

zle Wear in Converter. *Kang T'ieh/Iron and Steel*. 2023. 58 (8). pp. 99–109. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20230084.

25. Dong P.-Y., Zheng S.-G., Zhu M.-Y. Simulation and Application of Post-combustion Oxygen Lance in a Top-Blown Converter. *Ironmaking and Steelmaking*. 2023. 50 (1). pp. 55–66. DOI: 10.1080/03019233.2022.2083928.

26. Mikulionok I.O. Hydrodynamic Means of Heat Exchange Intensification in Constant Cross-Section Round Channels. *Energotehnologii ta Resursozberenzia. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2024. No. 1. pp. 124–140. DOI: 10.33070/etars.1.2024.11.

27. Zhu M., Lou W., Wang W. Research Progress of Numerical Simulation in Steelmaking and Continuous Casting Processes. *Jinshu Xuebao/Acta Metallurgica Sinica*. 2018. 54 (2). pp. 131–150. DOI: 10.11900/0412.1961.2017.00430.

28. Tuz V.O., Lebed N.L. Thermohydraulic Distribution in Twisted Micro Heat Exchangers Mounted in

Annular Channels. *Energotehnologii ta Resursozberenzia. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2021. No. 4. pp. 71–79. DOI: 10.33070/etars.4.2021.07.

29. Lü M., Chen S., Hao Y., Guo H., Li D., Zhang Z. Oxygen Supply System based on Oxygen Lance Nozzle Wear in Converter. *Kang T'ieh/Iron and Steel*. 2023. 58 (8). pp. 99–109. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20230084.

30. Zhao H., Wang J., Liu F., Sohn H.Y. Physical Modeling of Mass Transfer Between Slag and Metal in Combined Blown Converter and Application. *International Journal of Minerals. Metallurgy and Materials*. 2022. 29 (1). pp. 70–77. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20220288.

31. Long H., Ding L., Zhao H., Chun T., Qian L. Research Progress of CO Removal in Flue Gas of Typical Steel Production Process. *Kang T'ieh/Iron and Steel*. 2023. 58 (8). pp. 1–24. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20230132.

Received October 28, 2024

УДК 620.92:697.1

DOI: 10.33070/etars.4.2024.05

Безродний М.К.¹, докт. техн. наук, проф., ORCID: 0000-0003-0793-7317,

Притула Н.О.¹, канд. техн. наук, ORCID: 0000-0002-3500-5165,

Тесленко О.І.², канд. техн. наук, ORCID: 0000-0002-3772-5991,

Матусевич Х.Б.¹, ORCID: 0009-0009-8853-6734

¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

просп. Берестейський, 37, 03056 Київ, Україна, e-mail: prytula.natalia@iill.kpi.ua

² Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

вул. Антоновича, 172, 03150 Київ, Україна, e-mail: teslenko1961@gmail.com

Методологічні підходи щодо визначення загальних параметрів сонячних колекторів та ґрунтового теплового акумулятора для теплонасосної системи опалення

Анотація. Розглянуто та описано принцип роботи комбінованої теплонасосної системи опалення будівлі у складі теплового насоса, сонячних колекторів та вертикальних ґрунтових теплообмінників. Ця теплонасосна система є енергоефективною та екологічно чистою технологією використання відновлюваних джерел енергії від сонячного випромінювання та ґрунту, що дає можливість замінити традиційне органічне паливо для теплопостачання будівлі. Виконано аналіз безпосереднього використання сонячної енергії в теплонасосних

системах опалення як низькопотенційного джерела теплоти. З'ясовано, що ефективно її використання у порівнянні з природною теплотою ґрунту обмежено сонячним періодом доби. Відмічено, що необхідно врахувати відмінність кліматичних умов, сонячної інсоляції та теплових властивостей ґрунту для різних регіонів країни, які впливають на режими роботи та енергоефективність теплонасосної системи опалення. Ця теплонасосна система опалення працює у поєднанні із сонячними колекторами та вертикальним ґрунтовим теплообмінником у реверсному режимі: у літній період енергія сонячного випромінювання утилізується сонячними колекторами та із застосуванням теплообмінників акумулюється в ґрунті, а взимку (в опалювальний період) акумульована теплота вилучається з ґрунту з використанням теплового насосу. Здійснено аналітичне дослідження балансових енергетичних рівнянь та розроблено методологічні підходи щодо розрахункового визначення необхідної площі сонячних колекторів та загальної глибини свердловин, які забезпечують функціонування системи опалення протягом усього опалювального сезону з урахуванням впливу середньомісячних значень наступних факторів: температурного коефіцієнта, середнього теплового потоку падаючої радіації, середньої тривалості інсоляції в неопалювальний період, питомого теплового потоку від ґрунту, середньої мінімальної питомої затрати зовнішньої електроенергії для роботи електродвигунів теплового насосу та циркуляційного насосу. Отримані результати можуть бути використані в подальших конструкторських розробках теплонасосних систем опалення з використанням відновлювальної енергії сонця та ґрунту для конкретних житлових будинків із заданими вихідними даними. *Бібл. 24, рис. 3, табл. 4.*

Ключові слова: опалення, тепловий насос, ґрунтовий акумулятор, сонячний колектор, енергетична ефективність.

Вступ

Геокліматологія України характеризується наявністю зимового періоду з температурами зовнішнього повітря до -25°C , що обумовлює необхідність обігріву помешкань будівель та споруд. Опалювальний період у регіонах України триває від 150 до 186 діб протягом року. За даними Державної служби статистики України, витрати теплоти на опалення досягають 30 % (31 110 тис. т н.е. за 2021 р.) загального кінцевого споживання енергії в енергетичному балансі країни [1, 2], на що витрачаються значні обсяги первинних енергоресурсів, насамперед імпортованих природного газу та вугілля. З метою зменшення залежності України від імпортованих енергоносіїв необхідно впроваджувати енергоефективні технології та забезпечити ширше застосування відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та альтернативних видів палива, що передбачається національними нормативно-правовими документами країни: Енергетичними стратегіями України [3, 4], Національним планом дій з енергоефективності [5], Національним планом з енергетики та клімату [6], Національним планом дій з відновлюваної енергетики [7].

Національний план дій України з відновлюваної енергетики [7] визначає траєкторії її розвитку за секторами до 2030 р.: частка ВДЕ у валово-

му кінцевому споживанні енергії у 2030 р. в Україні становитиме 27 %. У системах теплопостачання та холодопостачання цей показник досягне 32,5 %, що в перерахунку на натуральні величини становитиме 7 400 тис. т н.е., зокрема загальний внесок (у кінцевий обсяг енергоспоживання), очікуваний до 2030 р., за джерелами відновлюваної енергії, складе: сонячне випромінювання — до 163 тис. т н.е.; енергія від геотермальних теплових насосів (ТН) — до 165 тис. т н.е.

Відновлювані джерела енергії, такі як сонячна інсоляція та геотермальна енергія, викликають дедалі більший інтерес для забезпечення цілей теплопостачання. Визначенню напрямів розвитку та енергетичного потенціалу джерел ВДЕ для систем теплопостачання приділена значна кількість вітчизняних наукових досліджень, зокрема [8–11].

Теплова енергія, що зберігається у ґрунті, може бути використана як універсальне джерело низькопотенційної теплової енергії, оскільки на глибині більш 5 м температура ґрунту залишається стабільною упродовж усього року та відповідає середній температурі повітря, яка в Україні становить $8\text{--}12^{\circ}\text{C}$. Також все більше звертається увага на використання екологічно чистого джерела енергії — сонячної інсоляції, яка є доступною на усій території України та відповідає високим стандартам екології. Використання теплоти від

Таблиця 1. Розподіл середньомісячної інтенсивності падаючої радіації від місяця року [18, 19]
Table 1. Distribution of the average monthly intensity of incident radiation by month of the year [18, 19]

Неопалювальний період						
Місяць року	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Середня інтенсивність радіації, Вт/м ²	316,79	345,94	394,09	374,37	360,04	318,76
Опалювальний період						
Місяць року	X	XI	XII	I	II	III
Середня інтенсивність радіації, Вт/м ²	250,13	120,71	123,69	148,09	201,14	293,84

сонячного випромінювання можна здійснювати через безпосереднє забирання його з верхніх шарів ґрунту або за допомогою сонячних колекторів (СК). Використання енергії цих екологічно чистих відновлюваних джерел за допомогою теплових насосів стає все більш ефективним та перспективним методом зменшення використання паливно-енергетичних ресурсів у системах теплопостачання будівель [12–17].

Аналіз ефективності використання сонячної енергії показав, що безпосереднє використання сонячної інсоляції взимку для теплонасосних систем (ТНС) опалення в кліматичних умовах України є малоперспективним через низьку інтенсивність сонячного випромінювання в зимові місяці. У цьому можна перекоонатися на основі даних табл. 1.

Наведені дані відображають лише сонячну енергію, що надходить протягом року, і не відображають рівень використання споживачем цієї енергії, оскільки він залежить від конструкції сонячного колектора та його режиму роботи. Однак цю сонячну радіацію можна використати для збільшення теплового потенціалу ґрунту за рахунок її накопичування протягом літнього періоду у ґрунтовому акумуляторі теплоти. При цьому кількість теплоти, що направляється в ґрунтовий акумулятор, залежить від конструкції сонячного колектора та режиму його роботи. У більшості випадків використовуються плоскі сонячні колек-

тори, і для обчислення кількості акумульованої теплоти треба врахувати їх ККД. Середньомісячні значення таких колекторів у неопалювальний (літній) період, за даними роботи [18], наведені у табл. 2.

Таким чином, під час опалювального періоду теплота, накопичена в акумуляторі, може бути використана для підігріву проміжного теплоносія, що циркулює в нижньому (низькотемпературному) контурі ТН.

В опалювальний період значення ККД сонячних колекторів отримані в роботі [20] при різних температурах теплоносія на виході із СК за умов подальшого його спрямування до ТНС опалення. Згідно з даними роботи [21], рекомендовані значення цієї температури знаходяться в діапазоні 10–15 °С, оскільки подальше її збільшення призводить до різкого зменшення ККД СК. Отриманий рівень теплових потоків після СК та їх розподіл за місяцями протягом року може бути наведений у вигляді залежностей, що подані суцільними лініями на рис. 1.

Як видно з рис. 1, отримані в зимовий час середньомісячні теплові потоки знаходяться на дуже низькому рівні. Крім того, подані суцільними лініями дані характеризують середні за світловий день теплові потоки, а середньодобові показники є ще нижчими. Середньодобові показники можна отримати з урахуванням кількості годин інсоляції в кожному з місяців року, яка залежить від тривалості світлового дня протягом доби, що наведена у табл. 3 [18].

Середньодобові теплові потоки можна розраховувати за формулою

$$(q_{\text{пад}} \eta_{\text{СК}})_p = (q_{\text{пад}} \eta_{\text{СК}}) [n (\tau_{\text{інсол}})] / 24. \quad (1)$$

Розрахункові залежності теплових потоків за цією формулою наведені на рис. 1 штриховими лініями.

Отримані результати вказують на значну різ-

Таблиця 2. Середньомісячний коефіцієнт корисної дії сонячного колектора від місяця року [18]

Table 2. Average monthly efficiency factor of the solar collector by month of the year [18]

Неопалювальний період						
Місяць року	IV	V	VI	VII	VIII	IX
ККД СК	0,699	0,734	0,732	0,695	0,620	0,468

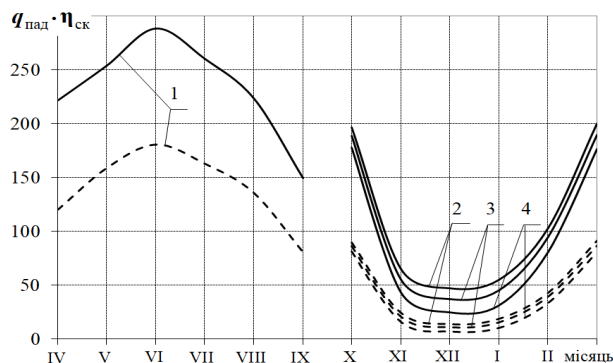


Рис. 1. Розподіл середньомісячних теплових потоків у денний час (суцільні лінії) та середніх за добу (штрихові лінії) за місяцями року: 1 — неопалювальний період року; 2, 3, 4 — опалювальний період року (температура теплоносія на виході із СК — 10, 12 та 15 °C відповідно).

Figure 1. Distribution of average monthly heat flows during the day (solid lines) and average per day (dashed lines) by months of the year: 1 — non-heating period of the year; 2, 3, 4 — the heating period of the year (heat carrier temperature at the outlet of the solar collector is 10 °C, 12 °C, and 15 °C).

Таблиця 3. Кількість годин добової сонячної інсоляції від місяця року [18]

Table 3. Number of hours of daily solar insolation by month of the year [18]

Неопалювальний період						
Місяць року	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Кількість годин сонячної інсоляції, год	13	15	15	15	14	13
Опалювальний період						
Місяць року	X	XI	XII	I	II	III
Кількість годин сонячної інсоляції, год	11	9	7	8	10	11

ницю в теплових потоках, які можна отримати від сонячного випромінювання влітку та взимку для подальшого ефективного використання. Також рівень теплових потоків у найхолодніші зимові місяці настільки низький, що ставить під сумнів їх використання у ТНС опалення, що буде ще наглядніше продемонстровано далі.

Аналіз безпосереднього використання сонячної енергії в ТНС опалення як нижнього джерела теплоти було здійснено у роботі [20]. На рис. 2 наведені результати порівняння затрат зовнішньої енергії на ТНС опалення з використанням сонячної енергії та з використанням природної

теплоти ґрунту (без акумулювання).

З рис. 2 видно, що питома затрата зовнішньої роботи на отримання одиниці теплоти для забезпечення опалення у денний час (суцільні лінії) завжди менше відповідної роботи в ТНС з використанням теплоти ґрунту (лінії А, Б, В). Однак якщо система опалення не має альтернативного джерела для забезпечення роботи у нічний час, то для цілодобової роботи системи з тією ж тепловою потужністю необхідно збільшити затрати зовнішньої енергії для накопичення теплоти в баку-акумуляторі для роботи у нічний час, а питому затрату зовнішньої роботи перерахувати за формулою:

$$l_p = l_{оп}^{min} 24 / [n (\tau_{инсол})], \quad (2)$$

де $l_{оп}^{min}$ — питомі затрати зовнішньої енергії на

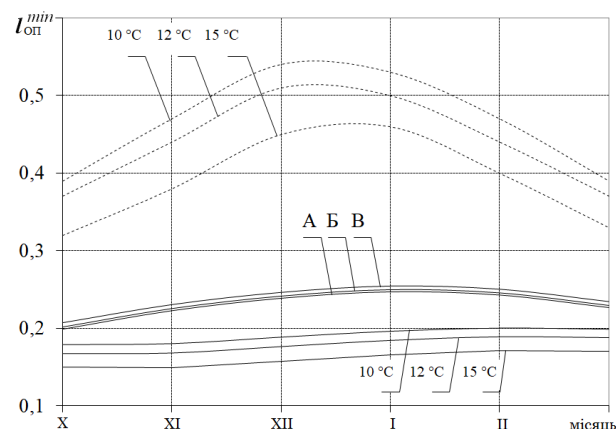


Рис. 2. Середньомісячні мінімальні питомі затрати зовнішньої енергії на ТНС опалення з використанням теплоти сонячної інсоляції в денний час (суцільні лінії) та середні за добу (штрихові лінії) від місяця року роботи з відповідними затратами для ТНС опалення при температурі теплоносія на вході в сонячний колектор 10, 12 та 15 °C; А, Б, В — ТНС опалення з використанням природної теплоти ґрунту з вертикальними ґрунтовими теплообмінниками при глибині свердловини $L_{св}$ = 20; 50; 100 м.

Figure 2. Comparison of the average monthly minimum specific costs of external energy for the HP heating system using the heat of solar insolation during the day (solid lines) and the average per day (dashed lines) from the month of the year of operation with the corresponding costs for the HP heating system at the temperature of the coolant at the entrance to the solar collector of 10 °C, 12 °C, and 15 °C; А, Б, В — HP heating system using natural heat of the ground with vertical ground heat exchangers at the depth of the well 20 m, 50 m, and 100 m.

ТНС опалення в денний час; $n(\tau_{\text{інсол}})$ — середня кількість годин сонячної інсоляції за день від місяця.

Розраховані за рівнянням (2) середньодобові мінімальні питомі затрати зовнішньої енергії на ТНС опалення в залежності від місяця опалювального періоду показані на рис. 2 штриховими лініями. Видно, що питома затрата зовнішньої роботи стає більшою, ніж у випадку використання в ТНС опалення природної теплоти ґрунту, а це, у свою чергу, свідчить про неефективність роботи такої системи з безпосереднім використанням сонячної енергії. На основі цього можна зробити висновок, що сонячна енергія може бути ефективно використана в ТНС опалення в зимовий період за рахунок її накопичення в літній період у ґрунтових акумуляторах теплоти.

На рис. 3 наведена принципова схема ТНС опалення з використанням попередньо акумульованої теплоти сонячного випромінювання в ґрунтовому акумуляторі.

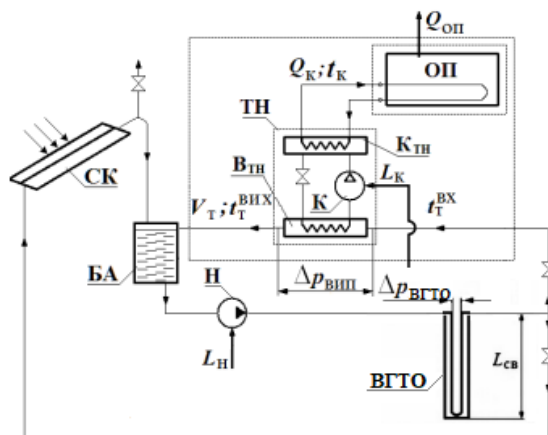


Рис. 3. Принципова схема ТНС опалення з акумуляцією сонячної енергії в ґрунті із використанням вертикальних ґрунтових теплообмінників: СК — сонячний колектор; БА — бак-акумулятор; ВГТО — вертикальний ґрунтовий теплообмінник; $L_{\text{св}}$ — глибина свердловини; ОП — опалюване приміщення; ТН — тепловий насос; $K_{\text{тн}}$ — конденсатор ТН; $B_{\text{тн}}$ — випарник ТН; К — компресор; Н — насос; $L_{\text{к}}$ — робота приводу компресора ТН; $L_{\text{н}}$ — робота приводу насоса.

Figure 3. Schematic diagram of a heat pump heating system with the accumulation of solar energy in the ground using vertical ground heat exchangers: СК — solar collector; БА — storage tank; ВГТО — vertical ground heat exchanger; $L_{\text{св}}$ — well depth; ОП — heated room; ТН — heat pump (HP); $K_{\text{тн}}$ — HP condenser; $B_{\text{тн}}$ — HP evaporator; К — compressor; Н — pump; $L_{\text{к}}$ — HP compressor drive operation; $L_{\text{н}}$ — pump drive operation.

Як було з'ясовано вище, основна проблема використання енергії сонячного випромінювання для обігріву помешкань полягає у часовій різниці протягом року між періодом максимальних добових рівнів сонячної інсоляції (влітку, в неопалювальний період, за відсутності потреб в обігріві помешкань) та періодом максимального споживання теплової енергії для обігріву помешкань (взимку, в опалювальний період, мінімальна інтенсивність сонячного випромінювання протягом короткого світового періоду доби). Концептуальною ідеєю вирішення цієї проблеми є сезонне перенесення надлишкової енергії сонячного випромінювання з неопалювального періоду року в опалювальний період з використанням теплового акумулятора. Авторами статті досліджується технологічне рішення цієї проблеми з використанням природного теплового акумулятора — верхнього шару ґрунту та вертикальних теплообмінників, які працюють в реверсному режимі: влітку нагрівають ґрунт теплою від сонячних колекторів, а взимку відбирають від ґрунту низькопотенційну теплоту з використанням теплового насоса. Таким чином, робота системи опалення поділяється на два періоди: накопичення теплоти в акумуляторі влітку та використання цієї теплоти взимку в системі опалення. Керування процесом акумуляції та використання теплоти відбувається за допомогою регулюючих вентилів [22].

У Національному плані дій з відновлюваної енергетики до 2030 р. [7] наголошується, що при визначенні «кількості можливих обсягів споживання низькотемпературних геотермальних ресурсів в геокліматичних умовах різних регіонів України необхідно врахувати, що інтенсивна їх експлуатація може призвести до зниження температури ґрунтового масиву та їх швидкого виснаження. Необхідно підтримувати такий рівень використання геотермальної енергії, який дозволив би експлуатувати джерело енергетичних ресурсів без шкоди для навколишнього природного середовища. Для кожного регіону України існує певна максимальна інтенсивність видобування геотермальної енергії, яку можна підтримувати тривалий час».

У літературних джерелах бракує достатньої інформації щодо визначення загальних параметрів елементів такої системи, сонячних колекторів та ґрунтового теплообмінника для акумулятора теплоти. Тому виникає задача визначення загальної площі сонячних колекторів, які будуть забезпечувати достатнє накопичення сонячної енергії

у літній період в ґрунті, та загальної глибини свердловин для вертикальних ґрунтових теплообмінників в умовах вилучення акумульованої теплоти для ТНС опалення.

Мета, завдання та об'єкт дослідження

Метою статті є розробка методологічних підходів до визначення загальних параметрів сонячних колекторів та ґрунтового акумулятора ТНС опалення шляхом виконання аналітичного дослідження на основі балансових рівнянь складових частин (сонячного колектора та вертикального ґрунтового теплообмінника) принципової схеми ТНС опалення для визначення необхідної площі сонячних колекторів та загальної глибини свердловин, які забезпечують функціонування системи опалення протягом усього опалювального сезону з урахуванням впливу середньомісячних значень величин: температурного коефіцієнта, середнього теплового потоку падаючої радіації, середньої тривалості інсоляції в неопалювальний період, питомого теплового потоку від ґрунту, середньої мінімальної питомої затрати зовнішньої енергії, а також постановка нових задач для майбутніх досліджень.

Об'єктом дослідження є ТНС опалення будівлі у складі теплового насоса, сонячних колекторів та теплообмінників, які розташовані у вертикальних свердловинах верхніх шарів ґрунту.

Результати дослідження

Для визначення загальної площі плоских СК можна використати рівняння теплового балансу ґрунтового акумулятора:

$$Q_{\tau^3} = Q_{\tau^p}, \quad (3)$$

де Q_{τ^3} , Q_{τ^p} — кількість теплоти в процесі зарядки (в літній період) та в процесі розрядки (в зимовий період) відповідно.

Кількість теплоти в процесі зарядки ґрунтового теплового акумулятора можна визначити за формулою, кВт:

$$Q_{\tau^3} = (q_{\text{над}} \cdot \eta_{\text{СК}})_{\text{сер}} \cdot 3600 \cdot n_{\text{сер}} \cdot 180 \cdot F_{\text{СК}}, \quad (4)$$

де $(q_{\text{над}} \cdot \eta_{\text{СК}})_{\text{сер}}$ — середнє розрахункове значення добутку інтенсивності падаючої радіації на коефіцієнт корисної дії СК; $n_{\text{сер}}$ — середня розрахункова кількість годин сонячної інсоляції від місяця; $F_{\text{СК}}$ — загальна площа СК.

З іншого боку, необхідна кількість теплоти для забезпечення ТНС опалення протягом опалювального періоду визначається рівнянням, кВт:

$$Q_{\tau^p} = Q_0^p \cdot f(t_0)_{\text{сер}} (1 - l_{\text{сер}}^{\text{оп}}) \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 180, \quad (5)$$

де Q_0^p — теплові втрати будинку, для якого здійснюється опалення, при розрахунковій температурі атмосферного повітря; $f(t_0)_{\text{сер}}$ — середній за опалювальний період температурний коефіцієнт, $f(t_0)_{\text{сер}} = (t_{\text{пр}} - t_0^{\text{сер}}) / (t_{\text{пр}} - t_0^{\text{п}})$; $l_{\text{сер}}^{\text{оп}}$ — середні за опалювальний сезон питомі затрати зовнішньої енергії (на привід електродвигунів компресора ТН та насоса нижнього контура).

Відносна площа СК, м²/кВт, на одиницю середньої потужності на опалення за опалювальний сезон може бути визначена за рівнянням:

$$F_{\text{СК}} / [(Q_0^p \cdot f(t_0)_{\text{сер}})] = [(1 - l_{\text{сер}}^{\text{оп}}) \cdot 24] / [(q_{\text{над}} \cdot \eta_{\text{СК}})_{\text{сер}} \cdot n_{\text{сер}}]. \quad (6)$$

Таким чином, для визначення величини $F_{\text{СК}} / [(Q_0^p \cdot f(t_0)_{\text{сер}})]$, яка забезпечує компенсацію теплових втрат будівлі, необхідно знати відповідні середньомісячні значення величин: температурного коефіцієнта $f(t_0)_{\text{сер}}$, середньої мінімальної питомої затрати зовнішньої енергії $l_{\text{сер}}^{\text{оп}}$, середнього теплового потоку падаючої радіації $(q_{\text{над}} \cdot \eta_{\text{СК}})_{\text{сер}}$, середньої тривалості інсоляції в неопалювальний період $n_{\text{сер}}$.

Для визначення цих величин можуть бути використані відомі з літератури середньомісячні значення параметрів сонячної інсоляції та енергетичної ефективності ТНС опалення для заданого розташування об'єкта опалення. Відповідні значення параметрів сонячної інсоляції для регіону м. Києва наведені у табл. 1–3, а дані щодо середньомісячної енергетичної ефективності ТНС опалення з використанням акумульованої в ґрунті теплоти сонячного випромінювання наведені у роботах [18, 19].

З використанням вказаних даних визначено середні за сезон значення необхідних величин: температурний коефіцієнт $f(t_0)_{\text{сер}} = 0,481$; середній за літній сезон тепловий потік від СК $(q_{\text{над}} \cdot \eta_{\text{СК}})_{\text{сер}} = 234,22$ Вт/м²; середня за добу тривалість інсоляції в неопалювальний період $n_{\text{сер}} = 14,2$ год; середні мінімальні питомі затрати зовнішньої енергії на ТНС опалення за опалювальний сезон $l_{\text{сер}}^{\text{оп}} = 0,189$. Тоді необхідна відносна площа СК для зарядки ґрунтового теплового акумулятора, що забезпечує роботу ТНС опален-

ня протягом опалювального сезону для прийнятого регіону, $\text{м}^2/\text{кВт}$:

$$F_{\text{СК}} / [(Q_0^{\text{р}} \cdot 0,481)] = [(1 - 0,189) \cdot 24] / (0,234 \cdot 14,2) = 5,86.$$

Для визначення загальної площі СК для конкретного об'єкта попередньо треба визначити середню за опалювальний сезон потужність його системи опалення $Q_0^{\text{р}} \cdot f(t_0)_{\text{сер.м}}$. Знаючи загальну площу СК, після вибору типорозміру одного колектора можна визначити кількість колекторів для конкретного будинку.

В основу визначення загальної глибини свердловин були покладені експериментальні результати щодо умов роботи ґрунтових теплових акумуляторів теплоти сонячного випромінювання, отримані в роботах [21–23]. Загальна глибина свердловин для ВГТО може бути визначена з теплового балансу вилучення теплоти з ґрунту та передачі цієї теплоти у систему опалення:

$$Q_{\text{ВГТО1}} = Q_{\text{ВГТО2}}. \quad (7)$$

З одного боку, тепловий потік, який сприймає ВГТО від ґрунту, визначається співвідношенням:

$$Q_{\text{ВГТО1}} = q_{\text{г}} \cdot L_{\text{заг}}, \quad (8)$$

де $q_{\text{г}}$ — питомий тепловий потік, віднесений до 1 м глибини свердловини, $\text{Вт}/\text{м}$; $L_{\text{заг}}$ — загальна глибина свердловин для забезпечення теплових втрат об'єкта опалення.

З іншого боку, тепловий потік, який відводиться від ґрунту та передається в ТНС опалення:

$$Q_{\text{ВГТО2}} = Q_0^{\text{р}} \cdot f(t_0)_{\text{сер.м}} \cdot (1 - l_{\text{оп}})_{\text{сер.м}}, \quad (9)$$

де $Q_0^{\text{р}}$ — теплові втрати об'єкта опалення при

розрахунковій температурі атмосферного повітря; $f(t_0)_{\text{сер.м}}$ — температурний коефіцієнт для кожного місяця опалювального періоду, $f(t_0)_{\text{сер.м}} = (t_{\text{пр}} - t_{\text{сер.м.і}}) / (t_{\text{пр}} - t_0^{\text{р}})$; $l_{\text{оп}}$ — середньомісячні питомі затрати зовнішньої енергії (на привід електродвигунів компресора ТН та насоса нижнього контура).

З вищенаведених рівнянь можна отримати величину, яка характеризує відносну загальну глибину свердловин на 1 кВт теплових втрат об'єкта опалення при розрахунковій температурі зовнішнього атмосферного повітря, $\text{м}/\text{кВт}$:

$$L_{\text{заг}} / Q_0^{\text{р}} = [(1 - l_{\text{оп}})_{\text{сер.м}} \cdot f(t_0)_{\text{сер.м}}] / q_{\text{г.сер.м}}. \quad (10)$$

Таким чином, для отримання величини $L_{\text{заг}} / Q_0^{\text{р}}$, яка забезпечує компенсацію теплових втрат будівлі в кожному місяці опалювального періоду, необхідно знати відповідні середньомісячні значення трьох величин: $f(t_0)_{\text{сер.м}}$, $l_{\text{оп.сер.м}}$ та $q_{\text{г.сер.м}}$. У табл. 4 наведено розрахункові значення цих величин при середньомісячній температурі атмосферного повітря $t_{\text{сер.м}}$ у кожному місяці опалювального періоду. При цьому значення $l_{\text{оп.сер.м}}$ були отримані в результаті термодинамічного аналізу низькотемпературної ТНС опалення з розрахунковою температурою теплоносія в системі опалення $t_{\text{г}}^{\text{р}} = 50^\circ\text{C}$, а також за умов роботи ґрунтового теплового акумулятора в режимі розрядки за даними роботи [22]. Значення величин $q_{\text{г.сер.м}}$ були також отримані на основі даних [23] у перерахунку на теплопровідність піщаних ґрунтів середньої вологості ($\lambda = 4,24 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$) [24] за умови фіксованої у роботі [22] температури теплоносія на вході у ВГТО на рівні 10°C .

Як видно з табл. 4, необхідна загальна глибина свердловин сильно зростає під кінець опалювального сезону, що відбувається внаслідок високої температури теплоносія на вході в ґрун-

Таблиця 4. Середньомісячні показники системи опалення впродовж опалювального періоду

Table 4. Average monthly indicators of the heating system during the heating period

Місяць року	X	XI	XII	I	II	III
$t_{\text{сер.м}}, ^\circ\text{C}$	9,0	1,9	−3,0	−5,6	−4,3	0,7
$f(t_0)_{\text{сер.м}}$	0,262	0,431	0,547	0,61	0,578	0,46
$l_{\text{оп.сер.м}}$	0,148	0,18	0,2	0,21	0,2	0,19
$q_{\text{г.сер.м}}, \text{Вт}/\text{м}$	164	103	73,7	53,6	35,6	28,3
$L_{\text{заг}}/Q_0^{\text{р}}, \text{м}/\text{кВт}$	1,36	3,42	6,0	9,0	12,97	13,17

товий теплообмінник (10 °С), що призводить до зменшення питомого теплового потоку, відведеного від ґрунту. Для більш глибокого видлучення теплоти з ґрунтового теплового акумулятора температуру теплоносія на вході у ВГТО необхідно знижувати до значень, які мають місце у ТНС опалення з використанням природної теплоти ґрунту (близько 3 °С). Якщо прийняти, що температура ґрунту в акумуляторі під кінець опалювального сезону знижується до природного стану (близько 8 °С), то за формулою [24]:

$$q = (1,4 \lambda + 0,5) (W_x/W_m + 1) (t_{гр} - t_x) \quad (11)$$

(де $t_{гр}$ — температура ґрунту в природному стані; t_x — температура рідини, що охолоджує ґрунт) при заданій теплопровідності ґрунту можна визначити питомий тепловий потік q_r у ВГТО на 1 м глибини свердловини. Для зазначеної вище середньої теплопровідності піщаних ґрунтів $\lambda = 4,24$ Вт/(м·°С) величина $q_r = 59,36$ Вт/м. Згідно з табл. 4, це значення величини q_r відповідає найбільш холодному місяцю року.

Таким чином, необхідна загальна питома глибина свердловин може відповідати значенням у найбільш холодний місяць опалювального сезону (близько 9 м/кВт), якщо, починаючи з цього періоду, температуру води на вході у ВГТО зменшувати до значення, прийнятого для систем з використанням природної теплоти ґрунту. Тоді абсолютне значення загальної глибини свердловин для конкретної будівлі може бути визначене як добуток прийнятого питомого значення $L_{заг}/Q_0^p$ на теплові втрати будівлі Q_0^p при розрахунковій температурі атмосферного повітря.

Після визначення (за технічними умовами) глибини однієї свердловини визначають кількість свердловин та їх взаємне розташування згідно з відомими рекомендаціями [24].

Висновки

Наведений аналіз загальних параметрів сонячних колекторів та ґрунтового акумулятора в теплонасосній системі опалення з використанням накопичення сонячної енергії в літній період року шляхом її акумуляування в ґрунті дає можливість визначити загальну питому площу сонячних колекторів та загальну питому глибину вертикальних свердловин ґрунтового акумулятора, які забезпечують функціонування теплонасосної системи опалення з використанням акумуляова-

ної в ґрунті влітку теплоти сонячного випромінювання.

Запропоновані методологічні підходи щодо визначення питомих параметрів можуть бути використані в подальших розробках теплонасосних систем опалення з використанням сонячної енергії для конкретних житлових будинків із заданими вихідними даними.

Список літератури

1. . Енергетичний баланс України. Державна служба статистики в Україні. — <https://stat.gov.ua/uk/topics/enerhetyka>
2. Структура кінцевого споживання енергії домогосподарствами за цілями призначення : Державна служба статистики в Україні. — <https://www.ukrstat.gov.ua/>
3. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2023 р. № 373-р. — <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Textoku>
4. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 р. № 605-р. — <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-r#Text>
5. Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 29 грудня 2021 р. № 1803-р. — <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1803-2021-%D1%80#Text>
6. Про схвалення Національного плану з енергетики та клімату на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 25 червня 2024 р. № 587-р. — <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/587-2024-%D1%80>
7. Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 13 серпня 2024 р. № 761-р. — <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennia-natsionalnoho-planu-dii-z-vidnovliuvanoi-enerhetyky-na-p-a761>
8. Mysak S.Y., Shapoval S.P., Hyvliud A.M. (2024). Analysis of the share of renewable energy sources in the gross final energy consumption of european countries. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. № 1. С. 59–75. DOI: 10.33070/etars.1.2024.05.
9. Басок Б.І., Дубовський С.В., Пастушенко Е.П., Никітін Є.Є., Базєєв Є.Т. (2023). Теплові насоси як тренд низьковуглецевого розвитку енергетики. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. № 2. С. 23–44. DOI: 10.33070/etars.2.2023.02.
10. Derii V.O., Teslenko O.I., Sokolovska I.S. (2023).

Methodical approach to estimating the potential of thermal energy production by heat pump plants in case of their implementation in regional district heating systems. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. № 2. С. 44–56. DOI: 10.33070/etars.2.2023.03.

11. Матях С., Суржик Т., Резцов В., Иванчук В. (2021). Напрями та перспективи розвитку сонячної теплоенергетики. *Відновлювана енергетика*. № 3. С. 33–44. DOI: 10.36296/1819-8058.2021.3(66).33-44.

12. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. *Official Journal of the European Union*. L 328/82 of 21.12.2018. 128 p. — <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001>

13. The Future of Heat Pumps. IEA, 2022. — <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps>

14. European Commission. (2022). REPowerEU Plan. — <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0230&from=EN>

15. Tian Yuan, Mingzhi Yu, Yudong Mao, Ping Cui, Wenke Zhang, Zhaoyi Zhuang. (2024). Study on long-term operation characteristics of the medium-deep ground source heat pump system with solar heat storage. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 241, 15 March. Article 122345. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.122345.

16. Penrod E., Prasanna K. (1962). Design of a flat-plate collector for a solar earth heat pump. *Solar Energy*. Vol. 6, Iss. 1. P. 9–22. DOI: 10.1016/0038-092X(62)90093-2.

17. Zihao Qi, Yingling Cai, Yunxiang Cui. (2024).

Study on optimization of winter operation characteristics of solar-ground source heat pump in Shanghai. *Renewable Energy*, Vol. 220. Article 119517. DOI: 10.1016/j.renene.2023.119517.

18. Накорчевський А.І. (2009). Система теплопостачання теплоавтономного будинку. *Промислова теплотехніка*. № 1. С. 67–73.

19. Накорчевський А.І. (2009). Розрахунок теплосприймаючої здатності сонячних колекторів. *Промислова теплотехніка*. № 2. С. 70–75.

20. Безродний М.К., Притула Н.О. (2023). Енергоефективність теплонасосних схем опалення, вентиляції і кондиціювання. Київ : Політехніка, 2023. 528 с.

21. Беляєва Т.Г. (2013). Теплообмін у системі «У-подібний теплообмінник — ґрунт» у процесах акумулювання та вилучення теплоти. *Промислова теплотехніка*. № 1. С. 72–79.

22. Безродний М.К., Притула Н.О., Тесленко О.І., Сліжевський К.Д. (2024). Енергоефективність використання акумульованої в ґрунті сонячної енергії в теплонасосній системі опалення. *Енергетика і автоматика*. № 1. С. 77–93. DOI: 10.31548/energiya1(71).2024.077.

23. Безродний М.К., Притула Н.О., Гобова М.О. (2017). Оптимальні умови роботи теплонасосних систем опалення з використанням акумульованої теплоти ґрунту. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. № 1. С. 19–26. DOI: 10.33070/etars.1.2017.02.

24. Безродний М.К., Пуховий І.І., Кутра Д.С. Теплові насоси та їх використання. Київ : НТУУ «КПІ», 2013. 312 с.

Надійшла до редакції 08.09.2024

Bezrodny M.K.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,
ORCID: 0000-0003-0793-7317, **Prytula N.O.¹**, Candidate
of Technical Sciences, ORCID: 0000-0002-3500-5165, **Teslenko O.I.²**,
Candidate of Technical Sciences, ORCID: 0000-0002-3772-5991,
Matusevych K.B.¹, ORCID: 0009-0009-8853-6734

¹ **National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

37, Beresteyskyi Ave., 03056 Kyiv, Ukraine, e-mail: prytula.natalia@iill.kpi.ua

² **General Energy Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine**
172, Antonovycha Str., 03150 Kyiv, Ukraine, e-mail: teslenko1961@gmail.com

Methodological approaches to determining the general parameters of solar collectors and ground heat accumulator for a heat pump heating system

Abstract. In this article, the authors considered and described the principle of operation of a combined heat pump heating system of a building consisting of a heat pump, solar collectors and vertical ground heat exchangers. This heat pump system is an energy-efficient and environmentally friendly technology of using renewable energy sources from solar radiation and the ground, which will replace traditional organic fuel for heating the building. An analysis of the direct use of solar energy in heat pump heating systems as a low-potential heat source was carried out and it was found that its effective use in comparison with the natural heat of the ground is limited to the sunny period of the day. It is noted that it is necessary to take into account the difference in climatic conditions, solar insolation and thermal properties of the ground for different regions of the country, which affect the modes of operation and energy efficiency of the heat pump heating system. This heat pump heating system works in combination with solar collectors and a vertical ground heat exchanger in the reverse mode: in the summer, the energy of solar radiation is utilized by solar collectors and with the use of heat exchangers is accumulated in the ground, and in the winter (in the heating period) the accumulated heat is extracted from the ground using a heat pump. The authors conducted an analytical study of the balance energy equations and developed methodological approaches for calculating the required area of solar collectors and the total depth of wells that ensure the functioning of the heating system during the entire heating season, taking into account the influence of the average monthly values of the following factors: temperature coefficient, average heat flux of incident radiation, average the duration of insolation in the non-heating period, the specific heat flow from the ground, the average minimum specific consumption of external electricity for the operation of the electric motors of the heat pump and the circulation pump. The obtained results can be used in the further design development of heat pump heating systems using the renewable energy of the sun and ground for specific residential buildings with given initial data. *Bibl. 24, Fig. 3, Tab. 4.*

Keywords: heating, heat pump, ground accumulator, solar collector, energy efficiency.

References

1. [Energy balance of Ukraine. State Service of Statistics in Ukraine]. — <https://stat.gov.ua/uk/topics/enerhetyka> (Ukr.)
2. [The structure of final energy consumption by households by purpose. State Statistics Service in Ukraine]. — <https://www.ukrstat.gov.ua/> (Ukr.)
3. [On the approval of the Energy Strategy of Ukraine for the period up to 2050: Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated April 21, 2023 №. 373]. — <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023->

%D1%80#Textoku (Ukr.)

4. [On the approval of the Energy Strategy of Ukraine for the period until 2035 “Safety, energy efficiency, competitiveness”: Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated August 18, 2017 №. 605- p]. — <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#Text> (Ukr.)

5. [About the National Energy Efficiency Action Plan for the period up to 2030: Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated December 29, 2021 №. 1803-p]. — <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1803-2021-%D1%80#Text> (Ukr.)

6. [On the approval of the National Energy and Climate Plan for the period up to 2030: Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated June 25, 2024 №. 587-p]. — <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/587-2024-%D1%80> (Ukr.)

7. [On the approval of the National Renewable Energy Action Plan for the period up to 2030 and the plan of measures for its implementation: Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated August 13, 2024 №. 761-p]. — <https://www.kmu.gov.ua/npas/prozatverdzhennia-natsionalnoho-planu-dii-z-vidnovliuvanoi-enerhetyky-na-p-a761> (Ukr.)

8. Mysak S.Y., Shapoval S.P., Hyvliud A.M. (2024). Analysis of the share of renewable energy sources in the gross final energy consumption of european countries. [*Energy Technologies and Resource Saving*]. No. 1. pp. 59–75. DOI: 10.33070/etars.1.2024.05.

9. Basok B.I., Dubovskyi S.V., Pastushenko E.P., Nikitin Ye.Ye., Bazeev Ye.T. (2023). [Heat pumps as a trend of low-carbon energy development]. [*Energy Technologies and Resource Saving*]. No. 2. pp. 23–44. DOI: 10.33070/etars.2.2023.02. (Ukr.)

10. Derii V.O., Teslenko O.I., Sokolovska I.S. (2023). Methodical approach to estimating the potential of thermal energy production by heat pump plants in case of their implementation in regional district heating systems. [*Energy Technologies and Resource Saving*]. No. 2. pp. 44–56. DOI: 10.33070/etars.2.2023.03.

11. Matyakh S., Surzhyk T., Rieztsov V., Ivanchuk V. (2021). [Directions and prospects for the development of solar thermal energy]. *Vidnovliuvana enerhetyka*. No. 3. pp. 33–44. DOI: 10.36296/1819-8058.2021.3(66).33-44. (Ukr.)

12. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. *Official Journal of the European Union*. L 328/82 of 21.12.2018. 128 p. — [https://eur-lex.europa.eu/legal-](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001)

[content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001)

13. The Future of Heat Pumps. IEA, 2022. — <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps>

14. European Commission. (2022). REPowerEU Plan. — <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0230&from=EN>

15. Tian Yuan, Mingzhi Yu, Yudong Mao, Ping Cui, Wenke Zhang, Zhaoyi Zhuang. (2024). Study on long-term operation characteristics of the medium-deep ground source heat pump system with solar heat storage. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 241, 15 March. Article 122345. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.122345.

16. Penrod E., Prasanna K. (1962). Design of a flat-plate collector for a solar earth heat pump. *Solar Energy*. Vol. 6, Iss. 1. P. 9–22. DOI: 10.1016/0038-092X(62)90093-2.

17. Zihao Qi, Yingling Cai, Yunxiang Cui. (2024). Study on optimization of winter operation characteristics of solar-ground source heat pump in Shanghai. *Renewable Energy*, Vol. 220. Article 119517. DOI: 10.1016/j.renene.2023.119517.

18. Nakorchevsky A.I. (2009). [Heat supply system of a heat-autonomous house]. [*Industrial Heat Engineering*]. No. 1. pp. 67–73. (Ukr.)

19. Nakorchevsky A.I. (2009). [Calculation of the heat-absorbing capacity of solar collectors]. [*Industrial Heat Engineering*]. No. 2. pp. 70–75. (Ukr.)

20. Bezrodny M.K., Prytula N.O. (2023). [Energy efficiency of heat pump schemes of heating, ventilation and air conditioning]. Kyiv: Polytechnic, 2023. 528 p. (Ukr.)

21. Belyaeva T.G. (2013). [Heat exchange in the system “U-shaped heat exchanger — soil” in the processes of heat accumulation and extraction]. [*Industrial heat engineering*]. No. 1. pp. 72–79. (Ukr.)

22. Bezrodny M.K., Prytula N.O., Teslenko O.I., Slizhevskiy K.D. (2024). [Energy efficiency of using the accumulated in the soil of solar energy in the heat pump heating system]. [*Energy and Automation*]. No. 1. pp. 77–93. DOI: 10.31548/energiya1(71).2024.077. (Ukr.)

23. Bezrodny M.K., Prytula N.O., Gobova M.O. (2017). [Optimal working conditions of the ground source heat pump for heat supply]. [*Energy Technologies and Resource Saving*]. No. 1. pp. 19–26. DOI: 10.33070/etars.1.2017.02. (Ukr.)

24. Bezrodny M.K., Pukhovy I.I., Kutra D.S. [Heat pumps and their uset]. Kyiv: NTUU “KPI”, 2013. 312 p. (Ukr.)

Received September 8, 2024