

*electrical energy using the kinematic synthesis of a three-stage multiplier. 2019-  
Octob, 403–408.*

2. Hnatov, A., Ribickis, L., Hnatova, H., Arhun, S., Kunicina, N., Merkurjevs, J., Dziubenko, O., Patlins, A., Zabasta, A., & Kunicins, K. (2020). Study of the Operation of the Energy Generating Platform on the Basis of a Multiplier with Spur Gears. *2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon)*, 231–237. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCon48941.2020.9236460>

3. Patlins, A., Hnatov, A., Arhun, S., & Dzyubenko, O. (2019). Design and research of constructive features of paving slabs for power generation by pedestrians. *Transportation Research Procedia*, 40, 434–441. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.063>

## **ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕПЛОНАСОСНОЇ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯ АКУМУЛЬОВАНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ГРУНТІ**

**Безродний Михайло Костянтинович**, докт. техн. наук, професор  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
e-mail: m.bezrodny@kpi.ua, ORCID: 0000-0003-0793-7317

**Причула Наталя Олександрівна**, канд. техн. наук, доцент,  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
e-mail: prytula.natalia@iit.kpi.ua, ORCID: 0000-0002-3500-5165

**Тесленко Олександр Іванович**, канд. техн. наук,  
старший дослідник, Інституту загальної енергетики НАН України,  
e-mail: teslenko1961@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3772-5991

**Сліжевський Кирило Дмитрович**, студент,  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
e-mail: kirillslizevskij@gmail.com, ORCID: 0009-0000-5127-3971

Енергозбереження нині займає одне з найголовніших місць у національних економічних концепціях та програмах багатьох країн світу [1,2].

Використання теплових насосів (ТН) для здійснення переходу до екологічно чистих та відновлюваних джерел енергії є ефективним та перспективним методом зменшення споживання паливно-енергетичних ресурсів для опалення будівель. Енергія, яку можна отримати з ґрунту, представляє собою універсальне джерело низькопотенційної теплоти. Це пояснюється тим, що на глибині понад 5 метрів температура ґрунту залишається стабільною протягом року та відповідає середньорічній температурі атмосферного повітря, яка в Україні становить 8...12 °С.

Використання теплоти сонячного випромінювання можливе через безпосереднє вилучення з верхніх шарів ґрунту або за допомогою сонячних колекторів (СК). Ефективність використання сонячної енергії взагалі в будь-яких системах теплопостачання залежить від багатьох факторів і в першу чергу від інтенсивності сонячного випромінювання, яка в свою чергу залежить від географічних і природних умов, пори року та часу світлового дня.

Проведено аналіз середньомісячних в денний час та середньодобових теплових потоків від сонячного випромінювання в залежності від місяця року. Показано, що середньомісячні теплові потоки в денний час взимку не можуть забезпечити режим роботи системи опалення, тим більше, що середні за добу теплові потоки будуть ще нижчі, а рівень теплових потоків в найбільш холодні зимові місяці настільки низький, що ставить під сумнів їх використання в теплонасосних системах опалення. Разом з тим, отримані результати демонструють суттєву різницю в теплових потоках, які можуть бути отримані від сонячного випромінювання в літній і зимовий час для подальшого корисного використання. В зв'язку з цим, зростає зацікавленість у комбінованих системах низькотемпературного опалення, які використовують сонячну енергію та теплоту ґрунту. Одна з таких систем передбачає використання сонячної енергії шляхом її накопичення в літній час в ґрунтовому акумуляторі теплоти і подальшого використання акумульованої теплоти взимку в теплонасосній системі опалення [3-5]. Принципова схема такої системи представлена на рис. 1.

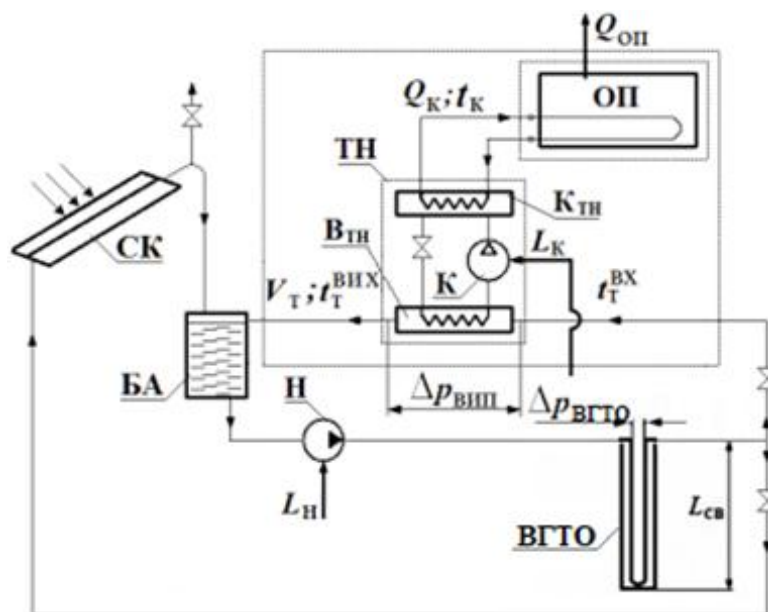


Рисунок 1 – Принципова схема теплонасосної системи низькотемпературного водяного опалення з використанням акумульованої сонячної енергії в ґрунті за допомогою вертикальних ґрунтових теплообмінників: СК – сонячний колектор, БА – бак акумулятор, ВГТО – вертикальний ґрунтовий теплообмінник,  $L_{св}$  – глибина свердловини, ОП – опалюване приміщення, ТН – тепловий насос,  $K_{ТН}$  – конденсатор ТН,  $V_{ТН}$  – випарник ТН, К – компресор, Н – насос,  $L_{к}$  – робота приводу компресора ТН,  $L_{н}$  – робота приводу насоса

На схемі показано, що літня сонячна інсоляція накопичується у ґрунті через нагрівання теплоносія у сонячному колекторі. У зимовий період ця теплота використовується для опалення будинку за допомогою теплового насосу, забезпечуючи його теплову автономію. Регулюючі органи (зображені на рис. 1) забезпечують перехід від накопичення до використання теплоти. Робота теплонасосної системи опалення будинку розділяється на два періоди: накопичення сонячної енергії у ґрунті протягом теплих місяців (квітень – вересень) та використання цієї теплоти в опалювальний сезон (жовтень – березень) за допомогою теплового насосу у поєднанні з вертикальним ґрунтовим теплообмінником.

Проведено термодинамічний аналіз наведеної схеми з метою визначення оптимальних умов роботи системи в режимі опалення для забезпечення мінімальних сумарних затрат зовнішньої енергії на роботу системи. Як показник термодинамічної ефективності обрано величину сумарних питомих затрат зовнішньої енергії на ТНС водяного опалення, яка являє собою відношення затраченої зовнішньої енергії на привід компресора ТН і насосу нижнього контуру на одиницю отриманої теплоти для задоволення потреб опалення та може бути записана у вигляді

$$l_{\text{оп}} = (L_{\text{к}} + L_{\text{н}}) / Q_{\text{к}} . \quad (1)$$

Подальший аналіз рівняння (1) з використанням відповідних виразів для визначення роботи компресора, насоса та кількості теплоти, відданої конденсатором ТН в систему опалення, дозволив після ряду математичних перетворень отримати рівняння (2) для визначення питомих затрат зовнішньої енергії на ТНС опалення

$$l_{\text{оп}} = \frac{1}{\varphi} \left[ 1 + \frac{\Delta p_{\text{вип}} (\varphi - 1) \pi d_{\text{вн}}^2 w}{4 q_{\text{г}} L_{\text{св}} \eta_{\text{н}} \eta_{\text{пр}}} + \frac{\lambda w^3 (\varphi - 1) \pi d_{\text{вн}} \rho_{\text{г}}}{4 q_{\text{г}} \eta_{\text{н}} \eta_{\text{пр}}} \right], \quad (2)$$

де  $\varphi$  – коефіцієнт перетворення ТН;  $L_{\text{св}}$  – глибина свердловини;  $d_{\text{вн}}$  – діаметр труби ґрунтового теплообмінника;  $\eta_{\text{н}}$ ,  $\eta_{\text{пр}}$  – ККД насосу і його приводу,  $q_{\text{г}}$  – питомий тепловий потік, віднесений до 1 м свердловини, в конкретному місяці опалювального сезону при різних значеннях швидкості теплоносія [5];  $w$  – швидкість теплоносія в теплообміннику.

Числовий аналіз рівняння (2) з урахуванням зміни величини  $q_{\text{г}}$  в ґрунтовому акумуляторі протягом опалювального сезону за даними роботи [5, 6] дозволив отримати оптимальні значення швидкості теплоносія в нижньому контурі ТН, а також залежність цієї величини від місяця опалювального періоду, що представлена на рис. 2.

За дотримання цих оптимальних умов роботи системи на рисунку 3 побудовано залежності мінімальних питомих затрат зовнішньої енергії  $l_{\text{оп}}$  від місяця опалювального сезону.

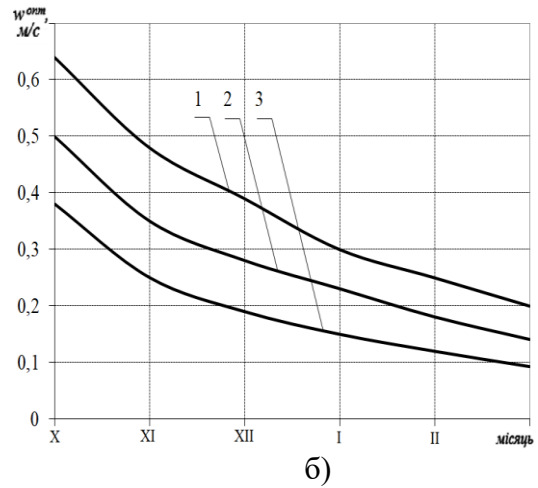
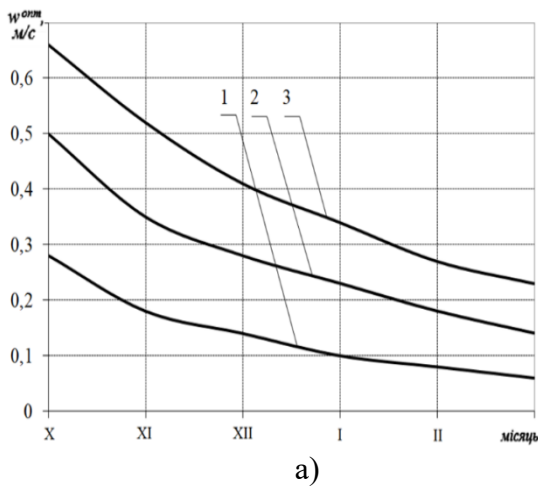


Рисунок 2 – Залежність оптимальної швидкості теплоносія від місяця опалювального періоду: а)  $d_{вн} = 0,032$  м; 1-3 –  $L_{св}=20, 50, 100$  м; б)  $L_{св}=50$  м; 1-3 –  $d_{вн}= 0,025, 0,032, 0,040$  м.

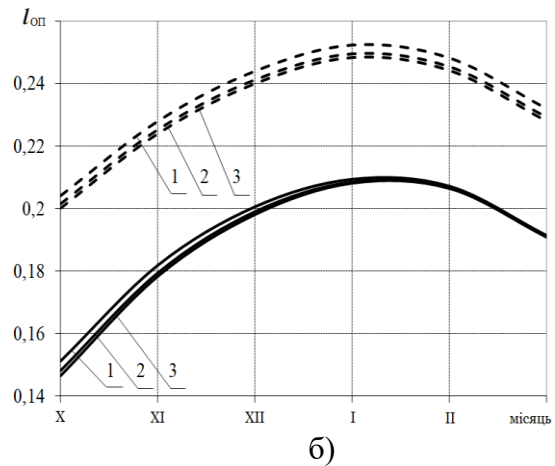
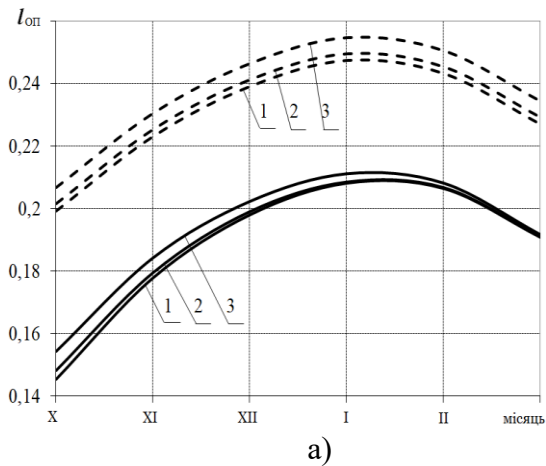


Рисунок 3 – Залежність мінімальних питомих затрат зовнішньої енергії на ТНС опалення від місяця опалювального періоду: суцільна лінія – з акумулювання сонячної енергії в літній період; штрих пунктирна лінія – природна теплота ґрунту, що використовується у вертикальному ґрунтовому теплообміннику: а)  $d_{вн} = 0,032$  м; 1-3 –  $L_{св}=20, 50, 100$  м; б)  $L_{св}=50$  м; 1-3 –  $d_{вн}= 0,025, 0,032, 0,040$  м.

З рис. 3 видно, що енергоефективність досліджуваної системи опалення майже не змінюється в оптимальних умовах роботи, незалежно від геометричних параметрів ґрунтового теплообмінника. Порівняння отриманих даних з даними для систем опалення з використанням лише природної теплоти ґрунту за допомогою ВГТО показує, що система з використанням акумульованої сонячної енергії виявляється значно ефективнішою з енергетичної точки зору (на 20-40%).

Однак ця система має інші переваги, включаючи покращення роботи теплонасосної системи протягом опалювального періоду та на довгостроковій основі, захищаючи ґрунтовий масив від теплового виснаження.

## Висновки

Аналіз сонячного випромінювання в Україні показує, що пряме використання сонячної енергії в теплонасосних системах опалення є неефективним. Однак, сонячна енергія може бути успішно використана в зимовий період шляхом акумуляції її в літній період у ґрунтових акумуляторах теплоти і подальшого використання взимку в теплових насосах. Така система є енергоефективною.

Термодинамічний аналіз показав оптимальні умови роботи, забезпечуючи мінімальні витрати енергії на роботу теплонасосної системи опалення загалом. Ці результати можуть бути основою для розробки ефективних теплонасосних систем теплопостачання з використанням сонячної енергії.

## Література

Енергетична стратегія України на період до 2035 р. Схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 № 605-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#Text>

European Commission (2022), REPowerEU Plan [Електронний ресурс] // Режим доступу – <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0230&from=EN>

Tian Yuan, Mingzhi Yu, Yudong Mao, Ping Cui, Wenke Zhang, Zhaoyi Zhuang Study on long-term operation characteristics of the medium-deep ground source heat pump system with solar heat storage // Applied Thermal Engineering Volume 241, 15 March 2024, 122345. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122345>

E. Penrod, K. Prasanna Design of a flat-plate collector for a solar earth heat pump // Solar Energy Volume 6, Issue 1, January–March 1962, Pages 9-22. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(62\)90093-2](https://doi.org/10.1016/0038-092X(62)90093-2)

Беляєва Т.Г. Теплообмін у системі “U-подібний теплообмінник – ґрунт” у процесах акумулювання та вилучення теплоти / Т. Г. Беляєва // Пром. теплотехніка. – 2013. – № 1. – С. 72–79.

Безродний М.К., Притула Н.О. Енергоефективність теплонасосних схем опалення, вентиляції і кондиціонування / М.К. Безродний, Н.О. Притула. Київ: КПІ імені Ігоря Сікорського, Вид. "Політехніка", 2023. – 528 с.