

**Міжнародна науково-практична конференція  
«ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ ТА АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ»  
(ESAES – 2024) 11-12 березня 2024 року**

**Секція: Екологізація енергетичних систем. Енергетика і навколишнє середовище. Енергозберігаючі технології.**

**Енергетична ефективність теплонасосної системи  
опалення з використання акумуляованої сонячної енергії  
в ґрунті**

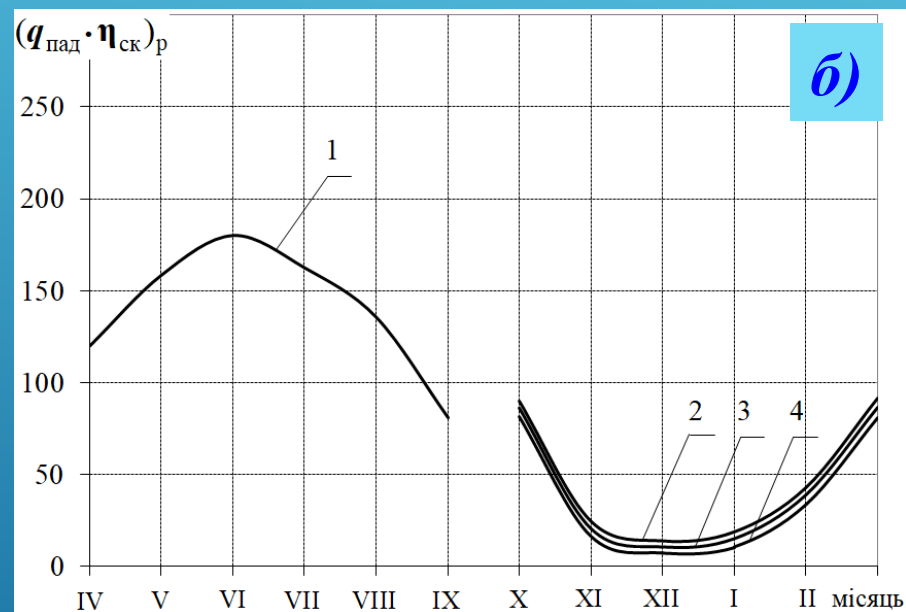
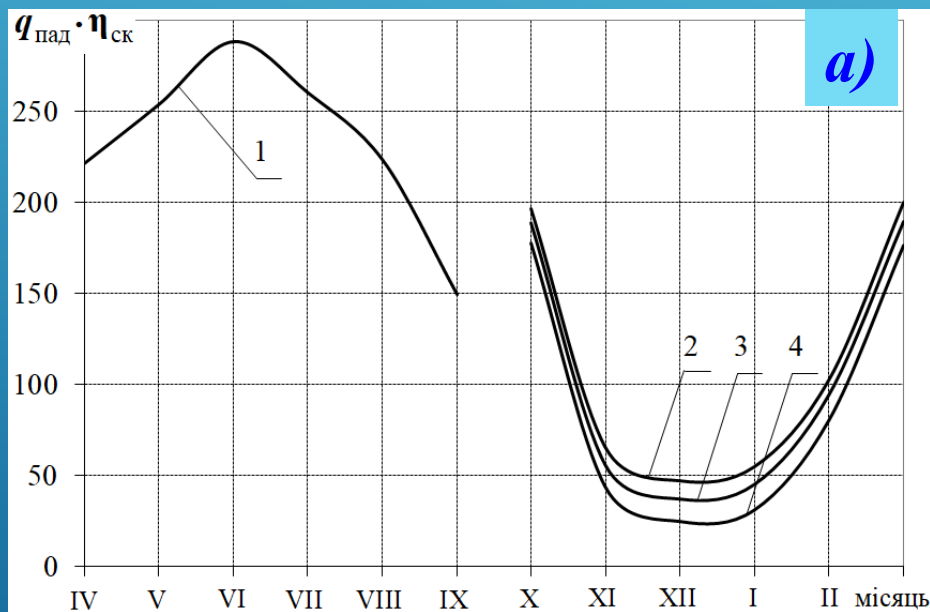
Магістер КПІ ім. Ігоря Сікорського  
Сліжевський Кирило Дмитрович

Кандидат технічних наук, доцент  
Притула Наталя Олександрівна

Кандидат технічних наук, старший дослідник  
Тесленко Олександр Іванович

Доктор технічних наук, професор  
Безродний Михайло Костянтинович

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.

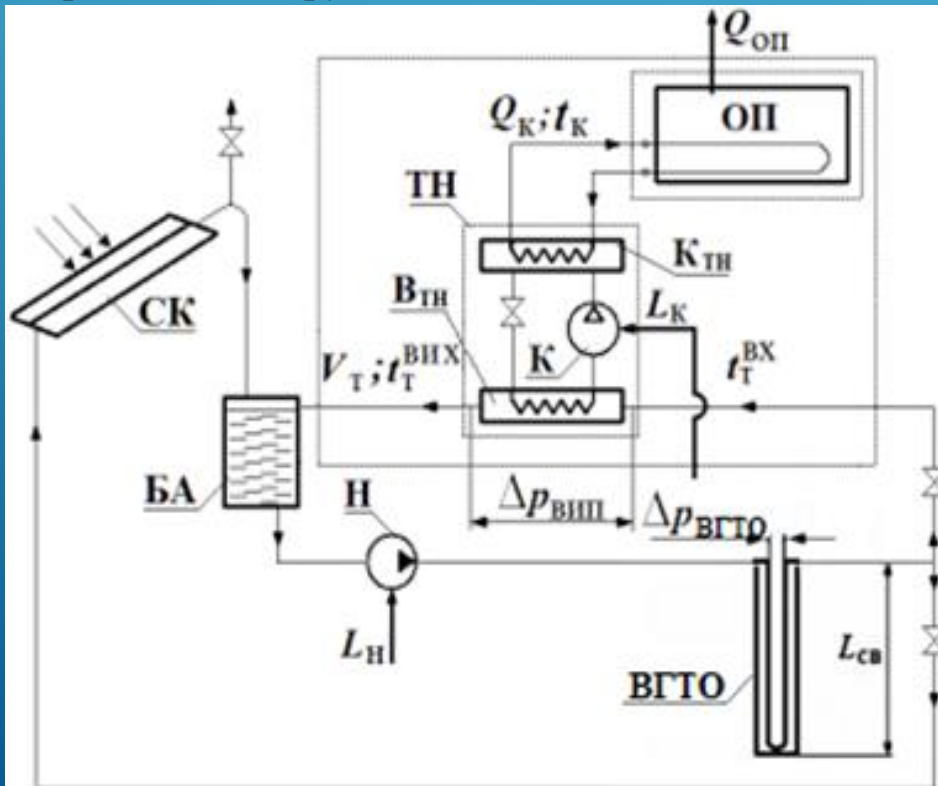


**Середньомісячний в денний час (а) та середньодобовий (б) тепловий потік від місяця:**

1 – неопалювальний період року; 2, 3, 4 – температура теплоносія на виході з сонячного колектору 10; 12; 15 °С опалювальний період.

# ПРИНЦИПОВА СХЕМА ТЕПЛОНАСОСНОЇ СИСТЕМИ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВОДЯНОГО ОПАЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ АКУМУЛЬОВАНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ҐРУНТІ ЗА ДОПОМОГОЮ ВЕРТИКАЛЬНИХ ҐРУНТОВИХ ТЕПЛОБМІННИКІВ

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 рисунку 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.



СК – сонячний колектор,  
БА – бак акумулятор,  
ВГТО – вертикальний ґрунтовий теплообмінник,  
 $L_{св}$  – глибина свердловини,  
ОП – опалюване приміщення,  
ТН – тепловий насос,  
 $K_{тн}$  – конденсатор ТН,  
 $B_{тн}$  – випарник ТН,  
К – компресор,  
Н – насос,  
 $L_K$  – робота приводу компресора ТН,  
 $L_H$  – робота приводу насоса.

# Методика визначення оптимальних умов роботи ТН

1. Питомі сумарні затрати енергії на систему опалення

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

2. Затрати енергії на компресор ТН

$$L_{\text{к}} = Q_{\text{вип}} / (\varphi - 1)$$

3. Тепловий потік у випарнику ТН

$$Q_{\text{вип}} = V_{\text{т}} \rho_{\text{т}} c_p (t_{\text{т}}^{\text{вх}} - t_{\text{т}}^{\text{вих}})$$

$$Q_{\text{вип}} = Q_{\text{відв}} = w \frac{\pi d_{\text{вн}}^2}{4} \rho_{\text{т}} c_p (t_{\text{т}}^{\text{вх}} - t_{\text{т}}^{\text{вих}})$$

4. Затрати енергії на привід насоса

$$L_{\text{н}} = \frac{V_{\text{т}} (\Delta p_{\text{вип}} + \Delta p_{\text{вгто}})}{\eta_{\text{н}} \eta_{\text{пр}}}$$

5. Тепловий потік, відведений від конденсатора ТН

$$Q_{\text{к}} = Q_{\text{вип}} + L_{\text{к}}$$

6. Дійсний коефіцієнт трансформації ТН

$$\varphi = \varphi_{\text{Т}} \eta_{\text{ТН}}$$

7. Теоретичний коефіцієнт трансформації ТН

$$\varphi_{\text{Т}} = \left[ 1 - \frac{273 + t_{\text{е}}^{\text{вух}} - \Delta t_{\text{вип}}}{273 + t_{\text{к}} + \Delta t_{\text{к}}} \right]^{-1}$$

8. Температура теплоносія в системі опалення

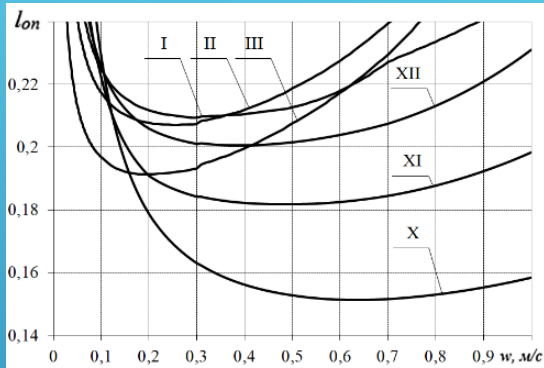
$$t_{\text{к}} = t_{\text{н}} + (t_{\text{м}}^{\text{п}} - t_{\text{н}}) \left[ (t_{\text{н}} - t_{\text{о}}) / (t_{\text{н}} - t_{\text{о}}^{\text{п}}) \right]^{\frac{1}{1+n}}$$

## Питомі затрати зовнішньої енергії на опалення

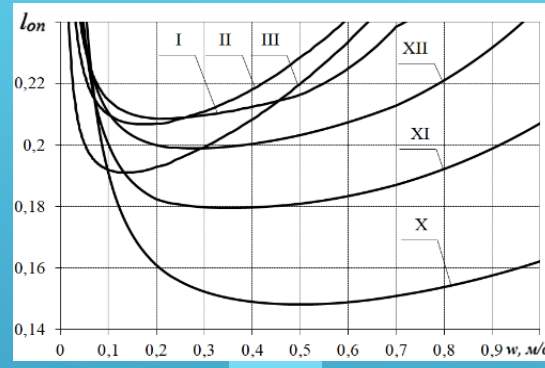
$$l_{\text{оп}} = \frac{1}{\varphi} \left[ 1 + \frac{\Delta p_{\text{вип}} (\varphi - 1) \pi d_{\text{вн}}^2 w}{4q_{\text{г}} L_{\text{св}} \eta_{\text{н}} \eta_{\text{пр}}} + \frac{\lambda w^3 (\varphi - 1) \pi d_{\text{вн}} \rho_{\text{г}}}{4q_{\text{г}} \eta_{\text{н}} \eta_{\text{пр}}} \right]$$

Питомі затрати зовнішньої енергії на опалення залежать від коефіцієнта трансформації, швидкості теплоносія в ВГТО, внутрішнього діаметра труби ВГТО, глибини свердловини, фізичних властивостей теплоносія та типу ґрунту.

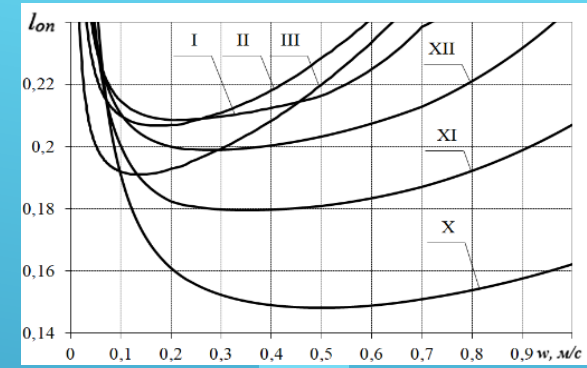
# ЗАЛЕЖНІСТЬ ПИТОМИХ СУМАРНИХ ЗАТРАТ ЗОВНІШНЬОЇ ЕНЕРГІЇ НА ТНС ОПАЛЕННЯ ВІД ШВИДКОСТІ ТЕПЛОНОСІЯ



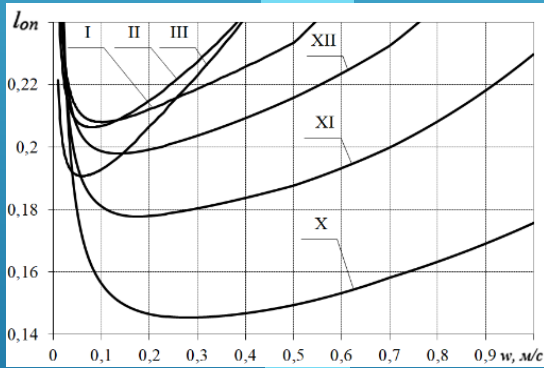
а)



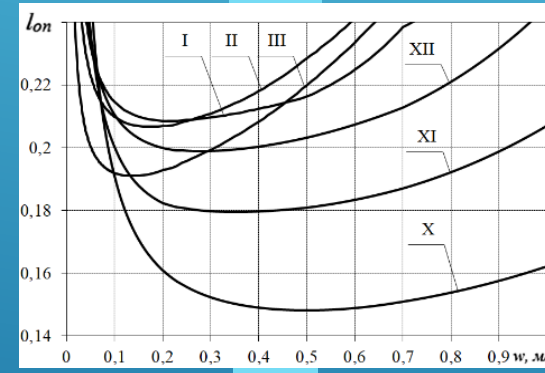
б)



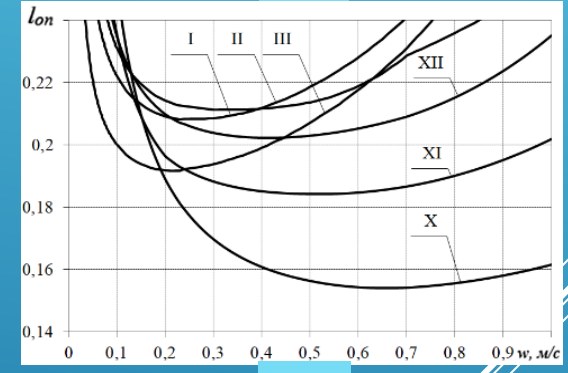
в)



г)



д)



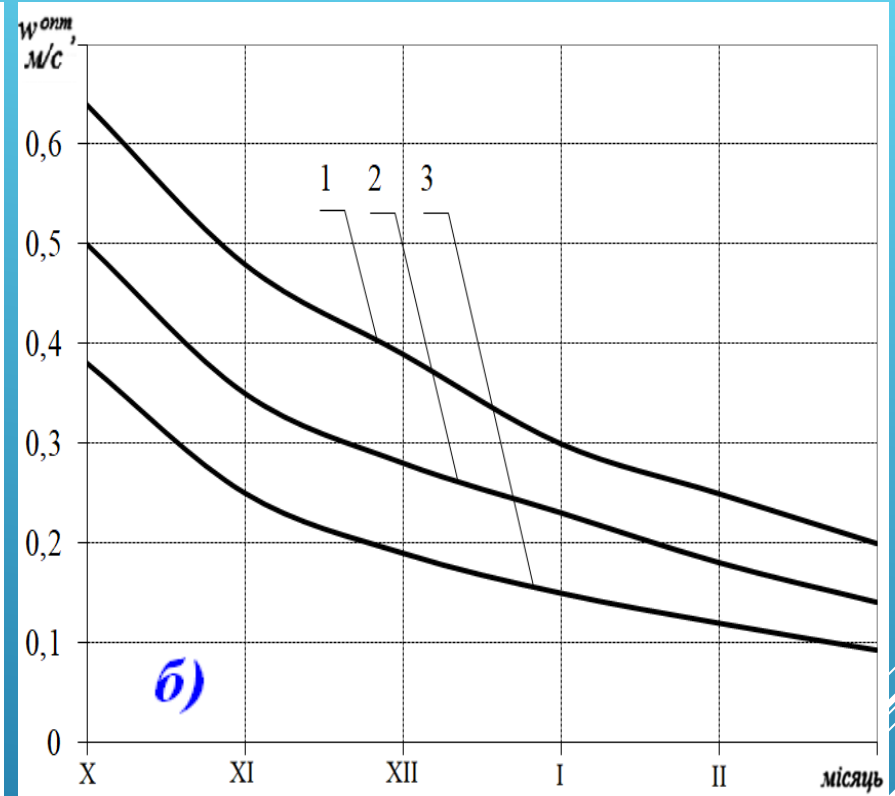
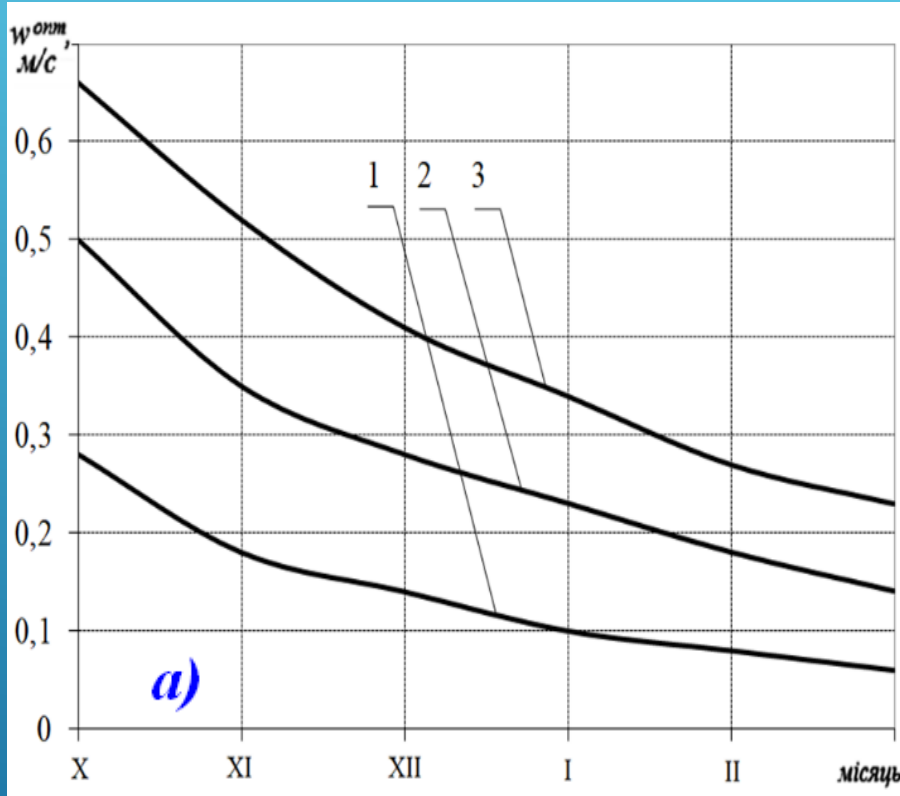
е)

а)  $d_{BH} = 0,025$  м; б)  $d_{BH} = 0,032$  м; в)  $d_{BH} = 0,040$

г)  $L_{CB} = 20$  м; д)  $L_{CB} = 50$  м; е)  $L_{CB} = 100$  м;

X–III – криві для відповідного місяця опалювального періоду

# ЗАЛЕЖНІСТЬ ОПТИМАЛЬНОЇ ШВИДКОСТІ ТЕПЛОНОСІЯ ВІД МІСЯЦЯ ОПАЛЮВАЛЬНОГО ПЕРІОДУ



а)  $d_{vh} = 0,032$  м;

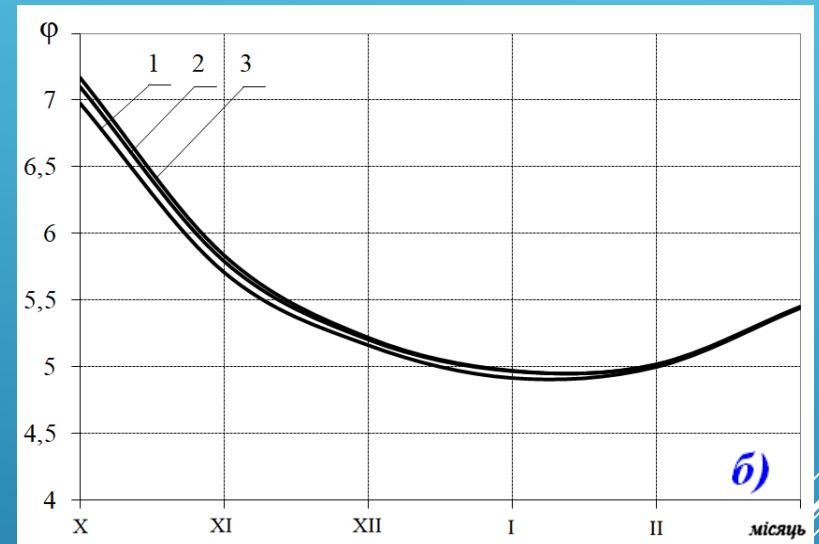
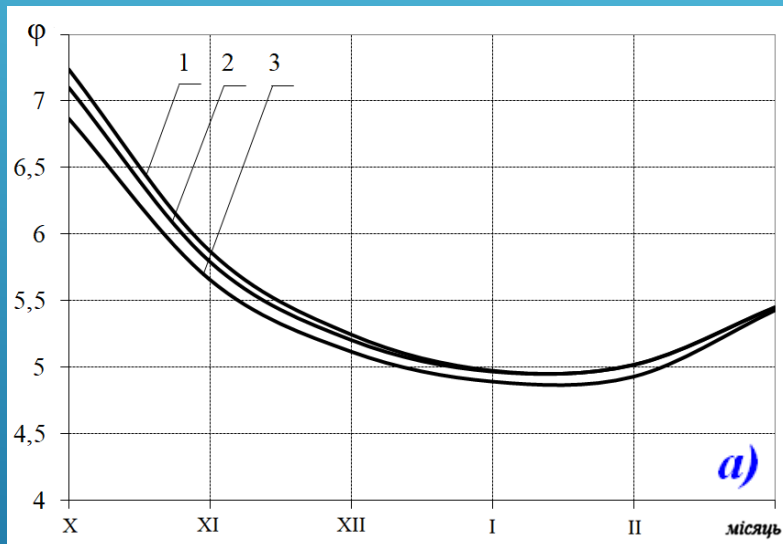
1-3 –  $L_{CB} = 20, 50, 100$  м;

б)  $L_{CB} = 50$  м; 1-3 –  $d_{vh} = 0,025, 0,032, 0,040$  м.



# ЗАЛЕЖНІСТЬ ДІЙНОГО КОЕФІЦІЄНТА ТРАНСФОРМАЦІЇ ТЕПЛОВОГО НАСОСА ВІД МІСЯЦЯ ОПАЛЮВАЛЬНОГО ПЕРІОДУ

$$\varphi = \varphi_T \eta_{TH}$$



a)  $d_{BH} = 0,032$  м;

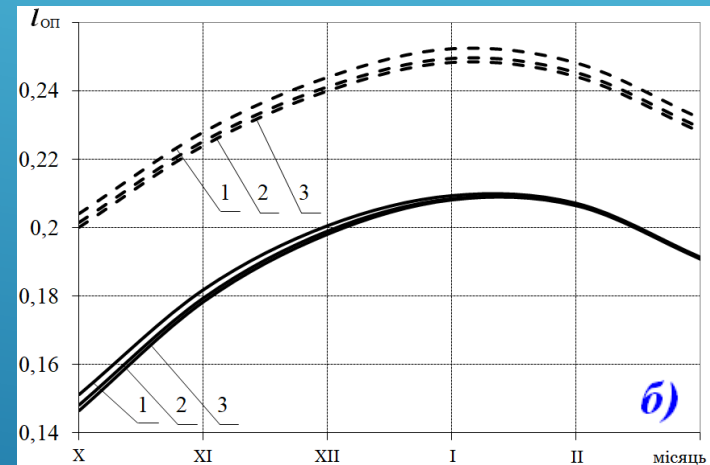
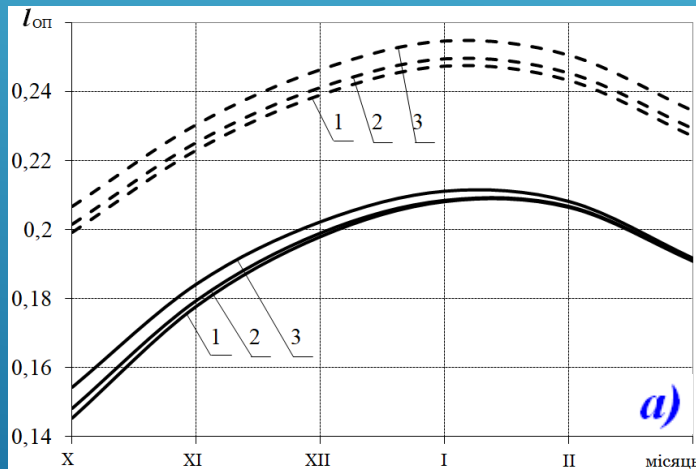
1-3 –  $L_{CB} = 20, 50, 100$  м;

б)  $L_{CB} = 50$  м; 1-3 –  $d_{BH} = 0,025, 0,032, 0,040$  м. .



# ЗАЛЕЖНІСТЬ МІНІМАЛЬНИХ ПИТОМИХ ЗАТРАТ ЗОВНІШНЬОЇ ЕНЕРГІЇ НА ТНС ОПАЛЕННЯ ВІД МІСЯЦІВ ОПАЛЮВАЛЬНОГО ПЕРІОДУ

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



суцільна лінія – з акумулювання сонячної енергії в літній період;  
штрих пунктирна лінія – природна теплота ґрунту, що використовується у  
вертикальному ґрунтовому теплообміннику:

а)  $d_{\text{вн}} = 0,032$  м; 1-3 –  $L_{\text{св}} = 20, 50, 100$  м;

б)  $L_{\text{св}} = 50$  м; 1-3 –  $d_{\text{вн}} = 0,025, 0,032, 0,040$  м.

# 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.