

**Босий М.В.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

## ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПОВІТРЯНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА НА ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТОМУ РОБОЧОМУ ТІЛІ ПРОПАНИ

У статті розглядається проблема використання теплового насоса (ТН), що працює на альтернативних джерелах енергії для опалення та гарячого водопостачання будівель. У своїй роботі ТН використовує низькопотенційну теплоту повітря. Визначено фактори, які впливають на енергетичну ефективність ТН, оцінені особливості роботи повітряного ТН для кліматичних умов України. Проаналізовано вплив тривалості температур повітря різних величин на теплопродуктивність ТН. Для підвищення ефективності роботи теплонасосної системи наведено схему утилізації низькопотенційної теплоти з використанням повітря. На підставі проведених досліджень встановлено, що перевагою повітря як теплоносія, є те, що повітряні ТН можуть працювати практично повсюди і не вимагають облаштування низькотемпературного контуру. Перспективним способом підвищення ефективності ТН при річному циклі його роботи є комбіноване використання низькопотенційної теплоти ґрунту та повітря. Теплонасосна система з двома джерелами енергії забезпечує високу теплопродуктивність ТН протягом всього року і має більш високий показник енергетичної ефективності у порівнянні з традиційними рішеннями. ТН мають значну перевагу перед іншими теплоенергетичними установками. Вони споживають енергію поновлюваних джерел, знижують витрати на електропостачання більш, ніж в половину – це повністю автоматизований пристрій. Тому використання ТН для утилізації низькопотенційних теплових потоків економічно вигідно. Аналіз ефективності систем теплопостачання показує, що нині в сучасних економічних умовах системи теплопостачання можуть розвиватися в напрямку застосування парокомпресійних повітряних ТН, при використанні зовнішнього повітря і повітря витяжної вентиляції промислових підприємств для підвищення теплотехнічних характеристик будівель. Модернізація із застосуванням даних заходів може суттєво підвищити економічні і технічні характеристики теплопостачального обладнання. Енергетична ефективність ТН «повітря-вода» за коефіцієнтом перетворення COP ТН дорівнює 3,6. Ексергетичний ККД, який характеризує досконалість перетворення енергії в ТН «повітря-вода», становить 35 %.

**Ключові слова:** тепловий насос, термодинамічний цикл, низькопотенційне джерело теплоти, системи теплопостачання, коефіцієнт трансформації теплоти, ексергетичний ККД.

**Постановка проблеми.** Нині використання традиційних джерел енергії для теплопостачання потребує відповідних затрат зі скороченням запасів усіх видів органічного палива та зростання цін на енергоносії. Натепер необхідно впроваджувати екологічно чисті технології з використанням поновлюваних альтернативних джерел енергії, які відкривають можливість до енергозбереження і зменшення викидів парникових газів в довкілля – це теплові насоси (ТН). Проблема зниження затрат на опалення приміщень та гаряче водопостачання натепер є актуальним питанням. Підвищення енергоефективності ТН, які використовують низькопотенційні джерела теплоти, в наш час також є одним із найважливіших актуальних питань для подальшого розвитку і впровадження екологічно чистих технологій і застосування відновлювальних джерел енергії в системах теплопостачання [1–7].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** ТН сприяють зменшенню використання органічного палива шляхом заміщення первинної енергії відновлювальними джерелами енергії. Це один із перспективних напрямків розвитку сучасної енергетики, який знаходиться в центрі уваги зарубіжних і українських дослідників. В країнах Європи та Америки ТН використовуються більше 30 років для теплопостачання житлових, офісних будівель, а також для різних приміщень [2; 4]. Найбільші енергетичні компанії займаються проектуванням, виготовленням і впровадженням ТН. Міжнародне Енергетичне Агентство (МЕА, латинська аббревіатура IEA), в якому асоційованими членами входять 28 енергетично розвинених країн і, метою діяльності якого є забезпечення енергетичної безпеки і пошук шляхів покращення екологічної ситуації і є головним координатором політики впровадження ТН. Досвід зарубіжних

країн, таких як Швеція, Фінляндія, Німеччина і інших доводить доцільність застосування ТН в системах теплопостачання. При проектуванні та реконструкції сучасних систем теплопостачання необхідно враховувати можливість використання технології ТН. Застосування ТН в комплексі з традиційною стемою теплопостачання для систем опалення, кондиціонування і вентиляції великих об'єктів забезпечує повну автономність зон регулювання та істотну економію паливно-енергетичних ресурсів навіть при використанні традиційних джерел енергії.

ТН – пристрій для переносу теплової енергії від джерела низькопотенційної теплової енергії (з низькою температурою) до споживача (теплоносія) з більш високою температурою. Термодинамічний цикл теплового насоса аналогічний холодильній машині, але навпаки. У тепловому насосі конденсатор являється теплообмінним апаратом, що виділяє теплоту для споживача, а випарник – теплообмінним апаратом, що утилізує низькопотенційну теплоту: вторинні енергетичні ресурси і нетрадиційні поновлювані джерела енергії. Залежно від принципу роботи ТН поділяються на парокомпресійні, абсорбційні і термоелектричні. Парокомпресійні теплові насоси завжди приводяться в дію за допомогою механічної енергії (електроенергії), у той час, як абсорбційні ТН можуть також використовувати теплоту в якості джерела енергії (за допомогою електроенергії або палива). Найбільше розповсюдження отримали парокомпресійні ТН [5–11].

Парокомпресійний ТН дозволяє максимально економити первинні високопотенційні енергоресурси в порівнянні з котельними установками, ця економія може становити 60% і вище в залежності від коефіцієнта трансформації теплоти [5].

Таким чином, проведення досліджень з підвищення енерго-ефективності використання парокомпресійного ТН в системах теплопостачання є актуальним.

**Постановка завдання.** Мета роботи полягає у дослідженні енергетичної ефективності парокомпресійного повітряного ТН, робочим тілом якого є пропан.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Залежно від джерела відбору низькопотенційної теплоти ТН поділяють на: геотермальні ґрунтові (ґрунт–вода), водяні (вода–вода) та повітряні (повітря–вода), а також ТН, які використовують вторинну теплоту.

Принципова схема парокомпресійного ТН наведена на рис. 1.



Рис. 1. Принципова схема парокомпресійного ТН

Повітряні ТН використовують як джерело низькопотенційної теплової енергії повітря. Причому джерелом теплоти може бути не тільки зовнішнє (атмосферне) повітря, а й витяжне вентиляційне повітря (загальнообмінної або місцевої) вентиляції будівель. Даний агрегат не вимагає монтажу підземного чи підводного контуру. Як правило, установки даного типу використовуються в тому випадку, коли інші варіанти утилізації теплоти не можуть бути реалізовані. Теплова енергія повітря використовується до позначки  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Якщо будуть сильні морози, і температура повітря різко знижується, використовується і ще додатковий теплогенератор, але, наприклад, ТН Heloitem мають робочий діапазон температур від  $-25$  до  $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$  і додатковий теплогенератор їм не потрібний. Існують також повітряні ТН, які відбирають низькопотенційну теплоту з повітря і використовують її для обігріву приміщень в будинку за допомогою повітряної каналної системи (система «повітря–повітря»). Особливість даного типу повітряного ТН в тому, що вони працюють або в режимі нагріву, або в режимі охолодження. Повітряне опалення використовується в офісних будівлях, торгових центрах, промислових і складських приміщеннях.

Всі, навіть найефективніші ТН нагрівають воду в системі опалення не більше  $+62\dots+65\text{ }^{\circ}\text{C}$ , причому, чим вище температура води, що нагрівається, тим менша ефективність і надійність ТН. Якщо теплоти із зовнішнього контуру все ж недостатньо для опалення в дуже сильні морози, практикується експлуатація ТН в парі з додатковим генератором теплоти (в таких випадках це використання бівалентної схеми опалення). Коли вулична температура повітря опускається нижче розрахункового рівня (температури бівалент-

ності), в роботу включається другий генератор теплоти – найчастіше невеликий електронагрівач, рідше газовий, або твердопаливний котел. Оптимальна потужність теплоносною установкою становить 60–70% від необхідної встановленої потужності, що також впливає на закупівельну вартість установки опалення ТН. В цьому випадку ТН забезпечує не менше 95 % потреби споживача в тепловій енергії за весь опалювальний період. При такій схемі середньосезонний коефіцієнт перетворення енергії для кліматичних умов України дорівнює порядку  $COP = 3$  [8; 9].

Сучасним способом підвищення ефективності ТН при річному циклі його роботи є комбіноване використання низькопотенційної теплоти ґрунту та повітря.

Наявні ресурси теплової енергії докільля багаторазово перевищують прогнозований рівень споживання всіма галузями промисловості України. На сьогоднішній день для вирішення проблем енергозбереження ТН є найбільш перспективним серед джерел нетрадиційної енергетики. Використання відновлювальних джерел енергії дає можливість обмежити використання традиційних палив, зменшити забруднення довкілля. Температурні рівні основних джерел теплоти: зовнішнє повітря  $+5...+10$  °С, витяжна вентиляція  $+15...+25$  °С. У процесі роботи ТН компресор споживає електроенергію. Співвідношення теплової енергії, що виробляється, і електричної, яка споживається, називається коефіцієнтом трансформації (або коефіцієнтом продуктивності (англ. COP – скор. від coefficient of performance) і є показником ефективності ТН. Для розрахунку COP використовується наступний вираз:

$$COP = Q/E, \quad (1)$$

де  $Q$  – теплота, отримана з системи, Дж;

$E$  – електроенергія, яка споживається, Дж;

Теплота отримана з системи розраховується за наступним виразом

$$Q = m \cdot C_v \cdot \Delta t, \quad (2)$$

$C_v = 4,19$  Дж/кг·К – питома масова теплоємність рідини в циклі опалення, Дж/кг·К;

$m = 1000$  кг – маса теплоносія, кг;

$\Delta t = 34$  °С – різниця температур теплоносія до і після віддачі теплової енергії.

Електроенергія, яка споживається компресором теплового насоса розраховується за таким виразом

$$E = U \cdot I \cdot t, \quad (3)$$

де  $U = 0,380$  напруга, В;  $I = 120$  струм, А;  $t = 24$  час, год.

З рівняння (2) і (3) розраховуємо  $Q$  і  $E$ :

$$Q = 142460 \text{ кДж} = 39,57 \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (4)$$

$$E = 10,94 \text{ кВт} \cdot \text{год}. \quad (5)$$

Коефіцієнт трансформації COP ТН розраховуємо за рівнянням (1)

$$COP = 39,57 / 10,94 = 3,6 \quad (6)$$

Тобто, при температурі повітря  $10$  °С на кожний кіловат електричної енергії ми отримуємо  $3,6$  кВт теплової енергії.

Нами було досліджено ефективність ТН «повітря–вода» при різних значеннях температури зовнішнього джерела теплоти – повітря (рис. 2).

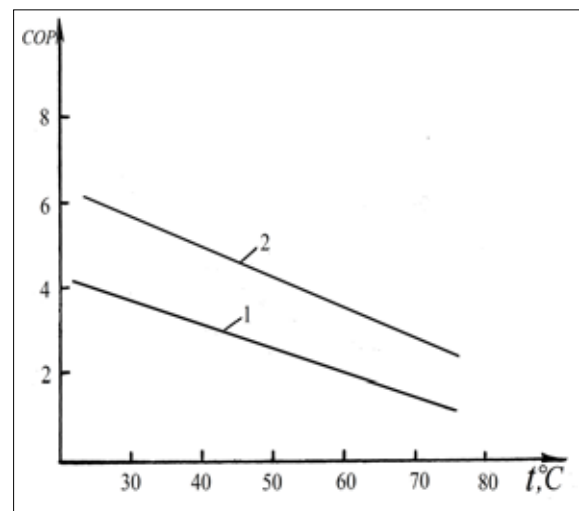


Рис. 2. Залежність коефіцієнта ефективності ТН (COP) від температури системи опалення: при температурі повітря: 1 – при  $5$  °С; 2 – при  $10$  °С

З рис. 2 видно, що коефіцієнт ефективності COP ТН «повітря–вода» залежить від зовнішньої температури джерела теплоти повітря і від характеру системи опалення. При збільшенні температури повітря з  $5$  до  $10$  °С коефіцієнт ефективності COP ТН збільшується у  $1,5$  рази. Вибір системи опалення навіть більше впливає на ефективність ТН, ніж температура повітря. При заміні традиційних систем опалення на низькотемпературні, ефективність ТН зростає. Тому, при проектуванні систем опалення з використанням ТН необхідно враховувати і цей фактор.

Аналіз енергоефективності парокомпресійного ТН «повітря–вода» проводився для робочого тіла холодоагента пропана (R290) [6]. Для R290 температура випаровування становить  $t_b = 4$  °С, а конденсації  $t_k = 7$  °С. Вибираємо низькопотенційне джерело теплоти повітря, яке на вході у випарник має температуру  $t'_{\text{нт}} = 10$  °С, а на виході

Термодинамічний розрахунок парокompресійного ТН «повітря-вода»

Параметр	Розмірність	Розрахункові значення
Температура випаровування R290, $T_v$	К	277
Ентальпія R290 після випарника, $h_1$	кДж/кг	575
Тиск R290 у випарник, $P_v$	МПа	0,53
Температура конденсації R290, $T_k$	К	343
Ентальпія R290 після конденсатора, $h_3$	кДж/кг	208
Тиск конденсації R290, $P_k$	МПа	2,7
Ентальпія R290 на вході в компресор, $h_1$	кДж/кг	575
Ентальпія R290 після компресора, $h_2$	кДж/кг	675
Ентальпія R290 перед випарником, $h_4$	кДж/кг	208
Питоме теплове навантаження випарника, $q_v$	кДж/кг	367
Питоме теплове навантаження конденсатора, (теплого насоса), $q_k = (q_{тн})$	кДж/кг	467
Робота стиснення в компресорі, $l_{ст}$	кДж/кг	100
Питома робота компресора, $l_{км}$	кДж/кг	117
Питома робота, яка витрачається на привід компресора, $l_{пр}$	кДж/кг	130
Перевірка теплового балансу	кДж/кг	467
Коефіцієнт перетворення теплоти, COP	–	3,6
Ексергетичний ККД ТН, $\eta_{ex}$	–	0,35

з нього  $t''_{нт} = 6$  °С. Температура мережевої води (теплоносія) на вході в конденсатор становить  $t'_{мв} = 34$  °С, а на виході з нього  $t''_{мв} = 58$  °С.

Розглянемо визначення показників енергоефективності парокompресійного циклу ТН «повітря-вода» для системи тепlopостачання за методиками, приведеними в [6; 10–14].

Результати проведеного термодинамічного розрахунку парокompресійного ТН «повітря-вода» наведені в табл. 1.

ТН характеризуються вищою ефективністю, ніж усі традиційні технології на ринку тепlopостачання. Для порівняння: газовий котел при споживанні 1 кВт електроенергії зможе виділити близько 0,9 кВт теплоти, тоді як ТН справляється з цим завданням, демонструючи віддачу в 3–5 кВт теплоти, цей результат полягає в тому, що обладнання не виробляє теплоту, а переносить її. Отже, показники енергоефективності роботи циклу парокompресійного ТН «повітря-вода», коефіцієнт перетворення COP ТН і ексергетичний ККД  $\eta_{ex}$  парокompресійного ТН «повітря-вода» суттєво залежать від середньотермодинамічних температур входу і виходу теплоти, а також довкілля.

### Висновки

1. Проведено термодинамічне дослідження ефективності застосування парокompресійного ТН «повітря-вода» для системи опалення приміщення при використанні повітря як джерела низькопотенційної теплової енергії.

2. Незважаючи на свою ефективність парокompресійні повітряні ТН далеко не завжди повноцінно покривають теплове навантаження будівель в дуже сильні морози, тому необхідно поєднувати їх експлуатацію з додатковим джерелом теплоти: електричним, газовим або твердопаливним котлом, які будуть вмикатися при досягненні вуличної температури певного критичного значення (точки бівалентності).

3. З'ясовано, що енергетична ефективність парокompресійного ТН «повітря-вода», робочим тілом якого є пропан оцінена коефіцієнтом перетворення COP ТН і становить 3,6.

4. Показано, що досконалість перетворення енергії в парокompресійному ТН «повітря-вода» оцінена ексергетичним ККД в залежності від середньотермодинамічних температур  $T_{cp}^B$  і  $T_{cp}^K$  і становить 35 %.

### Список літератури:

1. Малярєнко В. А., Лисак Л. В. Енергетика, довкілля, енергозбереження. Х. : Рубікон, 2004. 368 с.
2. Безродний М. К., Пуховий І. І., Кутра Д. С. Теплові насоси та їх використання : навчальний посібник. Київ : НТУУ «КПІ». 2013. 312 с.
3. Остапенко О.П. Холодильна техніка та технологія. Теплові насоси: навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2015. 123 с.

4. Арсеньєв В.М., Мелейчук С.С. Теплові насоси: основи теорії і розрахунку : навчальний посібник. Суми : СДУ, 2018. 364 с.
5. Арсеньєв В.М. Теплонасосная технология енергозбереження. Суми : Вид-во СДУ, 2009. 251 с.
6. Босий М.В., Кузик О.В. Теплові насоси для опалення та гарячого водопостачання. Findings of modern engineering research and developments : Scientific monograph. Riga, Latvia : «Baltija Publishing». 2022. P. 24–40.
7. Пісарев В.Є. Теплові насоси та холодильні установки : навчальний посібник. К. : КНУБА. 2002. 124 с.
8. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврін В.С., Дабіжа Н.О. Теплові насоси в системах теплохолодопостачання : монографія / під. ред. акад. НАН України А.А. Долінського ; НАН України, Ін-т техн. теплофізики. К. : 2008. 104 с.
9. Безродний М.К., Притула Н.О. Енергетична ефективність теплонасосних схем теплопостачання : монографія. К. : НТУУ «КПІ». 2012. 208 с.
10. Босий М.В., Кузик О.В. Ефективність циклу теплового насоса для теплопостачання // Центральноукраїнський науковий вісник. *Технічні науки*. 2020. Вип. 3(34). С. 136–142.
11. Босий М.В. Термодинамічна енергоефективність геотермального теплового насоса на ґрунтових водах. *Moderní aspekty vědy: XX. Díl mezinárodní kolektivní monografie / Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o. Česká republika: Publishing Group „, Vědecká perspektiva“*, 2022. Str. 556–568.
12. Морозюк Т. В. Теория холодильных машин и тепловых насосов. Одесса : Студия «Негоциант», 2006. 712 с.
13. Ткаченко С.Й., Остапенко О.П. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання : монографія. Вінниця : ВНТУ. 2009. 176 с.
14. Арсеньєв В. М., Гречаненко В. А. Эксергетическая оценка эффективности теплонасосной технологии энергосбережений. *Вісник Сумського державного університету*. 2002. № 9(42). С. 81–85.

#### **Bosyi M.V. ENERGY EFFICIENCY OF THE AIR HEAT PUMP ON ENVIRONMENTALLY CLEAN PROPANE WORKING BODY**

*The article considers the problem of using a heat pump (HP), which works on alternative energy sources for heating and hot water supply of buildings. In its work TN uses low-potential heat, air. The factors influencing the energy efficiency of HP are determined, the peculiarities of air HP operation for the climatic conditions of Ukraine are estimated. The influence of the duration of air temperatures of different quantities on the heat productivity of HP is analyzed. To increase the efficiency of the heat pump system, a scheme of utilization of low-potential heat with the use of air is given. On the basis of the conducted researches it is established that the advantage of air as a heat carrier is that air HPs can work practically everywhere and do not demand arrangement of a low-temperature contour. A promising way to increase the efficiency of HP in the annual cycle of its work is the combined use of low-potential heat of soil and air. Heat pump system with two energy sources provides high heat output throughout the year and has a higher energy efficiency compared to traditional solutions. HPs have a significant advantage over other thermal power plants. They consume energy from renewable sources, reduce the cost of electricity by more than half is a fully automated device. The analysis of efficiency of heat supply systems shows that now in modern economic conditions heat supply systems can develop in the following direction: application of steam-compression air HP, at use of external air and air of exhaust ventilation of the industrial enterprises for increase of thermal characteristics of buildings. Modernization with the application of these measures can significantly improve the economic and technical characteristics of heat supply equipment. Energy efficiency of air-to-water HP according to the COP TN conversion factor: is equal to 3.6. Exergetic efficiency which characterizes perfection of conversion of energy in TN “air-water” makes 35%.*

**Key words:** heat pump, thermodynamic cycle, low-potential heat source, heat supply systems, heat transformation coefficient, exergetic efficiency.