

Методика діагностування свердловин ґрунтових теплових насосів на предмет теплового потенціалу в залежності від типу ґрунту

Євген Кулінко¹, Володимир Скочко², Олександр Погосов³

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037

¹ yevhen_kulinko@ukr.net, orcid.org/0000-0002-8834-3600

² vladimir.and.friends@gmail.com, orcid.org/0000-0002-1709-2621

³ pogosov_aleksandr@ukr.net, orcid.org/0000-0003-2158-8897

DOI: 10.32347/2310-0516.2019.12.20-29

Анотація. При визначенні питомої норми відбору енергії зі свердловини ґрунтовими тепловими насосами слід користуватися ДСТУ Б В.2.5-44:2010, що торкається лише питань проектування системи опалення та не охоплює всі варіанти експлуатації таких систем, в тому числі режими використання теплових насосів для холодопостачання будівель та споруд. При проектуванні відповідних систем тепло- та холодопостачання виникає потреба у застосуванні фізико-математичних підходів для отримання залежностей норми теплового відбору із ґрунтового середовища від умов експлуатації системи енергозабезпечення та врахування властивостей різних типів ґрунтів, в яких знаходиться теплообмінник. Найбільш складною задачею, яка виникає при визначенні питомих норм відбору теплової енергії, є розрахунок питомих теплотехнічних характеристики свердловин (теплоємностей та коефіцієнтів теплопровідності), що є визначальним на початковому етапі проектування геотермального поля (а саме: глибини закладання, кількості та відстані між свердловинами). Для експериментального визначення теплотехнічних характеристик застосовують мобільне автономне джерело теплоти (електричний котел) для повного насичення об'єму ґрунту, що оточує свердловину із ґрунтовим теплообмінником, паралельно виконуючи моніторинг параметрів потужності, витрати теплоносія, його температури та час її стабілізації в подавальному та зворотному трубопроводах.

В даному дослідженні запропоновано математичну модель для визначення теплотехнічних характеристик ґрунтового масиву в різних горизонтальних площинах перерізу стовбуру



Євген Кулінко
асистент кафедри
теплотехніки



Володимир Скочко
доцент кафедри
архітектурних конструкцій
к.т.н., доц.



Олександр Погосов
доцент кафедри
теплотехніки
к.т.н., доц.

свердловини теплообмінника. Модель базується на методиці відтворення показників температурного поля в суцільному середовищі по принципу термоелектричної аналогії та враховує нерівномірність падіння рівня температури теплоносія по довжині трубопроводів теплообмінника. Даний підхід дозволяє значно спростити процес визначення норми відбору енергії зі свердловини, зменшивши трудовитрати інженерів при проектуванні геотермального поля.

Ключові слова. Ґрунтовий вертикальний теплообмінник; диференціальні рівняння теплотеплопереносу; скінченно-різницеві співвідношення.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Питання визначення раціонального значення величини питомого відбору теплової енергії зі стовбуру свердловини зондового теплового насосу є надзвичайно важливим, оскільки тісно пов'язане з інвестиційними та експлуатаційними показниками проекту реалізації відповідної системи. Знижені показники питомого відбору призводять до збільшення довжини вертикальних колекторів та відповідно значного удорожчання системи (для прикладу, вартість свердловини з роботами та матеріалами складає близько 700-750 грн/м.п.). І навпаки, збільшення показника питомого відбору в умовах недостатньої в неробочий час компенсації (як правило, за рахунок кондуктивних та радіогенних теплових потоків) призводить до постійного посезонного зниження температури масиву ґрунту навколо стовбуру свердловини, має регресивний характер та може призводити до зупинки системи. Таким чином, визначення ефективної питомої норми відбору енергії стовбура свердловини є ключовою задачею при проектуванні великих систем енергопостачання із використанням ґрунтових теплообмінників та теплових насосів, встановлених з метою отримання як теплоти, так і холоду.

Потребує вирішення питання визначення дійсних показників теплопровідності та відповідно питомих відборів теплової енергії для характерних геологічних розрізів України та в рамках реалізації великих проектів тепло- та холодопостачання на базі зондових теплових насосів.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В дослідженні на базі фізичної моделі (Thermal Response Test for BTES Applications) [1 – 4, 7 – 13] пропонується методика, що дозволяє отримати необхідні показники теплопровідності ґрунту по горизонтальних перерізах та в момент виходу роботи системи в номінальний режим, однак, її математичний апарат не є тривіальним та стикається зі значними складнощами

ми в процесі його програмної реалізації.

Коли мова йде про теплотехнічні характеристики ґрунту, що оточує свердловину ґрунтового зонду (наприклад, теплопровідність та теплоємність), то основним рівнянням опису процесів теплообміну вздовж стовбуру свердловини є рівняння падіння (втрат) потужності [5 – 6]:

$$T_{in} - T_{out} = \frac{q}{c_f \cdot G_f}, \quad (1)$$

де q – потужність установки, що нагріває теплоносія, кВт; c_f – питома теплоємність теплоносія, кДж/(кг·К); G_f – витрата теплоносія, кг/с; T_{in} – температура теплоносія, що подається до ґрунтового зонду, К; T_{out} – температура теплоносія, що повертається від ґрунтового зонду, К.

Перепишемо дане рівняння у формі визначення температури теплоносія:

$$T_{out} = T_{in} - \frac{q}{c_f \cdot G_f}. \quad (2)$$

Розділимо ґрунтовий зонд на ділянки та покажемо визначення температури в характерних точках, які показані на рис. 1:

$$\begin{aligned} T_2 &= T_{in} - \Delta T_{1-2}, \\ T_3 &= T_{in} - \Delta T_{1-2} - \Delta T_{2-3}, \\ T_i &= T_{in} - \sum_{i=1}^n \Delta T_{1-i}. \end{aligned} \quad (3)$$

Перепишемо рівняння (3) представивши падіння температури через втрати потужності на ділянці із врахуванням рівняння (2):

$$T_i = T_1 - \frac{1}{c_f \cdot G_f} \sum_{j=2}^n q_{(j-1)-j}. \quad (4)$$

Визначаємо загальне падіння потужності по стовбуру свердловини у вигляді:

$$q = \sum_{j=2}^n q_{(j-1)-j} = (T_{in} - T_{out}) \cdot c_f \cdot G_f = \quad (5)$$

$$= (T_1 - T_n) \cdot c_f \cdot G_f.$$

Як видно із рівняння (5) падіння потужності ділянки ґрунтового зонду знаходиться в обернено пропорційній залежності від значень середніх температур ґрунту на досліджуваній ділянці, м²·К/Вт.

$$q_{(j-1)-j} \sim \frac{1}{\tau_{(j-1)-j}}, \quad (6)$$

де $\tau_{(j-1)-j}$ – середня температура ґрунту на досліджуваній ділянці, К.

Для подальших математичних викладок запишемо диференційне рівняння теплопровідності [5]:

$$a \nabla^2 T + \frac{q}{(c\rho)} = \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (7)$$

де q – тепловий потік від джерела теплоти (рівний витратам теплоти по довжині ґрунтового зонду), Вт/п.м; c – питома теплоємність досліджуваного середовища (в нашому випадку – це ґрунт); ρ – щільність досліджуваного середовища (тобто, ґрунту).

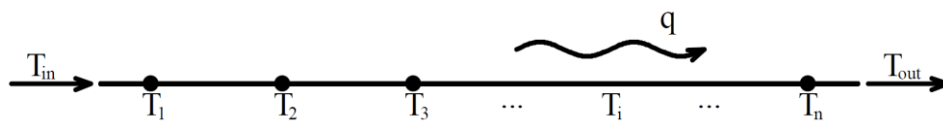


Рис.1. Розподіл ґрунтового зонду на окремі ділянки, що характеризує зміну температури на окремих ділянках.

Умовні позначення (тут і надалі): – ґрунтовий зонд (у розгорнутому вигляді); – напрям потоку падіння теплоти; – точка на межі ділянок, для якої визначається температура.

Fig.1. Distribution of the soil probe into separate areas, which characterizes the temperature change on separate sites.

Symbols (here and below): – ground probe (in expanded form); – direction of the flow of heat loss; – the point at the boundary of the sites for which the temperature is determined.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Спираючись на результати закордонних досліджень [14 – 22], визначимо падіння потужності для довільної ділянки ґрунтового зонду. Відповідну величину пропонується розраховувати в залежності від значень середніх температур ґрунту на різних глибинах залягання:

$$q_{(j-1)-j} = \sum_{j=2}^n q_{(j-1)-j} \frac{\frac{1}{(\tau_{j-1} + \tau_j)/2}}{\sum_{k=2}^m \frac{1}{(\tau_{k-1} + \tau_k)/2}} = \frac{1}{\sum_{k=2}^m \frac{1}{(\tau_{k-1} + \tau_k)}} = q \frac{1}{\sum_{k=2}^m \frac{1}{(\tau_{k-1} + \tau_k)}}. \quad (8)$$

Тут τ – прийняте для даного дослідження позначення температури ґрунту.

Перепишемо рівняння (7) у вигляді скінченних різниць:

$$a_i^p \left(\frac{\Delta_x^2 u_i}{h^2} \right) + \left(\frac{q}{(c_i^p \rho_i^p)} \right) \approx \frac{\Delta T_i^p}{\Delta t_p},$$

або:

$$\frac{a_i^p (T_{i-1}^p - 2T_i^p + T_{i+1}^p)}{h^2} + \frac{q}{(c_i^p \rho_i^p)} = \frac{(T_i^p - T_{i-1}^p)}{t_p - t_{p-1}}. \quad (9)$$

Величина теплоємності деякого визначеного об'єму ґрунту складає:

$$C_i^p = c_i^p \rho_i^p V_i^p, \quad (10)$$

де c_i^p – теплоємність ґрунту в області, що розглядається; ρ_i^p – густина ґрунту в області, що розглядається; V_i^p – об’єм ґрунту в області, що розглядається;

Враховуючи що задача розглядатиметься на площині рівняння (10) записуємо у вигляді:

$$C_i^p = c_i^p \rho_i^p \delta_i^p, \quad (11)$$

де δ_i^p – ширина прошарку ґрунту в перерізі, що розглядається.

Виражаємо опір теплопровідності ґрунту для перерізу свердловини, що розглядається, у наступному вигляді:

$$R_{i,j}^p = \frac{\delta_{i,j}^p}{(\lambda_{i,j}^p \cdot S_{i,j}^p)}, \quad (12)$$

де $S_{i,j}^p$ – площа ґрунту в перерізі, що розглядається; λ – коефіцієнт теплопровідності.

Однак, якщо вважати кожен досліджуваний шар однорідним, то можна перейти до одномірного випадку. Тоді площа перерізу кожного прошарку може бути прийнятою для спрощення рівною 1 м^2 .

Відтак рівняння (12) можна представити у вигляді:

$$R_{i,j}^p = \frac{\delta_{i,j}^p}{\lambda_{i,j}^p}. \quad (13)$$

Перепишемо рівняння (9) у формі термоелектричної аналогії, ввівши питому теплоємність C :

$$\frac{T_{i+1}^p - T_i^p}{R_{i+1,i}^p (C_i^p + C_{i+1}^p)} - \frac{T_i^p - T_{i-1}^p}{R_{i-1,i}^p (C_i^p + C_{i-1}^p)} + \frac{q_i^p}{C_i^p} = \frac{T_i^p - T_{i-1}^p}{t_p - t_{p-1}}. \quad (14)$$

Показник теплопровідності можна представити у вигляді:

$$K_i^p = \frac{1}{R_i^p}. \quad (15)$$

Тоді рівняння (14) може бути записане у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} & - \left(\frac{K_{i,i+1}^p}{C_i^p + C_{i+1}^p} + \frac{K_{i,i-1}^p}{C_i^p + C_{i-1}^p} - \right. \\ & \left. - \frac{1}{t_p - t_{p-1}} \right) \cdot T_i^p + \frac{K_{i,i+1}^p}{C_i^p + C_{i+1}^p} T_{i+1}^p + \\ & + \frac{K_{i,i-1}^p}{C_i^p + C_{i-1}^p} T_{i-1}^p = - \frac{T_i^{p-1}}{t_p - t_{p-1}} - \frac{q_i^p}{C_i^p}. \end{aligned} \quad (16)$$

Необхідно виразити теплопровідність λ_{gr} та теплоємність c_{gr} ґрунту для довільного перерізу (Рис. 2) в умовах одномірної задачі за допомогою системи рівнянь:

$$\begin{cases} R_{1-2} = \frac{\delta_1}{\lambda_{gr}} + \frac{\delta_2}{\lambda_{const}} \\ R_{2-3} = \frac{\delta_3}{\lambda_{const}} \\ R_{3-4} = \frac{\delta_4}{\lambda_{const}} + \frac{\delta_5}{\lambda_{gr}} \end{cases}. \quad (17)$$

Використовуючи формули (17), запишемо рівняння теплопровідності (14) для усіх точок розрахункової моделі. Ці рівняння характеризуватимуть тепловий баланс у досліджуваних точках (див. рис. 2):

1) для точки 2:

$$\begin{aligned} & \frac{T_3^p - T_2^p}{\frac{\delta_3}{\lambda_{const}} c_{const} \rho_{const}} \times \\ & \times \frac{1}{\left(\left(\delta_2 + \frac{\delta_3}{2} \right) + \left(\frac{\delta_3}{2} + \delta_4 \right) \right)} - \\ & - \frac{T_2^p - T_1^p}{\left(\frac{\delta_1}{\lambda_{gr}} + \frac{\delta_2}{\lambda_{const}} \right)} \times \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} & \times \frac{1}{\left(c_{const} \rho_{const} \left(\delta_2 + \frac{\delta_3}{2} \right) + c_{gr} \rho_{gr} (2\delta_1) \right)} + \frac{T_3^p - T_2^p}{\left(\left(\delta_4 + \frac{\delta_3}{2} \right) + \left(\delta_2 + \frac{\delta_3}{2} \right) \right)} + \\ & + \frac{q_2^p}{c_{const} \rho_{const} \left(\delta_2 + \frac{\delta_3}{2} \right)} = \frac{T_2^p - T_2^{p-1}}{t_p - t_{p-1}}; \quad + \frac{q_3^p}{c_{const} \rho_{const} \left(\delta_4 + \frac{\delta_3}{2} \right)} = \frac{T_3^p - T_3^{p-1}}{t_p - t_{p-1}}. \end{aligned}$$

2) для точки 3:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\left(\frac{\delta_4}{\lambda_{const}} + \frac{\delta_3}{\lambda_{gr}} \right)} \times \\ & \times \frac{T_4^p - T_3^p}{\left(c_{const} \rho_{const} \left(\delta_4 + \frac{\delta_3}{2} \right) + c_{gr} \rho_{gr} (2\delta_5) \right)} - \quad (19) \\ & - \frac{1}{\frac{\delta_3}{\lambda_{const}} c_{const} \rho_{const}} \times \end{aligned}$$

Для спрощення форми запису рівнянь (18) і (19) припустимо, що при влаштуванні системи подачі теплоносія свердловину засипають тим же ґрунтом, що був видобутий при її бурінні. Ці припущення можна сформулювати у формі наступних математичних рівностей:

$$\begin{cases} \lambda_{const} = \lambda_{gr} = \lambda \\ c_{const} = c_{gr} = c \\ \rho_{const} = \rho_{gr} = \rho \end{cases} \quad (20)$$

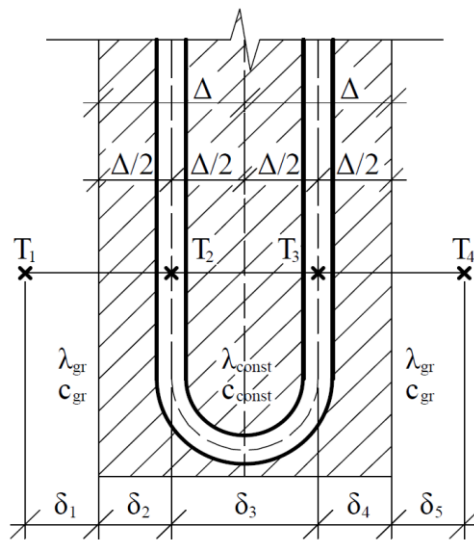


Рис.2. Зображення довільної площини ґрунтового зонду, що розглядається. Позначення (тут і надалі): **—** – межі труби ґрунтового зонду; **✕** – характерна точка в перерізі стовбуру свердловини, для якої температура визначається експериментальним шляхом.

Fig.2. The image of the arbitrary plane of the ground probe examined. Symbols (here and below): **—** – the boundaries of the soil probe tube; **✕** – characteristic point in the section of the wellbore for which the temperature is determined experimentally.

Із врахуванням припущень (20) переписуємо рівняння (18) і (19):

$$\begin{aligned} & \frac{T_3^p - T_2^p}{\frac{\delta_3}{\lambda} c \rho (\delta_2 + \delta_3 + \delta_4)} - \frac{T_2^p - T_1^p}{\frac{\delta_1 + \delta_2}{\lambda} c \rho \left(2\delta_1 + \delta_2 + \frac{\delta_3}{2} \right)} + \\ & + \frac{q_2^p}{c \rho \left(\delta_2 + \frac{\delta_3}{2} \right)} = \frac{T_2^p - T_2^{p-1}}{t_p - t_{p-1}}, \end{aligned}$$

або:

$$\frac{\lambda}{c\rho} \left[\frac{T_3^p - T_2^p}{\delta_3(\delta_2 + \delta_3 + \delta_4)} - \frac{T_2^p - T_1^p}{(\delta_1 + \delta_2)(2\delta_1 + \delta_2 + \delta_3/2)} \right] + \frac{1}{c\rho} \left[\frac{q_2^p}{\delta_2 + \delta_3/2} \right] = \frac{T_2^p - T_2^{p-1}}{t_p - t_{p-1}}; \quad (21)$$

$$\frac{T_4^p - T_3^p}{\frac{\delta_4 + \delta_3}{\lambda} c\rho \left(\frac{\delta_3}{2} + \delta_4 + 2\delta_3 \right)} - \frac{T_3^p - T_2^p}{\frac{\delta_3}{\lambda} c\rho (\delta_2 + \delta_3 + \delta_4)} + \frac{q_3^p}{c\rho \left(\delta_4 + \frac{\delta_3}{2} \right)} = \frac{T_3^p - T_3^{p-1}}{t_p - t_{p-1}},$$

або:

$$\frac{\lambda}{c\rho} \left[\frac{T_4^p - T_3^p}{(\delta_4 + \delta_3)(\delta_3/2 + \delta_4 + 2\delta_3)} - \frac{T_3^p - T_2^p}{\delta_3(\delta_2 + \delta_3 + \delta_4)} \right] + \frac{1}{c\rho} \left[\frac{q_3^p}{\delta_4 + \delta_3/2} \right] = \frac{T_3^p - T_3^{p-1}}{t_p - t_{p-1}}. \quad (22)$$

Введемо заміну змінних:

$$\begin{cases} X = \frac{\lambda}{c\rho} \\ Y = \frac{1}{c\rho} \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} X = \frac{\lambda}{c\rho} \\ Y = \frac{1}{c\rho} \end{cases} \quad (24)$$

В результаті отримуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} X \cdot A_1 + Y \cdot B_1 = D_1 \\ X \cdot A_2 + Y \cdot B_2 = D_2 \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} X \cdot A_1 + Y \cdot B_1 = D_1 \\ X \cdot A_2 + Y \cdot B_2 = D_2 \end{cases} \quad (26)$$

Тут буквені позначення мають наступний зміст:

$$\frac{T_3^p - T_2^p}{\delta_3(\delta_2 + \delta_3 + \delta_4)} \quad (27)$$

$$-\frac{T_2^p - T_1^p}{(\delta_1 + \delta_2)(2\delta_1 + \delta_2 + \frac{\delta_3}{2})} = A_1$$

та

$$\frac{T_4^p - T_3^p}{(\delta_4 + \delta_3) \left(\frac{\delta_3}{2} + \delta_4 + 2\delta_3 \right)} - \frac{T_3^p - T_2^p}{\delta_3(\delta_2 + \delta_3 + \delta_4)} = A_2; \quad (28)$$

$$-\frac{T_3^p - T_2^p}{\delta_3(\delta_2 + \delta_3 + \delta_4)} = A_2;$$

$$\frac{q_2^p}{\delta_2 + \frac{\delta_3}{2}} = B_1 \quad (29)$$

та

$$\frac{q_3^p}{\delta_4 + \frac{\delta_3}{2}} = B_2; \quad (30)$$

$$\frac{T_2^p - T_2^{p-1}}{t_p - t_{p-1}} = D_1 \quad (31)$$

та

$$\frac{T_3^p - T_3^{p-1}}{t_p - t_{p-1}} = D_2 \quad (32)$$

Із рівняння (25) виразимо X :

$$X = \frac{(D_1 - Y \cdot B_1)}{A_1}$$

та, підставивши в рівняння (26), виразимо змінну Y :

$$\frac{(D_1 - Y \cdot B_1)}{A_1} \cdot A_2 + Y \cdot B_2 = D_2,$$

$$\frac{D_1}{A_1} A_2 - \frac{Y \cdot B_1}{A_1} A_2 + Y \cdot B_2 = D_2,$$

$$Y \left(B_2 - \frac{B_1 \cdot A_2}{A_1} \right) = D_2 - \frac{D_1}{A_1} A_2$$

В результаті елементарних перетворень та спрощень одержимо наступну тотожність для визначення змінної Y :

$$Y = \frac{\left(D_2 - \frac{D_1}{A_1} A_2 \right)}{\left(B_2 - \frac{B_1}{A_1} A_2 \right)}. \quad (33)$$

Підставимо Y в рівняння (25):

$$\begin{aligned} X &= \frac{\left(D_1 - \frac{\left(D_2 - \frac{D_1}{A_1} A_2 \right)}{\left(B_2 - \frac{B_1}{A_1} A_2 \right)} \cdot B_1 \right)}{A_1} = \\ &= \frac{D_1 \cdot B_2 - D_1 \frac{B_1}{A_1} A_2}{\left(B_2 - \frac{B_1}{A_1} A_2 \right) A_1} = \\ &= \frac{D_2 \cdot B_1 + D_1 \frac{B_1}{A_1} A_2}{\left(B_2 - \frac{B_1}{A_1} A_2 \right) A_1} = \\ &= \frac{\frac{D_1 \cdot B_2}{A_1} - \frac{D_2 \cdot B_1}{A_1}}{B_2 - \frac{B_1}{A_1} A_2} \end{aligned}$$

й з рештою одержимо:

$$X = \frac{(D_1 \cdot B_2 - D_2 \cdot B_1)}{(A_1 \cdot B_2 - A_2 \cdot B_1)}. \quad (34)$$

Відтак, остаточне розв'язання системи (25) – (26) має наступний вигляд вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} X &= \frac{(D_1 \cdot B_2 - D_2 \cdot B_1)}{(A_1 \cdot B_2 - A_2 \cdot B_1)} \end{aligned} \right. \quad (35)$$

$$\left\{ \begin{aligned} Y &= \frac{(D_2 \cdot A_1 - D_1 \cdot A_2)}{(B_2 \cdot A_1 - B_1 \cdot A_2)} \end{aligned} \right. \quad (36)$$

Виразимо X через Y з рівняння (25):

$$X = \frac{(D_1 - Y \cdot B_1)}{A_1}.$$

При зворотній підстановці з (23) та (24) отримаємо:

$$c\rho = \frac{1}{Y}, \quad (37)$$

або

$$X = \frac{\lambda}{1/Y} = \lambda \cdot Y, \quad (38)$$

звідки:

$$\lambda = \frac{X}{Y}. \quad (39)$$

Фактично, вираз (37) та (39) являються розв'язанням поставленої задачі з визначення характеристик c та λ , оскільки, знаючи або визначивши густину ґрунтового середовища у досліджуваному прошарку (інженерно-геологічному елементів) ρ , можна без ускладнень розрахувати його питому теплоємність та теплопровідність.

Слід додати, що виконання відповідних розрахунків повинне виконуватися зі сталою певною періодичністю протягом деякого тестового проміжку часу. Так як результати окремих розв'язань (експериментів) можуть дещо відрізнятися (через похибки вимірювань та власне обчислень) необхідно приймати і використовувати у подальших практичних дослідженнях і розрахунках усереднені показники c та λ .

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В рамках реалізації потужних теплонасосних систем тепло- та холодопостачання виникає гостра необхідність в експериментально-аналітичному визначенні значень теплових відборів з вертикальних колекторів.

Існуючі експериментальні системи потребують математичного апарату для можливості отримання показників теплопровідності та питомих теплових відборів.

Запропонований підхід базується на методі термоелектричної аналогії й скіченно-різницевому представленні рівнянь теплового балансу та потребує набагато менших у порівнянні з існуючими моделями (зокрема Thermal Response Test for BTES Applications) обчислювальних потужностей.

Подальші дослідження потребують апробації та експериментального підтвердження обраного підходу.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Carslaw H. S. and J. C. Jaeger** Conduction of Heat in Solids, Second ed., Oxford University Press, Great Britain. 1959.
2. **Eklof C. and S. Gehlin.** TED – A Mobile Equipment for Thermal Response Test. Master's Thesis 1996:198E. Lulea University of Technology, Sweden. 1996.
3. **Driscoll, F.G.** Groundwater and Wells, 2d Ed. St. Paul, MN: Johnson Screens. 1986.
4. **Gass, T.E., T.W. Bennett, J. Miller, R. Miller. n.d.** Manual of Water Well Maintenance and Rehabilitation Technology. Reprinted by the National Water Well Association from the Robert S. Kerr Environmental Research Center, USPA, Ada, Oklahoma.
5. **ASHRAE.** ASHRAE Handbook—HVAC Applications, Chapter 34, Geothermal Energy, pp. 34.9–34.34. Atlanta: ASHRAE. 2011.
6. **Den Braven, K.R.** Survey of Geothermal Heat Pump Regulations in the United States. Proceedings of the Second Stockton International Geothermal Conference. Galloway, NJ: The Richard Stockton College. 1998.
7. **Kavanaugh, S.P.** A 12-step method for closed-loop ground-source heat pump design. ASHRAE Transactions 114(2). 2008.
8. **Rafferty, K.** A capital cost comparison of commercial ground-source heat pump systems. ASHRAE Transactions 101(2). 1995.
9. **Remund, C.** Ground Source Heat Pump Residential and Light Commercial Design and Installation Guide. Stillwater, OK: International Ground Source Heat Pump Association. 2011.
10. **Kavanaugh, S.P., M. Green, and K. Mescher. (2012).** Long-term commercial GSHP performance, part 4: Installation costs. ASHRAE Journal 54(10).
11. **Sachs, H.** Geology and Drilling Methods for Ground Source Heat Pump System Installation: An Introduction for Engineers. Atlanta: ASHRAE. 2002.
12. **Parker, D.S., and J. Proctor.** Hidden power drains: Trends in residential heating and cooling fan watt power demand. FSEC-PF361-01. Cocoa, FL: Florida Solar Energy Center. 2001.
13. **Allan, M.L.** Improvement of cementitious grout thermal conductivity for GHP applications. Preliminary Report, Brookhaven National Laboratory, U.S. Department of Energy Contract DE-AC02-76CH00016, June. 1996.
14. **Moody, L.F.** Friction factors for pipe flow. ASME Transactions 66:671–84. 1944.
15. **Ingersoll, L R. and H.J. Plass** Theory of the Ground Pipe Heat Source for the Heat Pump. ASHVE Transactions vol. 54 p. 339-348. 1948.
16. **Kavanaugh, S.P.** Field Tests for Ground Thermal Properties – Methods and Impact on Ground-Source Heat Pump Design. ASHRAE Transactions. 106(1):851-855. 2000.
17. **Kavanaugh, S.P., and K. Rafferty.** Ground Source Heat Pumps: Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. 1997.
18. **Eskilson P.** Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. PhD-thesis, Department of Technical Physics. University of Lund, Sweden. 1987.
19. **Åberg B. and S. Johansson (1988).** Vattenströmning till och från borrhålsvärmeläge (Water flow to and from a borehole heat store). Report R6:1988. Swedish Council for Building Design. (In Swedish).
20. **Kassabian, M.** GROUND SOURCE HEAT PUMPS Analysing the Brine Flow in Boreholes, Mariehäll. Stockholm, The Royal Institute of Technology. MSc. 2007.
21. **Webster, J. G.** Mechanical variables measurement. Solid, Fluid, and thermal. Boca Raton, Florida. 2000.
22. **Chiasson, A., S. Rees, J. Spitler and M. Smith** "A Model for Simulating the Performance of a Shallow Pond as a Supplemental Heat Rejecter with ClosedLoop Ground-Source Heat Pump Systems." ASHRAE Transaction 106(2): 1-15. 2000.

REFERENCES

1. **Carslaw H. S. and J. C. Jaeger (1959).** Conduction of Heat in Solids, Second ed., Oxford University Press, Great Britain.
2. **Eklof C. and S. Gehlin. (1996).** TED – A Mobile Equipment for Thermal Response Test. Master's Thesis 1996:198E. Lulea University of Technology, Sweden.

3. **Driscoll, F.G. (1986).** Groundwater and Wells, 2d Ed. St. Paul, MN: Johnson Screens.
4. **Gass, T.E., T.W. Bennett, J. Miller, R. Miller. n.d.** Manual of Water Well Maintenance and Rehabilitation Technology. Reprinted by the National Water Well Association from the Robert S. Kerr Environmental Research Center, USPA, Ada, Oklahoma.
5. **ASHRAE. 2011.** ASHRAE Handbook—HVAC Applications, Chapter 34, Geothermal Energy, pp. 34.9–34.34. Atlanta: ASHRAE.
6. **Den Braven, K.R. (1998).** Survey of Geothermal Heat Pump Regulations in the United States. Proceedings of the Second Stockton International Geothermal Conference. Galloway, NJ: The Richard Stockton College.
7. **Kavanaugh, S.P. (2008).** A 12-step method for closed-loop ground-source heat pump design. ASHRAE Transactions 114(2).
8. **Rafferty, K. (1995).** A capital cost comparison of commercial ground-source heat pump systems. ASHRAE Transactions 101(2).
9. **Remund, C. (2011).** Ground Source Heat Pump Residential and Light Commercial Design and Installation Guide. Stillwater, OK: International Ground Source Heat Pump Association.
10. **Kavanaugh, S.P., Green M., and Mescher K. (2012).** Long-term commercial GSHP performance, part 4: Installation costs. ASHRAE Journal 54(10).
11. **Sachs, H. (2002).** Geology and Drilling Methods for Ground Source Heat Pump System Installation: An Introduction for Engineers. Atlanta: ASHRAE.
12. **Parker D.S., Proctor J. (2001).** Hidden power drains: Trends in residential heating and cooling fan watt power demand. FSEC-PF361-01. Cocoa, FL: Florida Solar Energy Center.
13. **Allan M.L. (1996).** Improvement of cementitious grout thermal conductivity for GHP applications. Preliminary Report, Brookhaven National Laboratory, U.S. Department of Energy Contract DE-AC02-76CH00016, June.
14. **Moody, L.F. (1944).** Friction factors for pipe flow. ASME Transactions 66:671–84.
15. **Ingersoll, L R. and H.J. Plass (1948).** Theory of the Ground Pipe Heat Source for the Heat Pump. ASHVE Transactions vol. 54 p. 339-348
16. **Kavanaugh, S.P. (2000).** Field Tests for Ground Thermal Properties – Methods and Impact on Ground-Source Heat Pump Design. ASHRAE Transactions. 106(1):851-855.
17. **Kavanaugh, S.P., and K. Rafferty. (1997).** Ground Source Heat Pumps: Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
18. **Eskilson P. (1987).** Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. PhD-thesis, Department of Technical Physics. University of Lund, Sweden.
19. **Åberg B. and S. Johansson (1988).** Vattenströmning till och från borrhålsvärmeläge (Water flow to and from a borehole heat store). Report R6:1988. Swedish Council for Building Design. (In Swedish).
20. **Kassabian, M. (2007).** GROUND SOURCE HEAT PUMPS Analysing the Brine Flow in Boreholes, Mariehäll. Stockholm, The Royal Institute of Technology. MSc.
21. **Webster, J.G. (2000).** Mechanical variables measurement. Solid, Fluid, and thermal. Boca Raton, Florida.
22. **Chiasson, A., Rees S., Spittler J. and Smith M. (2000).** "A Model for Simulating the Performance of a Shallow Pond as a Supplemental Heat Rejecter with ClosedLoop Ground-Source Heat Pump Systems." ASHRAE Transaction 106(2): 1-15.

Diagnostic technique for wells of soil heat pumps in terms of thermal potential depending on the type of soil

*Yevhen Kulinko, Volodymyr Skochko,
Oleksandr Pohosov*

Summary. When determining the specific rate of energy extraction from a well by ground-based heat pumps, use DSTU B.2.5-44: 2010, which concerns only the design of a heating system and does not cover all options for operating such systems, including the modes of using heat pumps to cool buildings and structures. When designing the appropriate heat supply and cold supply systems, there is a need to apply physical and mathematical approaches to obtain the dependences of the rate of thermal selection from the soil environment on the operating conditions of the energy supply system and to take into account the properties of various types of soils in which the heat exchanger is located. The most difficult task that arises in determining the specific heat energy selection standards is the calculation of the specific heat and technical characteristics of the wells (heat capacities and thermal conductivity coefficients), which is deci-

sive at the initial stage of the design of the geothermal field (namely, the depth, number and distance between wells). For the experimental determination of thermal characteristics, a mobile autonomous heat source (electric boiler) is used to completely saturate the volume of soil surrounding the well with a soil heat exchanger, while simultaneously monitoring power parameters, coolant flow rate, its temperature and its stabilization time in the supply and return pipelines.

This study proposes a mathematical model for determining the thermal characteristics of a soil massif in different horizontal flat sections of a borehole of a heat exchanger. The model is based

on the method of reproducing temperature field indicators in a continuous medium according to the principle of thermoelectric analogy and takes into account the non-uniformity of the drop in the temperature level of the coolant along the length of the heat exchanger pipelines. This approach can significantly simplify the process of determining the rate of energy extraction from the well, reducing the labor costs of engineers in the design of the geothermal field.

Keywords. Soil vertical heat exchanger; differential heat transfer equations; finite-difference relations.