

## ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 662.987

## Підвищення ефективності роботи автономних систем теплопостачання для індивідуального опалення з застосуванням теплових насосів

Г. В. Лужанська<sup>1</sup>✉, Є. С. Бабаєв<sup>2</sup>, М. І. Сергєєв<sup>3</sup>, О. О. Паламарчук<sup>4</sup>, О. Л. Фуркаленко<sup>5</sup><sup>1-5</sup>Національний університет «Одеська політехніка», просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна✉ e-mail: <sup>1</sup>luzhanska@op.edu.uaORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-3784-5926>; <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0001-7388-5979>; <sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0002-3679-3888>; <sup>4</sup><https://orcid.org/0009-0003-7886-0692>; <sup>5</sup><https://orcid.org/0009-0000-2171-4502>

У роботі розглянуто застосування теплових насосів в автономних системах теплопостачання, а саме у житлово-комунальному комплексі для індивідуальних систем водяного опалення. У досліджуваних варіантах тепловий насос є обов'язковим елементом. Для ефективної роботи системи додається котел, як додаткове джерело теплової енергії, а також з метою енергозбереження – буферна ємність. У статті виконано аналіз роботи теплонасосних схем із буферною ємністю. Розглянута можливість роботи за трьома режимами в залежності від температури зовнішнього повітря. В послідовній моновалентній низькотемпературній системі опалення максимальна потужність теплового насосу буде використовуватись незначний проміжок часу впродовж року (при температурі зовнішнього повітря – 18 °С). Паралельна моновалентна низькотемпературна система опалення дозволяє більш ефективно вирішувати потреби теплопостачання, частково зменшити розрахункову потужність теплового насосу за рахунок накопичення теплоти у буферній ємності, яка також буде відігравати роль акумулятора теплоти. Паралельна бівалентна комбінована система опалення не дозволяє працювати одночасно теплового насоса и котла в перехідний період, що зменшує ефективність роботи системи теплопостачання. Послідовна бівалентна комбінована система опалення схема не дозволяє при температурах зовнішнього повітря значно нижче температури бівалентної точки одночасно використовувати одночасно ТН і котел, що не дозволяє досягти найбільшої ефективності у бівалентній схемі системи теплопостачання. У послідовно-паралельній бівалентній комбінованій системі опалення потужність теплового насосу розраховується на температуру зовнішнього повітря для бівалентної точки, при цьому розрахункова потужність котла може бути зменшена. Проведений аналіз показав, що максимальна ефективність досягається із застосуванням послідовно-паралельної бівалентної комбінованої системи опалення.

**Ключові слова:** Тепловий насос; Система теплопостачання; Система опалення; Буферна ємність.

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v60i3.3000>

© 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

Розробка та впровадження сучасних енергозберігаючих технологій є одним із пріоритетних напрямів Енергетичної Стратегії України. Істотну роль споживанні паливно-енергетичних ресурсів

(ПЕР) займає система теплопостачання [1-3].

Основною метою розробки систем теплопостачання, що передбачають застосування теплових насосів, є вибір раціональних енергозберігаючих технічних рішень.

Теплонасосні системи проектується для кож-

ного конкретного об'єкта в залежності від теплових навантажень, кліматичних умов району будівництва та вартості енергоносіїв.

Додаткова перевага даної системи – використання відновлюваних джерел енергії [3-4]. Такий підхід передбачає разові витрати на придбання та монтаж автономної системи опалення будівлі, невеликі витрати на регулярне регламентне обслуговування та абсолютно безкоштовні енергоносії, що важливо в умовах тарифів, що стрімко зростають, на будь-які типи енергії [5]. Однак, при значних негативних температурах зовнішнього повітря тепловий насос не завжди правильно і якісно працює, або працює нижче за бівалентну точку, викликаючи додаткові витрати енергії. З метою підвищення енергоефективності встановлюють буферну ємність (бак-акумулятор) та додаткове джерело енергії, найчастіше індивідуальний котел. У цьому випадку в отриманій комбінованій системі досягається максимальна можливість заощадити теплову енергію.

## 2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми.

Теплові насоси успішно використовуються в побуті та промисловості у всьому світі. Їх застосування в системі опалення будівель у США, Японії, Німеччині та багатьох інших країнах Європи давно є звичайною справою. В Україні вони активно почали використовувати останні 10 років у системах автономного теплопостачання, а саме у житлово-комунальному комплексі, переважно для індивідуальних систем водяного опалення [6-8].

Теплові насоси, як найдорожче обладнання, зазвичай підбираються за потужністю величину базових навантажень, до бівалентної точки [9-10]. Це забезпечує максимальне використання теплових насосів та більш стабільний режим їхньої роботи. Як додаткові традиційні джерела теплової енергії, призначені для покриття пікових навантажень, доцільно застосовувати котли і ємності, що акумулюють. Дане обладнання по відношенню до теплових насосів може бути встановлене в системі водяного опалення як паралельно (зі змішування потоків теплоносія), так і послідовно (догрівання теплоносія).

Багато дослідницьких робіт присвячені спільній роботі теплового насоса, додаткового джерела теплової енергії (котла) та буферної ємності, проте там є деякі протиріччя, не чітко враховуються ре-

жими роботи теплового обладнання залежно від кліматичних умов географічного розташування об'єкта, що розглядається [9-12].

Основною проблемою при роботі комбінованої системи опалення з тепловим насосом є проблема вибору встановленої теплової потужності обладнання, при якій досягається максимальна ефективність роботи.

Крім того, при використанні повітряних теплових насосів у системах автономного теплопостачання ефективність роботи падає зі зниженням температури зовнішнього повітря.

## 3. Мета та задачі дослідження.

Мета дослідження – розглянути роботу комбінованої системи водяного опалення з тепловим насосом.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз існуючих схеми включення теплового насоса в комбіновані системи теплопостачання;
- на основі отриманих результатів аналізу розробити схему підключення теплового насосу із урахуванням особливостей режиму роботи елементів системи;
- визначити енергетичну ефективність наведених схем із застосуванням теплового насоса та різного типу споживачів теплоти.

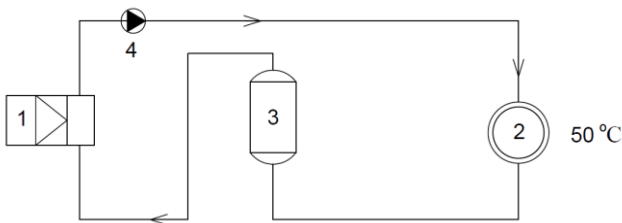
## 4. Матеріали та методи досліджень.

Системи опалення з тепловим насосом бувають моновалентні та бівалентні. Відмінність між двома видами полягає в тому, що моновалентні системи мають одне джерело тепла, яке повністю покриває річну потребу в опаленні. Бівалентні системи мають у своєму складі два джерела тепла для розширення діапазону робочих температур. У досліджуваних варіантах є обов'язковий елемент – тепловий насос. Для ефективної роботи системи додається котел, як додаткове джерело теплової енергії, а також з метою енергозбереження – буферна ємність.

Типове використання теплових насосів передбачає роботу системи опалення у низькотемпературному режимі. Проаналізуємо роботу даної системи для послідовного та паралельного моновалентного варіантів.

Джерелом тепла в послідовній моновалентній

низькотемпературній системі (рис.1) опалення є тепловий насос (ТН), який підбирається на пікове опалювальне навантаження. Для енергозбереження застосовують бак-акумулятор з можливістю теплоакумуляції з мінімальними витратами. Встановлення буферної ємності дозволяє досягти більш раціональних режимів роботи системи. Однак вказана схема потребує більш розвиненої площі нагрівальних приладів, які необхідно підбирати на робочу температуру не більше 50 °С. При цьому максимальна потужність теплового насосу буде використовуватись незначний проміжок часу впродовж року (при температурі зовнішнього повітря – 18 °С). Ще одним недоліком є відсутність гідравлічного розв'язання між джерелом та споживачами теплоти, що може ускладнити роботу ТН

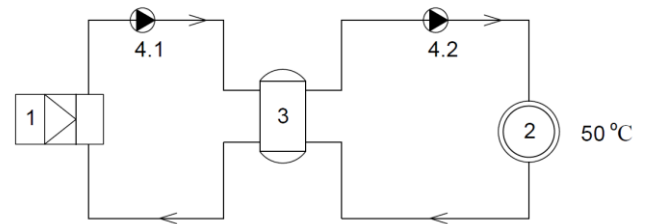


**Рисунок 1** – Послідовна моновалентна низькотемпературна система опалення з буферною ємністю: 1 – тепловий насос (ТН); 2 – система опалення; 3 – буферна ємність; 4 – циркуляційний насос.

В паралельній моновалентній низькотемпературній системі опалення (рис.2) з тепловим насосом в якості основного обладнання, вирішені питання гідравлічного розв'язання джерела теплопостачання та опалювальної системи. Вирішення вказаного питання реалізується паралельним під'єднанням ТН та опалення через буферну ємність та встановлення двох циркуляційних насосів – окремо для ТН, окремо для системи опалення. Вказане рішення також дозволяє реалізувати акумуляцію теплоти в нічний період часу за льготним тарифом. Вказана схема дозволяє більш ефективно вирішувати потреби теплопостачання, частково зменшити розрахункову потужність ТН за рахунок накопичення теплоти у буферній ємності, яка також буде відігравати роль акумулятора теплоти. Однак не вирішеними залишаються питання розвиненої площі опалювальних приладів та зменшення потужності ТН із відбором теплоти від зовнішнього повітря при низьких температурах.

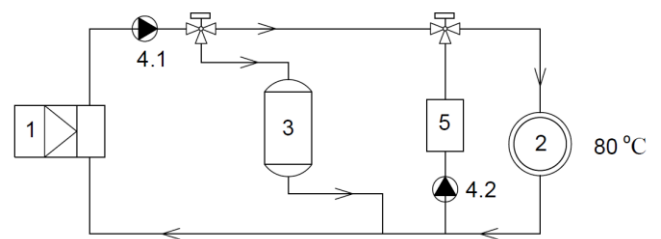
Паралельна бівалентна традиційна система опалення (рис. 3) ефективно працює від ТН доти,

доки температура зовнішнього повітря не впаде нижче за бівалентну точку.



**Рисунок 2** – Паралельна моновалентна низькотемпературна система опалення з буферною ємністю: 1 – тепловий насос; 2 – система опалення; 3 – буферна ємність; 4.1 – циркуляційний насос ТН; 4.2 – циркуляційний насос системи опалення.

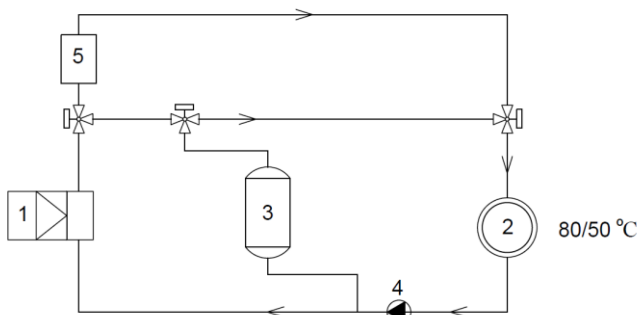
Після цього включається котел, який покриває все пікове навантаження. Переключення генераторів теплоти організовано парою триходових клапанів. Встановлення бака акумулятора дозволяє акумуляувати тепло від ТН із мінімальними витратами. Дана схема має великий плюс у порівнянні з попередньою за рахунок встановлення котлу. Вказане рішення дозволяє зменшити поверхню опалювальних приладів за рахунок підвищення температури теплоносія до 80 °С. Також суттєво зменшується розрахункова потужність ТН, в цьому випадку вона розраховується на теплові втрати, які відповідають бівалентній точці. Однак представлена схема не дозволяє працювати одночасно ТН и котла в перехідний період, що зменшує ефективність роботи системи теплопостачання.



**Рисунок 3** – Паралельна бівалентна комбінована система опалення з буферною ємністю: 1 – тепловий насос; 2 – система опалення; 3 – буферна ємність; 4.1 – циркуляційний насос ТН; 4.2 – циркуляційний насос котлу; 5 – котел.

У послідовній бівалентній системі теплопостачання (рис.4) на відміну від паралельної бівалентної схеми реалізована можливість працювати за трьома режимами: 1. При температурах зовнішнього повітря вище температури бівалентної точки

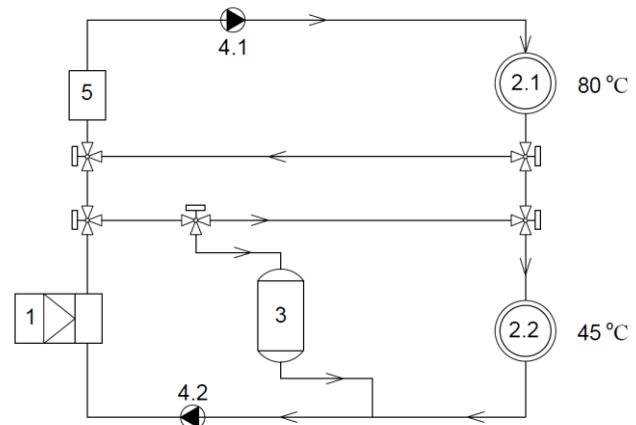
– робота ТН; 2. При температурах зовнішнього повітря у межах температури бівалентної точки – сумісна робота ТН та котла; 3. При температурах зовнішнього повітря значно нижче температури бівалентної точки – робота котла. Вказані режими дозволяють додатково розширити діапазон застосування ТН та підвищити енергоефективність системи в цілому. Однак у вказаній схемі не враховуються режими роботи різних видів опалювальних систем. На відміну від систем радіаторів, фенкойлів, радіаційних панелей, тощо, в яких температура теплоносія при розрахункових температурах зовнішнього повітря (-18...-20 °C) сягає 80 °C існують системи «тепла підлога», «тепла стіна» в яких розрахункова максимальна температура теплоносія не перевищує 50 °C. Представлена схема не дозволяє у третьому режимі одночасно використовувати одночасно ТН і котел, що не дозволяє досягти найбільшої ефективності у бівалентній схемі системи теплопостачання.



**Рисунок 4** – Послідовна бівалентна комбінована система опалення з буферною ємністю: 1 – тепловий насос; 2 – система опалення; 3 – буферна ємність; 4.1 – циркуляційний насос ТН; 4.2 – циркуляційний насос котлу; 5 – котел.

Можливість максимально ефективно використовувати ТН у системі теплопостачання реалізована у представленій послідовній роздільній бівалентній комбінованій схемі (рис. 5). Схема представляє послідовно-паралельне включення відносно теплоносія ТН та котла. В представленій системі також реалізована можливість роботи в трьох режимах. Однак на відміну від попередньої схеми при роботі в 3-му режимі ТН також працює та забезпечує теплою низькопотенційну систему опалення (2.2), при цьому котел забезпечує теплою високотемпературну систему опалення (2.1). При цьому потужність теплового насосу розраховується також на потреби системи опалення на температуру зовнішнього повітря для бівалентній

точці. В той же час розрахункова потужність котла може бути зменшена і розраховується на потреби високотемпературної системи опалення.



**Рисунок 5** – Послідовно-паралельна бівалентна комбінована система опалення з буферною ємністю: 1 – тепловий насос; 2.1 – високотемпературна система опалення; 2.2 – низькотемпературна система опалення; 3 – буферна ємність; 4.1 – циркуляційний насос ТН; 4.2 – циркуляційний насос котлу; 5 – котел.

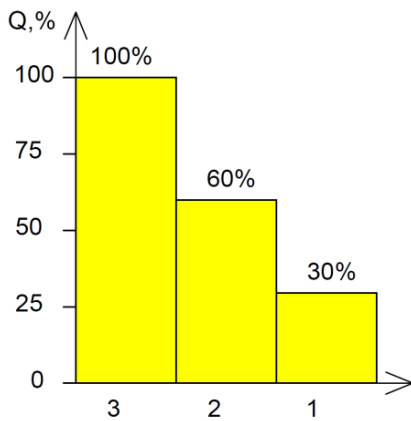
Наведена схема є найбільш гнучкою до різних режимів роботи як джерел теплоти так і споживачів теплоти.

## 5. Результати досліджень.

Розглянемо ефективність роботи вище досліджуваних схем залежно від зовнішньої температури. Як було обґрунтовано раніше, існує три режими роботи:

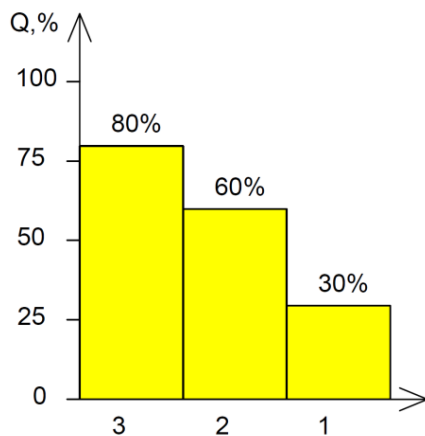
- від 0 до +8 °C – тепловий насос працює на мінімальну потужність;
- від -5 до 0 °C – початок ефективної роботи теплового насоса;
- від температури найхолоднішої п'ятиденки, наприклад, для міста Одеси становить -18 до -5 °C. Це пікове навантаження з максимальним тепловим навантаженням на систему.

При роботі послідовної моновалентної низькотемпературної системи опалення з буферною ємністю у температурному режимі від -18 до -5 °C, коли досягається максимальне навантаження на джерело тепла, тепловий насос працює на повну потужність, без ефекту енергозбереження. У наступному інтервалі температур теплове навантаження становить 60% і мінімальне навантаження – 30% – при роботі в період позитивних температур зовнішнього повітря (рис 6).



**Рисунок 6** – Розподіл теплового навантаження для різних періодів роботи в залежності від температури зовнішнього повітря для послідовної моновалентної низькотемпературної системи опалення з буферною ємністю

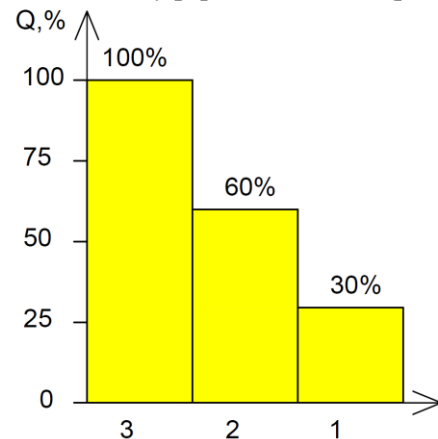
У паралельній моновалентній низькотемпературній системі опалення з буферною ємністю, яка одночасно виконує функції розподільчої гребінки, ефективність теплового насоса значно підвищується порівняно з моновалентною схемою при однакових теплових навантаженнях. У режимі першого температурного перепаду ефективність роботи збільшується на 20% і становить 80%. Інші два режими залишаються без змін (рис 7). Це пов'язано з тим, що в нічний період використовується бак-акумулятор, що дозволяє накопичувати теплову енергію, тим самим витрачаючи на прогрів значно менше тепла, зменшуючи теплове навантаження на тепловий насос.



**Рисунок 7** – Розподіл теплового навантаження для різних періодів роботи в залежності від температури зовнішнього повітря для послідовної бівалентної низькотемпературної системи опалення з буферною ємністю

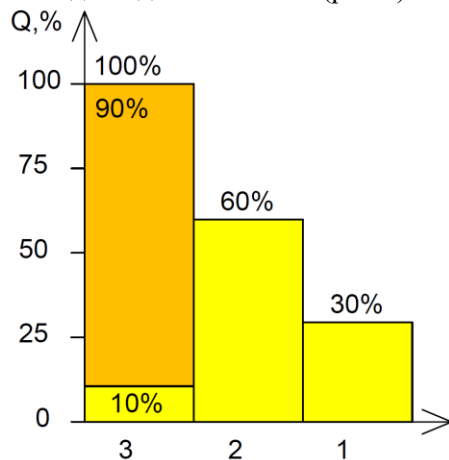
Режим роботи паралельної бівалентної комбінованої системи опалення з буферною ємністю

повністю збігається з варіантом використання послідовної моновалентної низькотемпературної системи опалення з буферною ємністю (рис 8).



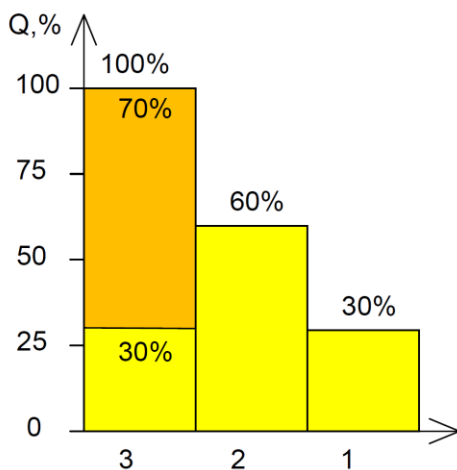
**Рисунок 8** – Розподіл теплового навантаження для різних періодів роботи в залежності від температури зовнішнього повітря для паралельної бівалентної комбінованої системи опалення з буферною ємністю

Проаналізуємо роботу послідовної бівалентної комбінованої системи опалення з буферною ємністю. Оскільки в даній схемі присутні два джерела тепла: тепловий насос і котел, в режимі великих негативних температур зовнішнього повітря коли тепловий насос не витягує розрахункове теплове навантаження, а ефективно працює тільки на 10% теплової потужності, частина теплового навантаження, що залишилася, на систему опалення покривається за рахунок роботи котла, та складає 90%. В решті температурних режимів працює тепловий насос, покриття теплового навантаження становить відповідно 60 та 30% (рис 9).



**Рисунок 9** – Розподіл теплового навантаження для різних періодів роботи залежно від температури зовнішнього повітря для послідовної бівалентної комбінованої системи опалення з буферною ємністю

Максимальна ефективність у розподілі теплового навантаження для різних періодів роботи залежно від температури зовнішнього повітря досягається у роботі послідовно-паралельної бівалентної комбінованої системи опалення з буферною ємністю. За рахунок підключення в системі водяного опалення різних типів опалювальних приладів: радіаторів та теплової підлоги, а також двох джерел тепла та буферної ємності досягається суттєва економія теплової енергії. При послідовно-паралельному підключенні та відповідно розподілі тепла, у період великих негативних температур ефективність роботи теплового насоса збільшується до 30%, потім підключається котел-70%. В інші температурні режими, що залишилися, ефективність теплового насоса залишається без змін, тобто 60% і 30% (рис 10).



**Рисунок 10** – Розподіл теплового навантаження для різних періодів роботи залежно від температури зовнішнього повітря для послідовно-паралельної бівалентної комбінованої системи опалення з буферною ємністю.

Проаналізувавши зміну розподілу теплового навантаження залежно від температури зовнішнього повітря для різних періодів роботи всіх вище перерахованих варіантів роботи теплового насоса, можна зробити висновок, що максимально ефективність досягається послідовно-паралельною бівалентною комбінованою системою опалення з буферною ємністю.

## 6. Висновки

Розроблено та проаналізовано роботу моно- та бівалентних схем автономного теплопостачання з тепловим насосом та індивідуальним опаленням. З метою підвищення енергоефективності роботи об-

ладнання застосовується буферна ємність.

Розглянуто різні теплові режими роботи перерахованих вище схем залежно від температури зовнішнього повітря. Проведений аналіз показав, що максимальна ефективність досягається із застосуванням послідовно-паралельною бівалентною комбінованою системою опалення з буферною ємністю при роботі теплового насоса та котла, при одночасній роботі системи радіаторного опалення та низькотемпературної системи опалення – тепла підлога.

## Особистий внесок авторів CRediT

**Лужанська Г.В.:** адміністрування, концептуалізація ідеї. **Бабаєв Є.С.:** методологія, аналіз даних. **Сергєєв М.І.:** математична обробка результатів, програмне забезпечення. **Паламарчук О.О.:** інформаційний пошук, участь в проведенні розрахунків, аналіз та узагальнення даних. **Фуркаленко О.Л.:** інформаційний пошук, участь в проведенні розрахунків.

## Література

1. Енергетична стратегія України на період до 2030 року, затверджена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 1071. Режим доступу URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/p0002120-13> (дата звернення 30.08.2024)
2. Закон України «Про енергетичну ефективність» // Відомості Верховної Ради України (ВВР). – 2022. – № 2. – С. 8.
3. Закон України «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки» // Відомості Верховної Ради України (ВВР). – 2001. – № 48. – С. 253.
4. Титар С.С., Климчук О.А., Молчанський Б.Є. Теплопостачання та кондиціонування громадських будинків з використанням поновлювальних джерел енергії // Науковий журнал «Вісник Вінницького політехнічного інституту». – 2011. – Вип. 5. – С. 64-69.
5. Климчук О.А. Лужанська Г.В., Баласанян Г.А. Сергєєв М.І. Аксьонова І.М. Застосування САПР технологій у дослідженні теплообмінних установок систем мікроклімату на основі альтернативних джерел енергії // Праці Одеського політехнічного університету. – 2022. – Вип. 1(65). – С. 21-29.
6. Рєпін, Ю., Грищенко, С., Климчук, Н., Сергєєв, М., Ткачов, О. Ефективність роботи теплових насосів із відбором теплоти від ґрунту та зов-

нішнього повітря в житлових будинках // Холодильна техніка та технологія. – 2024. – Т. 60(2). <https://doi.org/10.15673/ret.v60i2.2951>.

7. Ткаченко С. Й., Остапенко О. П. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання: монографія. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 176 с.

8. Арсеньєв В. М., Мелейчук С. С. Теплові насоси: основи теорії і розрахунку: навчальний посібник. – Суми: Сумський державний університет, 2018. – 364 с.

9. Klymchuk O., Denysova A., Balasanian G., Ivanova L., Bodiul O. Enhancing efficiency of using energy resources in heat supply systems of buildings

with variable operation mode // EUREKA, Physics and Engineering. – 2020. – No. (3). – P. 59-68.

10. 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.

11. 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.

Отримана в редакції 30.08.2024, прийнята до друку 16.09.2024

## Increasing the efficiency of autonomous heat supply systems for individual heating using heat pumps

Ganna Luzhanska<sup>1</sup>✉, Eugene Babaev<sup>2</sup>, Mykola Serheiev<sup>3</sup>, Oleh Palamarchuk<sup>4</sup>, Oleksandr Furkalenko<sup>5</sup>

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

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

ORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-3784-5926>; <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0001-7388-5979>; <sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0002-3679-3888>; <sup>4</sup><https://orcid.org/0009-0003-7886-0692>; <sup>5</sup><https://orcid.org/0009-0000-2171-4502>

*The paper considers the use of heat pumps in autonomous heat supply systems, namely in the housing and communal complex for individual water heating systems. In the studied options, there is a mandatory element – a heat pump. For efficient operation of the system, a boiler is added as an additional source of thermal energy, as well as, for energy saving - a buffer tank. The article analyzes the operation of heat pump circuits with a buffer tank. The possibility of operating in three modes depending on the outside air temperature is considered. In the latest monovalent low-temperature heating system, the maximum pressure of the heat pump will be limited for a short period of time (at an outside temperature of 18 °C). The parallel monovalent low-temperature combustion system makes it possible to more effectively control the heat supply demand, often changing the flow rate of the heat pump for the amount of heat accumulated in the buffer tank, as well as play the role of a heat accumulator. The parallel bivalent combined combustion system does not allow the heat pump and boiler to operate simultaneously during the transition period, which reduces the efficiency of the heat supply system. The sequentially combined combustion system does not allow the heat pump and the boiler to be fired simultaneously at ambient temperatures significantly lower than the temperature of the bivalent point, which does not allow achieving the greatest efficiency bivalent scheme of the heat supply system. In a series-parallel bivalent combination combustion system, the power of the heat pump is adjusted to the outside air temperature for the bivalent point, at which the power of the boiler can vary changed. The conducted analysis showed that maximum efficiency is achieved with the use of a series-parallel bivalent combined firing system.*

**Keywords:** Heat pump; Heat supply system; Combustion system; Buffer capacity.

### References

1. Energy Strategy of Ukraine for the period until 2030, approved by the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 07/24/2013 No. 1071. Retrived

30 August 2024 from <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13>.

2. (2022) Law of Ukraine “On Energy Efficiency”. *Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine (VRU)*, 2, 8.

3. (2001) Law of Ukraine “On Priority Areas of Deve-

lopment of Science and Technology". *Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine (VRU)*, 48, 253.

4. **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.

5. **Klymchuk, O.A., Luzhanska, G.V., Balasanyan, H.A., Serheiev, M.I., Aksyonova, I.M.** (2022) Application of CAD technologies in the study of heat exchange units of microclimate systems based on alternative energy sources. *Proceedings of the Odesa Polytechnic University*, 1(65), 21-29.

6. **Riepin, Yu., Gryshchenko, S., Klymchuk, N., Serheiev, M., Tkachov, O.** (2024) Efficiency of heat pumps with heat extraction from the soil and outside air in residential buildings. *Refrigeration Engineering and Technology*, 60(2).

7. **Tkachenko, S. Y., Ostapenko, O. P.** (2009) Vapor-compression heat pump units in heat supply systems: monograph. *Vinnytsia: VNTU*, 176.

8. **Arseniev, V. M., Meleychuk, S. S.** (2018) Heat pumps: fundamentals of theory and calculation: a textbook. *Sumy: Sumy State University*, 364.

9. **Klymchuk, O., Denysova, A., Balasanyan, G., Ivanova, L., Bodiul O.** (2020) Enhancing efficiency of using energy resources in heat supply systems of buildings with variable operation mode. *EUREKA, Physics and Engineering*, 3, 59-68.

10. **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.

11. **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.

---

Received 30 August 2024

Approved 16 September 2024

Available in Internet 30 September 2024