, температура теплоносія підвищується на $\Delta t=0,62$ °С. Збільшення температури теплоносія Δt характеризує кількість теплоти $Q=G(C_p\rho)_m\Delta t$, що вилучається теплоносієм з ґрунту.

Інтенсивність теплообміну між поверхнею теплообмінника та пористим ґрунтом залежить від середньої швидкості руху ґрунтових вод, яка, в свою чергу, залежить від градієнта тиску в ґрунтовому масиві $\Delta p/y_{max}$. Ця залежність, що одержана для $\varphi=0,4$; $d_p=0,25$ мм представлена на рис. 2. З рисунка видно, що при збільшенні градієнта тиску від 270 Па/м до 2700 Па/м середня швидкість ґрунтових вод збільшується від $0,021\cdot 10^{-3}$ м/с до $0,21\cdot 10^{-3}$ м/с.

Зміну по довжині каналу температури теплоносія при різних значеннях градієнта тиску $\Delta p/y_{max}$ для $d_p=0,25$ мм; $\varphi=0,4$ представлено на рис. 3. З рисунка видно, що зростання температури Δt в каналі теплообмінника збільшується зі збільшенням градієнта тиску $\Delta p/y_{max}$, що пояснюється підвищенням інтенсивності конвекційного теплообміну на зовнішній поверхні каналу.

Залежність кількості теплоти Q , що вилучається з ґрунту, від градієнта тиску $\Delta p/y_{max}$ в пористому масиві наведено на рис. 4. Розглядається випадок пористості

ґрунту $\varphi=0,4$ та середнього діаметра його частинок $d_p=0,25$ мм. З рис. 4 видно, що найменший тепловий потік $Q=393,6$ Вт відповідає випадку $\Delta p/y_{max}=0$, що означає відсутність вимушеної течії ґрунтових вод. З механізмів теплопередачі залишається природна термогравітаційна конвекція і теплопровідність. На інтервалі $0<\Delta p/y_{max}<500$ Па/с тепловий потік інтенсивно зростає зі збільшенням градієнта тиску (з 393,6 Вт до 650 Вт). При подальшому збільшенні $\Delta p/y_{max}$ тепловий потік Q продовжує збільшуватися, але менш інтенсивно. При збільшенні $\Delta p/y_{max}$ від 500 Па/м до 2750 Па/м тепловий потік Q збільшується від 650 Вт до 702,4 Вт. З цього випливає, що градієнт тиску та, відповідно, швидкість групових вод, найсуттєвіше впливає на теплообмін при відносно невеликих градієнтах тиску. При їх збільшенні, цей вплив стає менш суттєвим.

З виразів (6) та (7) для визначення проникності пористого середовища K і коефіцієнта Форхаймера c_F випливає, що на характеристики динаміки фільтраційної течії рідини крізь пористий ґрунтовий масив впливає середній діаметр частинок ґрунту d_p . Для визначення

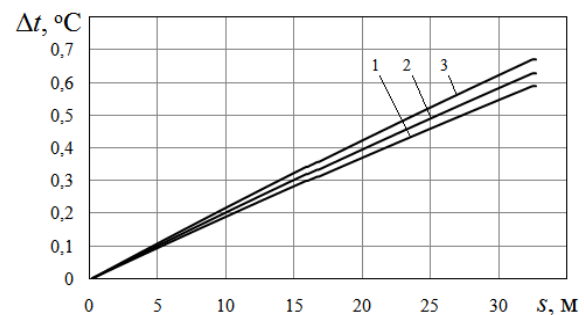


Рис. 3 Зміна температури по довжині каналу ґрунтового теплообмінника: $\varphi=0,4$; $d_p=0,25$ мм; 1 - $\Delta p/y_{max}=274,72$ Па/м; 2 - 549,45 Па/м; 3 - 2747,2 Па/м

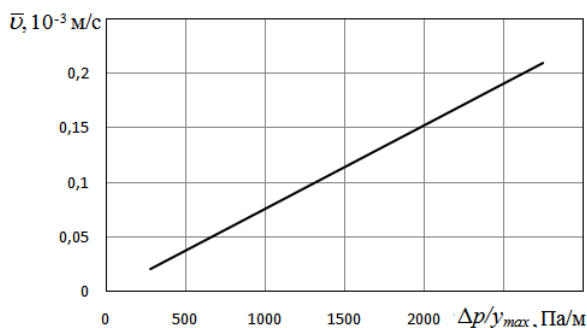


Рис. 2. Залежність швидкості течії рідини від градієнта тиску в ґрунтовому масиві при $\varphi=0,4$; $d_p=0,25$ мм

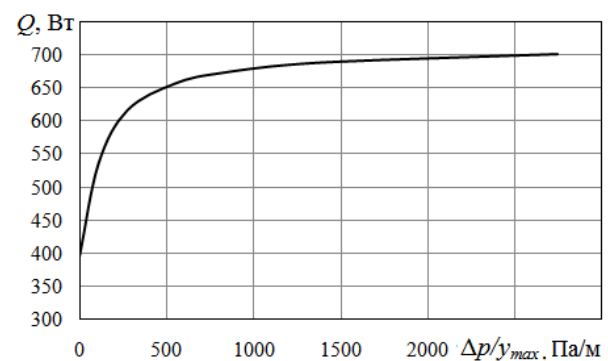


Рис. 4. Залежність кількості теплоти, що вилучається з ґрунту, від градієнта тиску в ґрунтовому масиві: $\varphi=0,4$; $d_p=0,25$ м

впливу діаметра частинок на інтенсивність перенесення теплоти до теплоносія в каналі чисельні дослідження виконуються для ґрунтів з діаметрами частинок $0,1 \text{ мм} \leq d_p \leq 0,4 \text{ мм}$ при однаковій пористості ґрунту $\phi=0,4$. Розглядаються випадки градієнтів тиску $\Delta p/y_{\max}=274,72 \text{ Па/м}$ та $2747,2 \text{ Па/м}$. Залежність осередненої швидкості течії рідини в пористому середовищі від середнього діаметра частинок ґрунту наведено на рис. 5. Як видно з цього рисунку, для обох випадків градієнта тиску середня швидкість фільтраційної течії рідини крізь пористий ґрунтовий масив збільшується зі збільшенням діаметра частинок ґрунту.

Залежність від діаметра частинок d_p сумарного теплового потоку, що вилучається з ґрунту та надходить до теплоносія в каналі, наведено на рис. 6. З рисунку видно, що кількість теплоти Q , що надходить до теплоносія, зростає зі збільшенням діаметра частинок. Це пов'язано зі зростанням швидкості течії ґрунтових вод (рис. 5), що сприяє інтенсифікації конвекційного теплообміну стінок каналу з цим потоком.

Вплив діаметра частинок на тепловий потік Q більш суттєвий при менших значеннях градієнта тиску (рис. 6). Так у випадку $\Delta p/y_{\max}=274,72 \text{ Па/м}$ при зростанні діаметра частинок від $0,1 \text{ мм}$ до $0,4 \text{ мм}$ тепловий потік Q зростає від 456 Вт до 668 Вт (на 46%). У випадку ж $\Delta p/y_{\max}=2747,2 \text{ Па/м}$ тепловий потік Q зростає від 645 Вт до 712 Вт (на 10%).

Висновки.

Результати чисельних досліджень показали, що наявність градієнта тиску вздовж ґрунтового масиву викликає рух ґрунтових вод, який сприяє збільшенню тепловіддачі від ґрунтового масиву до теплообмінника. При зростанні градієнта тиску збільшується швидкість руху ґрунтових вод, а також сумарний тепловий потік до теплоносія в теплообміннику. Мінімальний рівень

теплообміну спостерігається при відсутності повздовжнього руху ґрунтових вод. Найбільш суттєвим вплив повздовжнього градієнта тиску на теплообмін виявляється при збільшенні градієнта тиску від 0 до 500 Па/м . Тепловий потік при цьому збільшується на 65% . При подальшому зростанні градієнта тиску тепловий потік продовжує збільшуватися, але менш інтенсивно. При збільшенні градієнта тиску від 500 Па/м до 2750 Па/м тепловий потік Q збільшується тільки на 8% .

На осереднену швидкість фільтраційного руху ґрунтових вод впливає середній діаметр його частинок. З результатів чисельних досліджень випливає, середня швидкість фільтраційної течії рідини крізь пористий ґрунтовий масив збільшується зі збільшенням діаметра його частинок. Зі збільшенням діаметра частинок також збільшується кількість теплоти, що надходить від ґрунтового масиву до теплоносія. Це пов'язано зі зростанням швидкості течії ґрунтових вод зі збільшенням діаметра частинок. Вплив діаметра частинок на тепловий потік більш суттєвий при менших значеннях повздовжнього градієнта тиску. При зростанні діаметра частинок від $0,1 \text{ мм}$ до $0,4 \text{ мм}$ тепловий потік у випадку $\Delta p/y_{\max}=274,72 \text{ Па/м}$ зростає на 46% . У випадку ж $\Delta p/y_{\max}=2747,2 \text{ Па/м}$ тепловий потік при такому ж збільшенні діаметра частинок зростає на 10% .

Таким чином, якщо оцінювати теплову ефективність U-подібного вертикального ґрунтового теплообмінника по кількості теплоти, що теплообмінник вилучає з ґрунтового масиву, то вона збільшується при збільшенні повздовжнього градієнта тиску в ґрунтовому масиві, який викликає збільшення швидкості ґрунтових вод. Збільшення діаметра частинок ґрунту при сталій пористості також сприяє збільшенню ефективності теплообмінника.

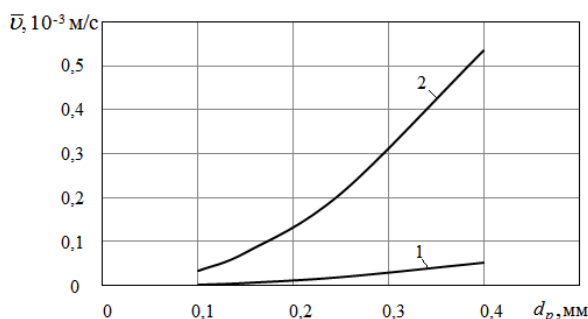


Рис. 5. Залежність швидкості течії рідини від середнього діаметра частинок ґрунту при $\phi=0,4$: 1 - $\Delta p/y_{\max}=274,72 \text{ Па/м}$; 2 - $2747,2 \text{ Па/м}$

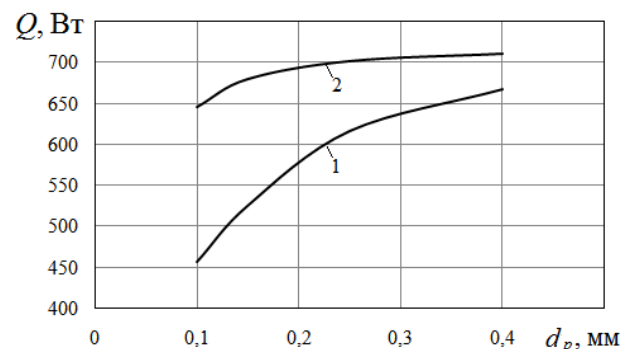


Рис. 6. Залежність кількості теплоти, що вилучається з ґрунту, від діаметра частинок ґрунту: 1 - $\Delta p/y_{\max}=274,72 \text{ Па/м}$; 2 - $2747,2 \text{ Па/м}$

ЛІТЕРАТУРА

1. Basok B. I., Davydenko B. V., Lunina A. A. Numerical model of the temperature conditions of the horizontal ground collector // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. - 2012. - Vol. 85. - Pp. 1114–1126. DOI:10.1007/s10891-012-0754-2
2. Басок Б. І., Давиденко Б.В., Божко І.К., Мороз М.В. Нестационарний перенос теплоти в горизонтальному ґрунтовому теплообміннику // Промислова теплотехніка. 2018. -Т.40, № 4.- С. 34-40.
3. Cui Y., Zhu J., Twaha S., Chu J., Bai H., Huang K., Chen X., Zoras S., Soleimani, Z. Techno-economic assessment of the horizontal geothermal heat pump systems: A comprehensive review // Energy Conversion and Management.- 2019.- 191.- Pp. 208-236. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.04.018.
4. Diao N., Li Q., Fang Z. Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection // International Journal of Thermal Sciences. -2004. -Vol. 43. -Pp. 1203–1211. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2004.04.009>
5. Diao N.R., Zeng H.Y., Fang Z.H. Improvement in modeling of heat transfer in vertical ground heat exchangers // Hvac&R Research. -2004. Vol.10, № 4. Pp. 459-470. DOI:10.1080/10789669.2004. 10391114
6. Nam Y., Ooka R., Hwang S. Development of a numerical model to predict heat exchanger rates for a ground-source heat pump system// Energy and Buildings.- 2008.- Vol. 40. - P. 2133-2140. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.06.004
7. Bulté M., Duren T., Bouhon O., Petitclerc E., Agniel M., Dassargues A.. Numerical Modeling of the Interference of Thermally Unbalanced Aquifer Thermal Energy Storage Systems in Brussels (Belgium)//Energies.- 2021. -14. - Pp. 6241. <https://doi.org/10.3390/en14196241>
8. Yang Q. C., Liang J., Liu L.C. Numerical model for the capacity evaluation of shallow groundwater heat pumps in Beijing Plain, China. Procedia Environmental Sciences.- 2011. -10.- Pp. 881 – 889. doi: 10.1016/j.proenv.2011.09.141.
9. Cui T., Cai S., Guo H., Huang T. Full-scale model to predict borehole fluid temperature with groundwater advection. Conference: International Ground Source Heat Pump Association. 2018. Stockholm. September 18-20. DOI:10.22488/okstate.18.000016
10. Pophillat W., et al. Analytical solutions for predicting thermal plumes of groundwater heat pump systems // Renewable Energy. - 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.148>
11. Ghoreishi-Madiseh S. A., Hassani F., Mohammadian A., Radziszewski P. A transient natural convection heat transfer model for geothermal borehole heat exchangers// Journal of Renewable and Sustainable Energy. - 2013. -№ 5. - Pp. 1-15. <https://doi.org/10.1063/1.4812647>
12. Serageldin A. A., Radwan A., Sakata Y., Katsura T., Nagano K. The effect of groundwater flow on the thermal performance of a novel borehole heat exchanger for ground source heat pump systems: small scale experiments and numerical simulation // Energies.- 2020.- 13. -1418. doi:10.3390/en13061418

HEAT TRANSFER AND HYDRODYNAMICS OF
FILTRATION IN THE SOIL - HEAT
EXCHANGER SYSTEM

Basok B.I.¹, Davydenko B.V.¹, Pavlenko F.M.^{1,2},
Novikov V.G.¹, Koshlak H.V.²

¹ - Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Science of Ukraine, Marii Kapnist str., 2a, Kiev, 03057, Ukraine.

² - Kielce University of Technology; al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, Poland.

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2022.7>

Introduction. To date, heat pump systems are widely used in public utilities for heat supply to buildings. In particular, in the "soil-water" heat pump system, heat is removed from the soil with the help of a soil heat exchanger. The efficiency of its work depends on the intensity of heat transfer through the surface of the heat exchanger. The nature of heat transfer in the soil massif is significantly influenced by the filtration flow of groundwater. This flow can be formed both due to the presence of a temperature gradient in the array, and in the presence of a pressure gradient. In the first case, free convection will occur, and in the second, forced convection, and in many cases both factors may be present in the soil mass. As a result of their action, a groundwater flow is formed in this massif, which in a certain way effects on the mechanism of heat transfer from the soil massif to the heat exchange device.

Results. In this work, numerical simulation of groundwater flow and heat transfer in the soil massif is carried out in the presence of a U-tube vertical soil heat exchanger, which is an element of the heat pump system. For numerical studies, the Darcy–Brinkman–Forchheimer model is used for fluid flow in a porous medium. The influence of the pressure gradient in the soil mass, which causes the movement of groundwater, on the efficiency of the heat exchanger is analyzed. This efficiency is estimated by the amount of heat extracted from the soil. The influence of the dispersion of soil particles on the intensity of heat transfer is also determined.

References 12, figures 6.

Keywords: ground heat exchanger, heat pump, porous media, filtration, numerical simulation.

1. Basok B. I., Davydenko B. V., Lunina A. A. Numerical model of the temperature conditions of the horizontal ground collector // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. - 2012. - Vol. 85. - Pp. 1114–1126. DOI:10.1007/s10891-012-0754-2

2. Basok B.I., Davydenko B.V., Bozhko I. K., Moroz M.V. [Unsteady heat transfer in a horizontal ground heat exchanger] // [Industrial Heat Engineering].- 2018. Vol.40, № 4 - Pp. 34-40. [in Ukrainian].

3. Cui Y., Zhu J., Twaha S., Chu J., Bai H., Huang K., Chen X., Zoras S., Soleimani, Z. Techno-economic assessment of the horizontal geothermal heat pump systems: A comprehensive review // Energy Conversion and Management.- 2019.- 191.- Pp. 208-236.

DOI: 10.1016/j.enconman.2019.04.018.

4. Diao N., Li Q., Fang Z. Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection // International Journal of Thermal Sciences. -2004. -Vol. 43. -Pp. 1203–1211. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2004.04.009>

5. Diao N.R., Zeng H.Y., Fang Z.H. Improvement in modeling of heat transfer in vertical ground heat exchangers // Hvac&R Research. -2004. Vol.10, № 4. Pp. 459-470.

DOI:10.1080/10789669.2004. 10391114

6. Nam Y., Ooka R., Hwang S. Development of a numerical model to predict heat exchanger rates for a ground –source heat pump system// Energy and Buildings.- 2008.- Vol. 40. - P. 2133-2140. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.06.004

7. Bulté M., Duren T., Bouhon O., Petitclerc E., Agniel M., Dassargues A.. Numerical Modeling of the Interference of Thermally Unbalanced Aquifer Thermal Energy Storage Systems in Brussels (Belgium)//Energies.- 2021. -14. -Pp. 6241. <https://doi.org/10.3390/en14196241>

8. Yang Q. C., Liang J., Liu L.C. Numerical model for the capacity evaluation of shallow groundwater heat pumps in Beijing Plain, China. Procedia Environmental Sciences.- 2011. -10.- Pp. 881–889. doi: 10.1016/j.proenv.2011.09.141.

9. Cui T., Cai S., Guo H., Huang T. Full-scale model to predict borehole fluid temperature with groundwater advection. Conference: International Ground Source Heat Pump Association. 2018. Stockholm. September 18-20. DOI:10.22488/okstate.18.000016

10. Pophillat W., et al. Analytical solutions for predicting thermal plumes of groundwater heat pump systems // Renewable Energy.- 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.148>

11. Ghoreishi-Madiseh S. A., Hassani F., Mohammadian A., Radziszewski P. A transient natural convection heat transfer model for geothermal borehole heat exchangers// Journal of Renewable and Sustainable Energy. -2013. -№ 5. -Pp. 1-15. <https://doi.org/10.1063/1.4812647>

12. Serageldin A. A., Radwan A., Sakata Y., Katsura T., Nagano K. The effect of groundwater flow on the thermal performance of a novel borehole heat exchanger for ground source heat pump systems: small scale experiments and numerical simulation // Energies.- 2020.- 13. -1418.

doi:10.3390/en13061418

Отримано 30.08.2022

Received 30.08.2022