

## ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 662.987

## Ефективність роботи теплових насосів із відбором теплоти від ґрунту та зовнішнього повітря в житлових будинках

Ю. С. Рєпін<sup>1</sup>✉, С. І. Грищенко<sup>2</sup>, Н. В. Климчук<sup>3</sup>, М. І. Сергєєв<sup>4</sup>, О. А. Ткачов<sup>5</sup><sup>1-5</sup>Національний університет «Одеська політехніка», просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна✉ e-mail: <sup>1</sup>iuriiripin@stud.op.edu.uaORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0009-0001-1314-8480>; <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-0686-1149>; <sup>3</sup><https://orcid.org/0009-0009-5996-1790>; <sup>4</sup><https://orcid.org/0000-0002-3679-3888>; <sup>5</sup><https://orcid.org/0009-0006-6519-1209>

*В роботі проведено аналіз існуючих теплонасосних систем із відбором теплоти від різних джерел, а саме від зовнішнього повітря та ґрунту. Визначені фактори, що впливають на вибір типів теплових насосів в різних комбінованих системах теплопостачання. Охарактеризовані проблеми застосування означених теплових насосів у складі систем теплопостачання для житлових будівель. В роботі представлена математична модель роботи теплового насосу із відбором теплоти від зовнішнього повітря та ґрунту. Для обраних об'єктів дослідження представлені основні технічні характеристики будівель, режими споживання та характеристики різних типів теплових насосів, що працюють у системах теплопостачання вказаних будівель. Протягом року було проведено спостереження за роботою систем теплопостачання із використанням теплових насосів (із відбором теплоти від зовнішнього повітря та ґрунту) для різних видів теплового навантаження (система опалення та система гарячого водопостачання). За отриманими даними побудовано графіки споживання теплоти для потреб опалення та гарячого водопостачання. На основі отриманих даних було розраховано значення коефіцієнту трансформації теплоти та побудовано графіки зміни вказаного коефіцієнту протягом року окремо для теплових насосів із різними джерелами теплоти та за різними видами теплового навантаження. На основі побудованих графіків проведено аналіз ефективності роботи різних типів теплових насосів в залежності від кліматичних чинників та режимів роботи споживання теплоти для вказаних будівель. Отримані результати дозволили оцінити ефективність роботи теплових насосів із відбором теплоти від зовнішнього повітря та теплоти ґрунту протягом року для систем опалення та гарячого водопостачання, що в подальшому буде сприяти розробці комплексних рекомендацій впровадження теплових насосів в системи теплопостачання житлових будівель.*

**Ключові слова:** Теплові насоси; Відновлювальні джерела енергії; Системи теплопостачання.

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v60i2.2951>

© The Author(s) 2024. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## 1. Вступ

В Україні теплові насоси останнім часом набули широкого поширення в системах теплопостачання житлових будинках. При цьому зазвичай використовується комбінована схема теплопостачання, яка передбачає використання резервного

джерела теплоти. В якості резервного джерела теплоти зазвичай використовуються котли різного типу. Доцільність використання газового котла, електричного котлу чи твердопаливного котла у комбінації із тепловим насосом вимагає особливого підходу до техніко-економічного обґрунтування, бо необхідно враховувати такі фактори:

– вплив типу ТН (повітря-повітря, вода-вода, повітря-вода, вода-повітря) на обсяг капітальних витрат. Незважаючи на те, що найменші капітальні витрати притаманні ТН «повітря-повітря», його неможливо інтегрувати в комбіновану систему альтернативного теплопостачання. Навпаки, ТН типу «вода-вода» добре інтегрується у комбіновану систему, має високу ефективність, але для нього характерні найбільші капітальні витрати;

– жорстку залежність потужності ТН від температури довкілля, а саме, зменшення температури навколишнього середовища вкрай негативно впливає на теплопродуктивність ТН;

– суттєвий вплив зменшення температури навколишнього середовища на зростання температури теплоносія в системі опалення, а саме, при низьких температурах зовнішнього повітря, неможливо забезпечити необхідну температуру робочого тіла у контурі конденсатора ТН і відповідно необхідну температуру теплоносія у системі опалення;

Однак все частіше в індивідуальних будинках встановлюють теплові насоси без резервного джерела теплоти. Також слід зазначити, що провідні фірми-виробники передбачають практично в усіх сучасних системах кондиціонування функцію теплового насосу. Вказане дозволяє комбіновано використовувати як традиційні джерела теплоти так і відновлювальні.

Одна із ознак класифікації теплових насосів є джерело теплоти. Найбільш поширеним джерелом теплоти для роботи теплового насосу як в Україні так і за кордоном є зовнішнє повітря, трохи менш поширеним джерелом – ґрунт, також відзначаються водоймища, ґрунтові води, техногенні джерела, тощо.

Для житлових будинків найбільш поширеним джерелом теплоти є зовнішнє повітря і ґрунт.

Використання теплоти зовнішнього повітря потребує встановлення зовнішнього блоку теплового насосу біля будівлі, що веде до збільшення шуму на території ділянки та збільшення розрахункової потужності теплового насосу внаслідок впливу температури зовнішнього повітря на коефіцієнт трансформації.

В свою чергу використання теплоти ґрунту як джерела низькопотенційної теплоти, дозволяє стабілізувати величину коефіцієнта трансформації теплового насосу, однак є певні перешкоди для широкого застосування таких систем: відомо, що тепло з ґрунту можна відбирати за допомогою горизонтальних чи вертикальних труб.

Використання горизонтальних – веде до перебільшеної площі землі для їх розташування. Використання же вертикальних колекторів, крім того, що потребує узгодження з державними службами, є більш складним у обслуговуванні системи і більш коштовним, відповідно.

## **2. Огляд наукових праць, присвячених роботі теплових насосів із відбором теплоти від різних джерел енергії.**

Проблемі вибору джерела теплоти для теплових насосів та аналізу ефективності застосування різних їх типів в системах теплопостачання житлових будинків присвячено багато дослідницьких робіт [1-5], але в наявні є певні протиріччя пов'язані із умовами застосування та експлуатації будинків. Багату роль відіграють кліматичні умови в яких відбувається експлуатація будівель.

Ґрунт завдяки властивостям накопичувати тепло є природним акумулятором енергії. Про природні якості ґрунту, як джерела відновлювальної енергії, свідчать його фізичні властивості – теплопровідність, густина, теплоємність, що залежать від [6, 7]:

– геологічних характеристик ґрунту – його типу, структури, вологості;

– гідрологічних характеристик – рівня ґрунтових вод та інших геотермальних особливостей.

На поле температур в ґрунті впливає тепла енергія, що поступає як від земної поверхні, так і з надр землі. На характер розподілення температур по глибині ґрунту (у вертикальному напрямку від поверхневого шару) визначальною є температура навколишнього повітря, а також впливають інсоляція, процеси фільтрації та опади. Особливості розташування будівельних споруд та тип покриття ґрунту також мають локальний вплив на поле температур в ґрунті.

Внаслідок зміни кліматичних умов та теплообміну між навколишнім повітрям і ґрунтом, середньодобова температура на поверхні ґрунту залежить від пори року і коливається у відповідності до зміни температури оточуючого середовища [8]. Проте, з глибиною амплітуда коливань температури ґрунту безперервно зменшується, а на глибині приблизно 10 м залишається практично постійною і визначається середньорічною температурою атмосферного повітря у даному регіоні. Добова зміна температури повітря відчувається лише на глибині до 1 м, тобто у верхніх шарах ґрунтової по-

верхні.

Ґрунт характеризується здібністю до практично безмежного акумулювання енергії та самостійної термічної регенерації. Для відведення енергії ґрунту необхідно використовувати ґрунтові теплообмінники.

З іншого боку ґрунт є доволі інерційним і необхідний певний час для його регенерації. Тому коли температура повітря вже доволі суттєво збільшилась температура ґрунту в районі теплообмінників ще доволі довго залишається незмінною.

Температура зовнішнього повітря змінюється протягом року. Для визначення загальної потреби в енергоносіях впродовж року користуються даними кліматології [9-12].

В останні роки спостерігається суттєве змінення температури в холодну пору року, це пов'язується із загальним потеплінням на планеті.

Крім зміни температури впродовж холодної пори року також спостерігається зміна температури впродовж доби. Мінімальна температура повітря на висоті 2 м спостерігається перед сходом сонця. Впродовж доби амплітуда залежить від ряду причин: географічної широти місця, пори року, та інших причин, та може сягати 10 °С.

Температура зовнішнього повітря є одним із основних факторів впливу на теплове навантаження будівель. Вплив зміни температур на потужність систем теплопостачання залежить від конструкції будівлі та системи регулювання навантаження на системи теплопостачання.

При цьому інерційність таких теплових насосів значно менша, однак з тим і отримує вплив зовнішніх кліматичних чинників значно більше.

Вказане свідчить, що режимам роботи системи теплопостачання із використанням різних типів теплових насосів приділяється велика увага, але відомі дослідження не враховують режими експлуатації будівлі та взаємний вплив роботи систем теплопостачання на споживачів теплоти від різних типів джерел теплоти. Крім того, необхідно проведення експериментальних досліджень на базі реально функціонуючих житлових будинків із використанням різних типів теплових насосів.

### 3. Мета та задачі дослідження.

Основною метою даного дослідження роботи є визначення ефективності роботи теплових насосів на базі реальних об'єктів (житлових будинків) при використанні різних джерел теплоти.

Для вирішення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- сформулювати математичну модель роботи теплового насосу;
- провести експериментальні дослідження роботи теплових насосів від різних джерел теплоти;
- на основі отриманих експериментальних даних провести аналіз ефективності роботи теплових насосів від різних джерел теплоти.

### 4. Методика проведення досліджень та обробки експериментальних даних.

Ефективність використання різних типів відновлювальних джерел енергії для теплонасосних систем пов'язана з кліматичними умовами та режимами експлуатації житлових будинків.

Характеристикою ефективності роботи ТН є коефіцієнт перетворення енергії у тепловому насосі  $\varepsilon_{\text{ТН}} = Q_1/L$ . При цьому робота стискування в компресорі дорівнює різниці між кількістю теплоти, що відводиться на високому температурному рівні  $Q_1$  в конденсаторі ТН, та кількістю теплоти, що підводиться на низькому температурному рівні  $Q_2$  у випарнику ТН:

$$L = Q_1 - Q_2 \quad (1)$$

При незворотному циклі ТН коефіцієнт перетворення енергії [13,14]:

$$\varepsilon_{\text{ТН}} = \eta_{\text{к}} \cdot \varepsilon_{\text{к}} = \eta_{\text{к}} \cdot T_{\text{к}} / (T_{\text{к}} - T_{\text{в}}), \quad (2)$$

де  $\eta_{\text{к}}$  – ККД еквівалентного циклу Карно;  $\varepsilon_{\text{к}}$  – коефіцієнт перетворення енергії еквівалентного циклу Карно;  $T_{\text{к}}$  – температура в конденсаторі ТН, К;  $T_{\text{в}}$  – температура в випарнику ТН, К.

Для теплового розрахунку конденсатора ТН необхідно мати дані щодо середньої різниці температур в конденсаторі  $\Delta\theta_{\text{к}}$ , яка дорівнює різниці температур між  $T_{\text{в}}^{\text{ср}}$  – середньою температурою рідинного теплоносія, що поступає в конденсатор ТН з контуру теплового споживача, та температурою робочого тіла ТН в конденсаторі  $T_{\text{к}}$ :

$$\Delta\theta_{\text{к}} = T_{\text{к}} - T_{\text{в}}^{\text{ср}}, \quad (3)$$

де  $T_{\text{в}}^{\text{ср}} = (T_{\text{в0}} + T_{\text{в1}})/2$  – середня температура рідинного теплоносія контуру теплового споживача в процесі відводу теплоти від робочого тіла конденсатора ТН, тобто середня температура гарячого теплоносія верхнього температурного рівня, К.

Аналогічно, для теплового розрахунку обох випарників ТН необхідно мати дані щодо середньої різниці температур у випарниках  $\Delta\theta_B$  (відповідно, в сонячному випарнику –  $\Delta\theta_{B1}$ , в ґрунтовому –  $\Delta\theta_{B2}$ ), яка дорівнює різниці температур між  $T_f^{cp}$  – середньою температурою рідинного теплоносія, що поступає в випарник ТН, відповідно, з СК або з іншого (наприклад, ґрунтового контуру), та температурою робочого тіла ТН в випарнику  $T_B$ :

$$\Delta\theta_B = T_f^{cp} - T_B, \quad (4)$$

де  $T_f^{cp} = (T_{f0} + T_{f1})/2$  – середня температура рідинного теплоносія в процесі підводу теплоти від СК до робочого тіла випарника ТН, тобто середня температура «холодного» теплоносія нижнього температурного рівня, К.

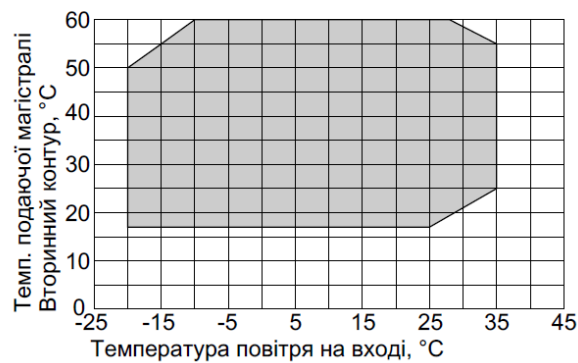
Якщо показник ефективності роботи ТН в загальному вигляді представити як функцію середнього перепаду температур в конденсаторі  $\Delta\theta_K$  та у

випарнику  $\Delta\theta_B$ , то з урахуванням формул (1-4) одержимо:

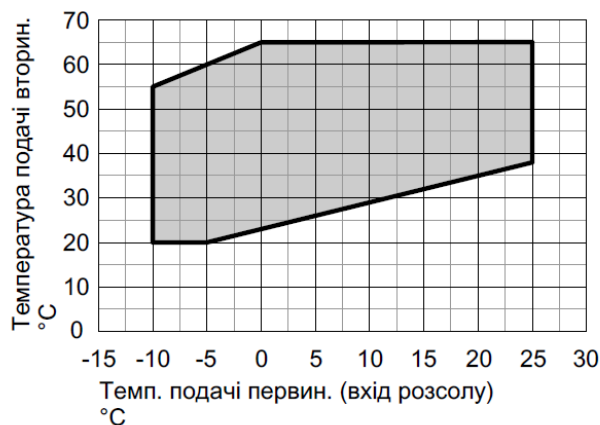
$$\varepsilon_{ТН} = \eta_K \cdot (\Delta\theta_K + T_B^{cp}) / (\Delta\theta_K + \bar{T}_B + \Delta\theta_B - T_f^{cp}). \quad (5)$$

Для вирішення поставлених задач дослідження було обрано два житлові будинки в яких в системах теплопостачання було використано різні джерела теплоти для теплових насосів.

В будинку №1, житловою площею 250 м<sup>2</sup> із зовнішнім басейном об'ємом 60 м<sup>3</sup> і кількістю мешканців 2 людини, в системі теплопостачання застосовано тепловий насос, спліт типу, із використанням в якості джерела – теплоту зовнішнього повітря (рис. 1). В будинку №2, житловою площею 170 м<sup>2</sup> і кількістю мешканців 4 людини, в системі теплопостачання застосовано тепловий насос, спліт типу із використанням в якості джерела – теплоту ґрунту (рис. 2).



**Рисунок 1** – Тепловий насос із відбором теплоти від зовнішнього повітря. Зовнішній вигляд, діаграма робочого діапазону



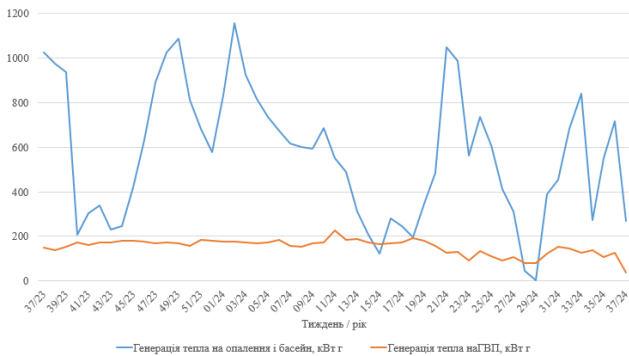
**Рисунок 2** – Тепловий насос із відбором теплоти від ґрунту. Зовнішній вигляд, діаграма робочого діапазону

## 5. Результати досліджень.

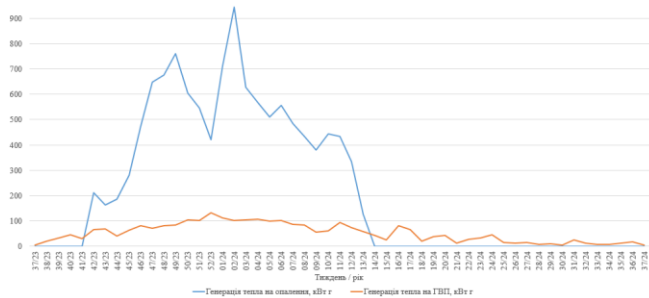
Спостереження роботи системи тепlopостачання на базі різних типів теплових насосів для двох будинків проводилось в один і той самий діапазон 2023-2024 рік. За основні показники роботи брались:

- кількість отриманої теплоти на системи опалення (басейн при наявності), кВт·год;
- кількість отриманої теплоти на системи гарячого водопостачання (ГВП), кВт·год;
- кількість затраченої електроенергії на теплові насоси, кВт·год;
- коефіцієнт трансформації теплоти (COP).

Данні записувались усередненні для кожного тижня протягом звітного періоду. Результати експерименту наведено на рис. 3, 4, 5, 6.



**Рисунки 3 –** Генерація теплоти на потреби опалення та басейну (кВт·год), а також ГВП протягом звітного періоду тепловим насосом із відбором теплоти від зовнішнього повітря.

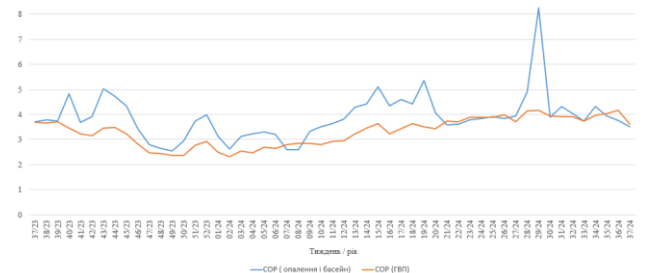


**Рисунки 4 –** Генерація теплоти на потреби опалення (кВт·год), а також ГВП протягом звітного періоду тепловим насосом із відбором теплоти від ґрунту

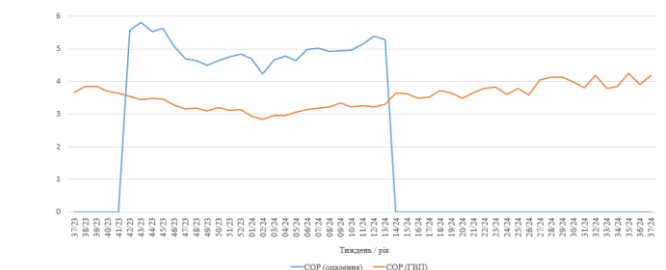
Аналіз роботи теплових насосів впродовж року із різними джерелами теплоти (рис. 3, 4) дозволяє провести аналіз ефективності роботи систем тепlopостачання. Графік роботи теплового насосу із відбором теплоти від зовнішнього повітря має яв-

но виражені піки та провали теплового навантаження на систему опалення та басейн. Вказане пояснюється кліматичними чинниками та режимами роботи систем опалення (включаючи систему «тепла підлога», яка працює також і в неопалювальний період) та режимами експлуатації басейна. Напроти теплове навантаження на систему гарячого водопостачання має більш рівномірний характер із незначним спадом у неопалювальний характер. Наведений графік пояснюється також кліматичними чинниками та режимом споживання гарячої води впродовж року.

Графік роботи теплового насосу із відбором теплоти від ґрунту, на відміну від теплового насосу із відбором теплоти від зовнішнього повітря має більш рівномірний розподіл теплового навантаження на систему опалення. Відсутність басейна в домі значно зменшує ефективність використання теплового насосу впродовж року. Теплове навантаження на систему гарячого водопостачання також має більш рівномірний характер, що пояснюється кліматичними чинниками та режимом споживання гарячої води впродовж року.



**Рисунки 5 –** COP роботи теплового насоса на потреби опалення та басейну, а також ГВП протягом звітного періоду із відбором теплоти від зовнішнього повітря.



**Рисунки 6 –** COP роботи теплового насоса на потреби опалення, а також ГВП протягом звітного періоду із відбором теплоти від ґрунту

Аналіз ефективності роботи теплових насосів (COP) із відбором теплоти від зовнішнього повітря та від ґрунту (рис. 5, 6) дозволяє оцінити тенден-

цію зміни COP впродовж року. Коефіцієнт трансформації теплоти для теплового насосу із відбором теплоти від зовнішнього повітря змінюється впродовж року і залежить від температури зовнішнього повітря та має явно виражені піки та провали. Для теплового насосу із відбором теплоти від ґрунту зміна COP впродовж року має більш рівномірний характер та більше середнє значення (в порівнянні із тепловим насосом із відбором теплоти від зовнішнього повітря) за звітний період, що пояснюється більш високою температурою та більшою інерційністю джерела теплоти. Більш низький COP для потреб гарячого водопостачання пояснюється необхідністю більш високої температури на виході із теплового насосу для приготування гарячої води.

## 6. Висновки.

Відповідно до поставлених задач дослідження було в роботі було проведено:

- формулювання математичної моделі роботи теплового насосу;
- експериментальні дослідження роботи теплових насосів із відбором теплоти від зовнішнього повітря та від ґрунту для подібних об'єктів, отримано графіки теплового для двох видів навантаження впродовж року та графічні залежності COP для двох типів теплових насосів;
- проведено аналіз ефективності роботи теплових насосів із відбором теплоти від різних видів джерел, показано, що тепловий насос із відбором теплоти від ґрунту має більш рівномірний COP впродовж року, та більше середнє значення коефіцієнту трансформації, за рахунок більшої середньої температури за опалювальний період.

## Особистий внесок авторів CRediТ

**Репін Ю.С.:** обробка даних спостереження роботи теплонасосної системи із відбором теплоти від ґрунту. **Грищенко С.І.:** аналіз літературних джерел. **Климчук Н.В.:** обробка даних спостереження роботи теплонасосної системи із відбором теплоти від зовнішнього повітря; **Сергєєв М.І.:** аналіз результатів експерименту. **Ткачов О.А.:** обрання математичної моделі роботи теплового насосу.

## Література

1. Renewable energy in Europe 2016. Recent growth

and knock-on effects // European Environment Agency. – 2016. – Report No. 4. – 73 p.

2. International Energy Agency. World Energy Outlook 2012. URL: <http://www.worldenergyoutlook.org/publications/weo-2012/> (дата звернення 18.05.24)

3. **Титар С.С., Климчук О.А., Молчанський Б.Є.** Теплопостачання та кондиціювання громадських будинків з використанням поновлювальних джерел енергії // Вісник вінницького політехнічного інституту. – 2011. – Вип. 5. – С.64-69.

4. Постанова кабінету міністрів «Про стимулювання споживачів природного газу і теплової енергії до переходу на електричне опалення та гаряче водопостачання» від 9.07.2014.

5. **Klymchuk O., Mazurenko A., Klymchuk O., Denysova A., Balasanian G., Aldin A.S., Borisenko K.** Implementation of integrated heat supply system working in intermittent mode for education institutions // Eurica: Physics and engineering. – 2018. – No. 1(14). – P. 3-12.

6. **Chwieduk D.** A series solar assisted heat pump system for family house heating system // Proceeding of 1st World Renewable Energy Congress. – Pergamon Press, 1990. – Vol. 2.

7. **Denysova A.E., Bodnar I.A., Denysova A.S.** Heat pump using subsoil waters as low temperature heat source // Problemele energeticii regionale. – 2015. – No.2 (28). – P.69-76.

8. Business Monitor International // United States Renewables Report Q3 2013. Included 10-Year Forecasts to 2021. – Part of BMI's Industry Report & Forecasts Series. – 2013. – P. 10-15.

9. **Мазуренко А.С., Климчук О.А.** Розробка пілотного проекту комбінованої системи теплопостачання навчального корпусу ОНПУ з використанням відновлювальних джерел енергії та теплового акумулювання // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2013. – № 6. – С. 65-67.

10. **Мазуренко А.С., Климчук О.А., Шраменко О.М., Сичова О.А.** Порівняльний аналіз систем децентралізованого теплопостачання житлових будівель із використанням електроенергії // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – Вип. 5(8). – С. 21-25.

11. **Chwieduk D.** Solar assisted heat pumps in comprehensive renewable energy // Comprehensive renewable energy. – 2012. – No. 3. – P. 495-528.

12. **Denysova A.E., Klymchuk O.A., Ivanova L.V., Zhaivoron O.S.** Energy Efficiency of Heat Pumps Heating Systems at Subsoil Waters for South-East

Regions of Europe // Problemele energeticii regionale. – 2020. – No. 4 (48). – P. 78-89.

13. **Klymchuk O., Ivanova L., Bodiul O.** Implementation of a hybrid intermittent heat supply system for educational institutions // Proceedings of the 4 th Annual Conference "Technology transfer: fundamental principles and innovative technical solutions". Physical Sciences and Engineering. – Tallinn, Estonia,

2020. – P. 29-32.

14 **Klymchuk O., Denysova A., Shramenko A., Borysenko K., Ivanova L.** Theoretical and experimental investigation of the efficiency of the use of heat-accumulating material for heat supply systems // EUREKA: Physics and Engineering. – 2019. – No. 3. – P. 32-40.

Отримана в редакції 19.05.2024, прийнята до друку 03.06.2024

## Efficiency of heat pumps with heat extraction from the soil and outside air in residential buildings

**Yurii Riepin<sup>1✉</sup>, Sergii Gryshchenko<sup>2</sup>, Nataliya Klymchuk<sup>3</sup>, Mykola Serheiev<sup>4</sup>, Oleksii Tkachov<sup>5</sup>**

<sup>1-5</sup>National University "Odesa Polytechnic", 1 Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine

✉ e-mail: <sup>1</sup>iuriiriepin@stud.op.edu.ua

ORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0009-0001-1314-8480>; <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-0686-1149>; <sup>3</sup><https://orcid.org/0009-0009-5996-1790>; <sup>4</sup><https://orcid.org/0000-0002-3679-3888>; <sup>5</sup><https://orcid.org/0009-0006-6519-1209>

*The paper analyzes the existing heat pump systems with the selection of heat from various sources, namely from the outside air and soil. Factors affecting the choice of types of heat pumps in various combined heat supply systems are determined. The problems of using the specified heat pumps as part of heat supply systems for residential buildings are characterized. The paper presents a mathematical model of heat pump operation with heat extraction from outside air and soil. For the selected research objects, the main technical characteristics of the buildings, consumption modes and characteristics of various types of heat pumps operating in the heat supply systems of the specified buildings are presented. During the year, the operation of heat supply systems with the use of heat pumps (with extraction of heat from the outside air and the ground) was monitored for various types of heat load (heating system and hot water supply system). According to the received data, graphs of heat consumption for heating and hot water supply were constructed. Based on the obtained data, the value of the heat transformation coefficient was calculated and graphs of the change of the specified coefficient during the year were drawn separately for heat pumps with different heat sources and for different types of heat load. On the basis of the constructed graphs, an analysis of the efficiency of the operation of various types of heat pumps was carried out, depending on climatic factors and modes of operation of heat consumption for the specified buildings. The obtained results made it possible to evaluate the effectiveness of heat pumps with the selection of heat from the outside air and soil heat during the year for heating and hot water supply systems, which will further contribute to the development of comprehensive recommendations for the introduction of heat pumps into heat supply systems of residential buildings.*

**Keywords:** Heat pumps; Renewable energy sources; Heat supply systems.

### References

1. Renewable energy in Europe 2016 (2016) Recent growth and knock-on effects. *European Environment Agency, Report No. 4, 73.*
2. International Energy Agency. World Energy Outlook 2012. Retrived 18 May 2024 from <http://www.worldenergyoutlook.org/publications/weo-2012/>
3. **Tytar, S.S., Klymchuk, O.A., Molchanskyi, B.Ie.** (2011) Heating and air conditioning of public

buildings using renewable energy sources. *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute, 5, 64-69.*

4. Resolution of the Cabinet of Ministers "On encouraging consumers of natural gas and thermal energy to switch to electric heating and hot water supply" dated 07/09/2014.
5. **Klymchuk, O., Mazurenko, A., Klymchuk, O., Denysova, A., Balasarian, G., Aldin, A.S., Borysenko, K.** (2018) Implementation of integrated heat supply system working in intermittent mode for

- education institutions. *Eurica: Physics and engineering*, 1(14), 3-12.
6. **Chwieduk, D.** (1990) A series solar assisted heat pump system for family house heating system. *Proceeding of 1st World Renewable Energy Congress*, Pergamon Press, 2.
7. **Denysova, A.E., Bodnar, I.A., Denysova, A.S.** (2015) Heat pump using subsoil waters as low temperature heat source. *Problems of the regional energy*, 2 (28), 69-76.
8. Business Monitor International (2013) *United States Renewables Report Q3 2013. Included 10-Year Forecasts to 2021. Part of BMI's Industry Report & Forecasts Series*, 10-15.
9. **Mazurenko, A.S., Klymchuk, O.A.** (2013) Development of a pilot project of a combined heat supply system of the educational building of ONPU with the use of renewable energy sources and heat storage. *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*, 6, 65-67.
10. **Mazurenko, A.S., Klymchuk, O.A., Shramenko, O.M., Sychova, O.A.** (2014) Comparative analysis of systems of decentralized heat supply of residential buildings using electricity. *Eastern European journal of enterprise technologies*, 5(8), 21-25.
11. **Chwieduk, D.** (2012) Solar assisted heat pumps in comprehensive renewable energy. *Comprehensive renewable energy*. – 2012. – No. 3. – P. 495-528.
12. **Denysova, A.E., Klymchuk, O.A., Ivanova, L.V., Zhaivoron, O.S.** (2020) Energy Efficiency of Heat Pumps Heating Systems at Subsoil Waters for South-East Regions of Europe. *Problems of the regional energy*, 4 (48), 78-89.
13. **Klymchuk, O., Ivanova, L., Bodiul, O.** (2020) Implementation of a hybrid intermittent heat supply system for educational institutions. *Proceedings of the 4 th Annual Conference "Technology transfer: fundamental principles and innovative technical solutions". Physical Sciences and Engineering. Tallinn, Estonia*, 29-32.
14. **Klymchuk, O., Denysova, A., Shramenko, A., Borysenko, K., Ivanova, L.** (2019) Theoretical and experimental investigation of the efficiency of the use of heat-accumulating material for heat supply systems. *EUREKA: Physics and Engineering*, 3, 32-40.

---

Received 19 May 2024

Approved 03 June 2024

Available in Internet 30 June 2024