

## ТЕПЛОВІ НАСОСИ ДЛЯ ОПАЛЕННЯ ТА ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ

Босий М. В., Кузик О. В.

### ВСТУП

Розглядається проблема використання теплових насосів (ТН), що працюють на альтернативних джерелах енергії для опалення та гарячого водопостачання будівель. У своїй роботі ТН використовують низькопотенційну теплоту повітря, водойм і надр землі. Виконано аналіз характеристик ТН, що працюють з різними джерелами низькопотенційної теплоти. Визначено фактори, які впливають на енергетичну ефективність ТН, оцінені особливості роботи ґрунтових, водяних та повітряних ТН для кліматичних умов України. Проаналізовано вплив тривалості температур повітря різних величин на теплопродуктивність ТН. Для підвищення ефективності роботи теплонасосної системи запропоновано схему вилучення низькопотенційної теплоти з використанням ґрунтового ТН і повітряного теплообмінника. 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<sup>1</sup>. Використання ТН для утилізації низькопотенційних теплових потоків економічно вигідно. В сучасних економічних умовах тенденція систем

---

<sup>1</sup> Ткаченко С.Й., Остапенко О.П. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання: монографія. Вінниця: ВНТУ. 2009. 176 с.

теплопостачання може розвиватися в наступних напрямках: застосування парокомпресійних ТН,

використання вторинних енергоресурсів промислових підприємств, підвищення теплотехнічних характеристик будівель.

Модернізація із застосуванням даних заходів може суттєво підвищити економічні і технічні характеристики теплопостачального обладнання.

Використання для теплопостачання традиційних джерел енергії потребує відповідних фінансових затрат із скороченням запасів твердих, рідких і газоподібних видів органічного палива та зростанням цін на енергоносії. Необхідно впроваджувати технології ТН з використанням поновлюваних альтернативних джерел енергії, які відкривають можливість до енергозбереження і зменшення викидів парникових газів в атмосферу. Проблема зниження затрат на опалення та гаряче водопостачання наразі актуальна<sup>2</sup>.

Підвищення енергоефективності ТН, які використовують геотермальну теплоту, в наш час є одним із найважливіших питань для подальшого розвитку і впровадження технологій застосування відновлювальних джерел енергії в системах теплопостачання<sup>3</sup>.

## **1. Аналіз теплових насосів**

ТН сприяють зменшенню використання органічного палива шляхом заміщення первинної енергії вторинними енергетичними ресурсами – це є одним з перспективних напрямків розвитку сучасної енергетики і знаходиться в центрі уваги зарубіжних і вітчизняних дослідників. В країнах Європи та Америки ТН використовуються більше 30 років для теплопостачання житлових і офісних будівель, а також різних приміщень. Найбільші енергетичні компанії займаються проектуванням, виготовленням і впровадженням ТН. Міжнародне Енергетичне Агентство (МЕА, латинська аббревіатура ІЕА), в яку асоційованими членами входять 28 енергетично розвинених країн і метою діяльності якого є забезпечення енергетичної безпеки і пошук шляхів поліпшення екологічної ситуації є головним координатором політики впровадження ТН.

---

<sup>2</sup> Закон України № 1959-VIII від 21.03.2017 «Про внесення змін до Закону України «Про теплопостачання» щодо стимулювання виробництва теплової енергії з альтернативних джерел енергії».

<sup>3</sup> Остапенко О.П. Холодильна техніка та технологія. Теплові насоси: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ. 2015. 123 с.

Досвід зарубіжних країн таких як Швеція, Фінляндія, Німеччина і інших доводить доцільність застосування ТН. При проектуванні та реконструкції сучасних систем теплопостачання необхідно враховувати можливість використання технології ТН. Застосування ТН в комплексі з традиційною схемою 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 є теплообмінним апаратом, що виділяє теплоту для споживача, а випарник – теплообмінним апаратом, що утилізує низькопотенційну теплоту (нетрадиційні поновлювані джерела енергії і вторинні енергетичні ресурси). Залежно від принципу роботи ТН поділяються на компресійні і абсорбційні. Компресійні 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 компресійні ТН.

Таким чином, проведення досліджень з визначення доцільності встановлення ТН на підприємствах і організаціях та підвищення енергоефективності використання ПКТН в системах теплопостачання є актуальним.

Принципова схема компресійного теплового насоса наведена на рис. 1.



**Рис. 1. Принципова схема ТН**

## 2. Теплові насоси їх класифікація та ефективність використання

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<sup>4</sup>. Геотермальні ТН (які використовують теплоту землі, наземних або підземних ґрунтових вод, ґрунт). Колектор розміщується кільцями або спіралями в горизонтальних траншеях, нижче глибини промерзання ґрунту (зазвичай від 1,2 м і більше) з розрахунку: один метр труби еквівалентний 20-30 Вт. Труби заповнюються антифризом (розчин пропілен-гліколю). Відстань між трубами повинна бути не менше 0,5-0,6 м. Після нескладних математичних підрахунків визначаємо, що для отримання 10 кВт енергії буде потрібно контур довжиною 300-500 м. Контур укладається досить компактно, займаючи приблизно до 600 м<sup>2</sup> площі.

Такий спосіб є найбільш економічно ефективним для житлових об'єктів за умови відсутності дефіциту земельної площі під контур. Колектор розміщується вертикально в свердловині, кожен метр труби буде дорівнювати 50-60 Вт енергії. Для нормальної роботи геотермального насоса потужністю 10 кВт, буде потрібно створити контур загальною глибиною 170-200 м. Свердловина заповнюється ґрунтовими водами природним шляхом і вода проводить теплоту до теплоносія. При недостатній довжині свердловини, або спробі отримати від ґрунту надлишкову потужність, ця вода і, навіть, антифриз можуть замерзнути, що і обмежує максимальну теплову потужність таких систем. Цей спосіб застосовується у випадках, коли площа земельної ділянки не дозволяє розмістити контур горизонтально, або існує загроза пошкодження ландшафту, або у гірській місцевості.

Геотермальний ТН з вертикальним контуром (система «ґрунт-вода») – водні (водойми). Колектор розміщується спіралями, або кільцями у водоймі (озері, ставку, річці) нижче глибини промерзання. Такий варіант є ідеальним за всіма показниками: короткий контур, найбільш висока температура навколишнього середовища, як наслідок, висока ефективність роботи. Один метр труби підводного контуру дорівнює 30 Вт теплової енергії. Для отримання 10 кВт теплоти потрібно 300 метрів контурної труби. Ґрунтові води є кращим джерелом енергії для геотермального ТН (система «вода-вода»), завдяки тому, що навіть в

---

<sup>4</sup> Ткачук К.К. Перспективи застосування теплових насосів в Україні. *Вісник НТУУ «КПІ»*. Серія «Гірництво» Випуск 27. 2015 р. С. 144–153.

зимовий час температура цього ресурсу не опускається нижче негативної позначки та знаходиться в діапазоні від +5 до +15°C. ТН, які отримують енергію від ґрунтових вод, мають найбільш високий ККД. Проходячи через нього, вода віддає свою теплоту<sup>5</sup>.

Повітряні ТН використовують як джерело низькопотенційної теплової енергії повітря. Даний агрегат не вимагає монтажу підземного чи підводного контуру. Як правило, установки даного типу використовуються в тому випадку, коли інші варіанти відбору теплоти не можуть бути реалізовані. Теплова енергія повітря використовується до позначки -15°C. Якщо вдарили сильні морози, і температура опустилася нижче цього показника, за справу в загальному випадку береться додатковий теплогенератор, але ТН компанії Heloitem мають робочий діапазон температур від -25 до +45°C і додатковий теплогенератор не потрібний. Існують також повітряні ТН, які відбирають низькопотенційну теплоту з повітря і використовують його 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.

ТН, які використовують вторинну теплоту (наприклад, теплоту, вентиляційних викидів, джерела скидної теплоти, які вимагають утилізації, тощо) доцільно застосовувати для промислових об'єктів. Одним з найефективніших джерел даного типу є використання відпрацьованої теплоти повітряних та холодильних компресорів, оскільки вона має високу температуру. За останні роки в різних засобах масової інформації, включаючи Інтернет видання, з'явилися численні публікації, що стосуються використання технології ТН в системах опалення і гарячого водопостачання об'єктів різної сфери – від окремих будинків до житлових мікрорайонів. Внаслідок зниження питомих тепловтрат будівлі актуальною стала тематика низькопотенційних систем опалення<sup>6</sup>. Актуалізація сталася через те, що знизилися розрахункові температурні режими систем, а це спричинило за собою зменшення габаритних розмірів опалювальних

---

<sup>5</sup> Драганов Б.Х., Мищенко А.В. К вопросу о тепловых насосах. *Пром. Теплотехника*. 2006. т. 28. № 2. С. 94–98.

<sup>6</sup> Пісарев В.Є. Теплові насоси та холодильні установки. Навчальний посібник. Київ : КНУБА. 2002. 124 с.

приладів (у більшості випадків радіаторів). Основною перевагою ТН є можливість перемикання з режиму опалення взимку на режим кондиціонування влітку: просто замість радіаторів до зовнішнього колектору підключаються фанкойли або система «холодні стелі». ТН надійний, його роботою керує автоматика. В процесі експлуатації система не потребує спеціального обслуговування і не вимагає особливих навичок. ТН компактний (його модуль за розмірами не перевищує звичайний холодильник) і практично безшумний<sup>7</sup>. До недоліків геотермальних ТН, які використовуються для опалення, слід віднести велику вартість монтажу зовнішніх підземних або підводних теплообмінних контурів. Період окупності ТН становить 4-7 років, при терміні служби 15-20 років до капітального ремонту.

Реальні значення ефективності сучасних ТН становлять близько  $COP = 2,0$  при температурі джерела  $-20^{\circ}C$ , і порядку  $COP = 5,0 - 6,0$  при температурі джерела  $+15^{\circ}C$ . Для забезпечення заданого температурного режиму споживача при низьких температурах повітря необхідно використовувати обладнання зі значною надлишковою потужністю, що пов'язане з нераціональним використанням капіталовкладень (втім, це стосується і будь-яких інших джерел теплової енергії). Всі, навіть найефективніші, ТН нагрівають воду в системі опалення не більше  $+62...+65^{\circ}C$ , причому, чим вище температура води, що нагрівається, тим менше ефективність і надійність ТН. Якщо теплоти із зовнішнього контуру

все ж недостатньо для опалення в сильні морози, практикується експлуатація ТН в парі з додатковим генератором теплоти (в таких випадках це використання бівалентної схеми опалення)<sup>8</sup>. Коли вулична температура опускається нижче розрахункового рівня (температури бівалентності), в роботу включається другий генератор теплоти – найчастіше невеликий електронагрівач, рідше газовий або твердопаливний котли. Оптимальна потужність теплонасосної установки становить 60-70% від необхідної встановленої потужності, що також впливає на закупівельну вартість установки опалення ТН<sup>8</sup>. В цьому випадку ТН забезпечує не менше 95 % потреби споживача в тепловій енергії за весь опалювальний період.

---

<sup>7</sup> Арсеньев В.М. Теплонасосная технология энергосбережения. Суми: Вид-во СДУ. 2009. 251 с.

<sup>8</sup> Арсеньев В.М., Мелейчук С.С. Теплові насоси: основи теорії і розрахунку: навчальний посібник. Суми: СДУ. 2018. 364 с.

При такій схемі середньо сезонний коефіцієнт перетворення енергії для кліматичних умов України дорівнює порядку  $COP = 3$ .

На даний час наявні ресурси теплової енергії довкілля багаторазово перевищують прогнозований рівень споживання всіма секторами промисловості України. Наразі 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  $+5...+10^{\circ}C$ , витяжна вентиляція  $+15...+25^{\circ}C$ , озерна вода  $0...+10^{\circ}C$ , річкова вода  $0...+10^{\circ}C$ , морська вода  $+3...+8^{\circ}C$ , ґрунт  $0...+10^{\circ}C$ , ґрунтові води  $>10^{\circ}C$ , геотермальна вода  $+20...+50^{\circ}C$ <sup>9</sup>.

ТН компанії Heliotherm (Австрія) зарекомендували себе як високоякісні, ефективні та надійні джерела теплоти, вони включають в себе повітряні, ґрунтові та водяні ТН. Мають наступні переваги: екологічність (абсолютно безпечні для навколишнього середовища); високий коефіцієнт перетворення ( $COP=5-7$  в залежності від виду ТН); система три в одному (опалення, гаряче водопостачання і охолодження будівлі); можливість дистанційного керування (функція Web-control); довговічність конструкції; низький рівень шуму (до 55 дБ); можливість повної енергонезалежності (поєднання ТН з сонячною електростанцією)<sup>10</sup>.

ТН Heliotherm мають наступні модифікації:

1. ТН (повітря-вода) Comfort Compact (теплова потужність 8-18 кВт,  $COP=4,0-5,0$ ), використовуються для опалення та гарячого водопостачання приватних будинків.

2. ТН (повітря-вода) Basic Comfort у поєднанні з сонячними батареями (теплова потужність 8-18 кВт,  $COP=4,0-5,0$ ), використовуються для опалення та гарячого водопостачання приватних будинків.

3. ТН (повітря-вода) Solid Split з можливістю встановлення сонячних батарей (теплова потужність 30-55 кВт,  $COP=4,0-5,0$ ),

---

<sup>9</sup> Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврін В.С., Дабіжа Н.О. Теплові насоси в системах теплохолододопостачання монографія / Під. ред. акад. НАН України А.А. Долінського; НАН України, Ін-т техн. теплофізики. Київ : 2008. 104 с.

<sup>10</sup> Сірко З.С., Коренда В.А., Вишняков І.Ю., Протасов О.С., Охріменко С.М., Цірень Н.Л. Використання теплових насосів для опалення та гарячого водопостачання будівель підприємств на прикладі установок Heliotherm. *Наукові доповіді НУБіП України. Техніка і енергетика АПК.* № 5 (87). 2020.

використовуються для опалення та гарячого водопостачання приватних та багатоквартирних будинків.

4. Ґрунтові ТН (росіл-вода) Solid з можливістю встановлення сонячних батарей (теплова потужність 30-120 кВт, COP=6,0-7,0), використовуються для опалення та гарячого водопостачання приватних, багатоквартирних та інших будинків.

5. Водяні ТН (вода-вода) Solid з можливістю встановлення сонячних батарей (теплова потужність 30-120 кВт, COP=6,0-7,0), використовуються для опалення та гарячого водопостачання приватних, багатоквартирних та інших будинків.

Розглянемо встановлення ТН на прикладі організації. В ній знаходяться дві опалювані будівлі адміністративно-побутового (опалюваний об'єм 5000 м<sup>3</sup>) та господарського корпусів (опалюваний об'єм 7000 м<sup>3</sup>), крім цього в адміністративно-побутовому корпусі також присутня система гарячого водопостачання душових сіток та умивальників (в розрахунках орієнтуємось на 18 чоловік персоналу). Необхідна теплова потужність ТН на 1 м<sup>3</sup> опалюваного об'єму становить 75 Вт/м<sup>3</sup>, для гарячого водопостачання при витраті на 1 людину 50 літрів води при температурі 45°C – 800 Вт/людину. Теплове навантаження адміністративно-побутового корпусу становитиме 345 кВт (з них на гаряче водопостачання 16 кВт), господарсько корпусу – 657 кВт, тому для даної організації найбільш актуальним буде встановлення ґрунтового ТН.

Іншим прикладом може бути адміністративна будівля. Опалюваний об'єм будівлі становитиме 1700 м<sup>3</sup>. Теплове навантаження системи опалення становитиме 45,0 кВт, системи гарячого водопостачання – 5 кВт, сумарне 50 кВт. Враховуючи географічне розташування будівлі, особливості ландшафту, правила пожежної безпеки та ін. для покриття теплового навантаження даної будівлі найбільше підходить ТН Heliotherm Solid Split (повітря-вода) потужністю 55 кВт.

У процесі роботи ТН компресор споживає електроенергію (рис. 1). 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<sup>11</sup>. COP розраховується за наступним виразом

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

де  $Q$  – теплота, отримана з системи, Дж;  
 $E$  – отримана електроенергія, Дж.

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

де  $C_v$  – питома масова теплоємність рідини в циклі опалення, Дж/кг·К;  
 $m$  – маса теплоносія, кг;  
 $\Delta t$  – різниця температур теплоносія до і після віддачі теплової енергії, К.

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

де  $U$  – напруга; В;  $I$  – струм, А;  $t$  – час, год.

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

$$Q = 1000 \cdot 4,19 \cdot 35 = 146650 \text{ кДж} = 40,73 \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (4)$$

$$E = 0,380 \cdot 120 \cdot 0,25 = 11,40 \text{ кВт} \cdot \text{год}. \quad (5)$$

Коефіцієнт трансформації COP ТН розраховуємо за рівнянням (1)

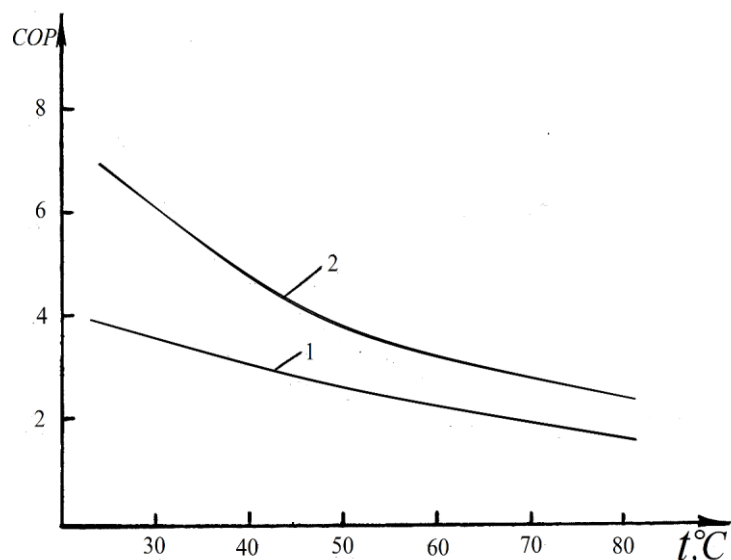
$$\text{COP} = 40,73/11,40 = 3,57 \quad (6)$$

Тобто, при температурі води 10°C на кожний кіловат електричної енергії ми отримуємо 3,57 кВт теплової енергії.

Нами було досліджено ефективність ТН при різних значеннях температури зовнішнього джерела теплоти – води (рис. 2).

---

<sup>11</sup> Счастний Є.Є., Смірнов А.В. Перспективи використання теплових насосів при модернізації системи теплопостачання громадської будівлі. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2012. Вип. 128. С. 276-282.



**Рис. 2. Залежність коефіцієнта ефективності ТН від температури системи опалення: при температурі води: 1 – при 10°C; 2 – при 15°C**

З рис. 2 видно, що коефіцієнт ефективності COP ТН залежить від зовнішньої температури джерела теплоти води і від характеру системи опалення. При збільшенні температури води з 10 до 15°C коефіцієнт ефективності COP ТН збільшується у два рази. При заміні традиційних систем опалення на низькотемпературні, ефективність ТН зростає. Тому, при проектуванні систем опалення з використанням ТН необхідно враховувати цей фактор.

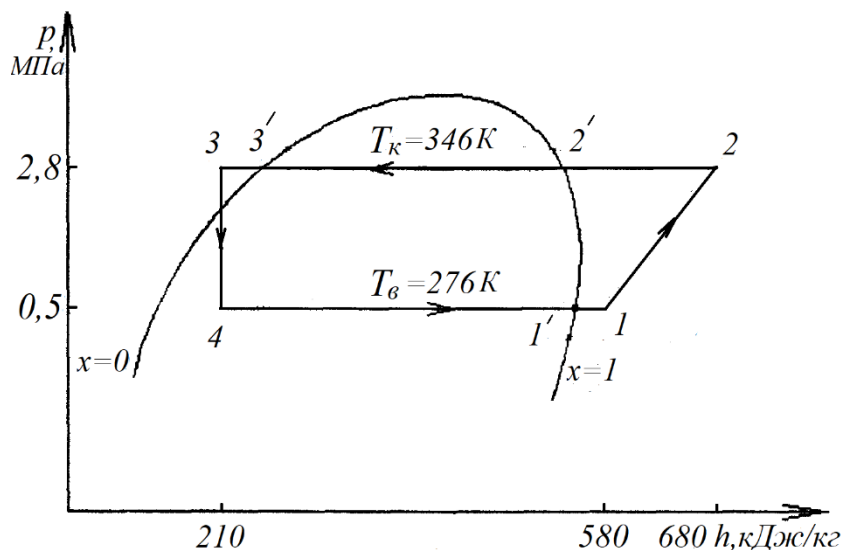
ТН характеризуються вищою ефективністю, ніж усі традиційні технології на ринку теплопостачання. Для порівняння: газовий котел, при споживанні 1 кВт електроенергії зможе виділити близько 0,9 кВт теплоти, тоді як ТН справляється з цим завданням, демонструючи віддачу в 4-5 кВт теплоти. Секрет такого результату полягає в тому, що ТН не виробляє теплоту, а переносить її.

### **3. Термодинамічна енергоефективність парокompресійних теплових насосів**

На рис. 3 наведено приклад роботи циклу ПКТН «вода-вода» в  $p-h$  діаграмі для робочого тіла пропану. Лінія 4-1 відповідає процесу кипіння пропану у випарнику ПКТН при температурі кипіння +3°C, і тиску кипіння 0,50 МПа (т. 4 – пропан у стані вологої насиченої пари; т. 1 – суха насичена пара; лінія 1'-1 – підігрів насичених парів пропану теплотою гарячого рідкого пропану до стану перегрітої пари). У випарнику ПКТН «вода-вода» завдяки охолодженню

низькотемпературного теплоносія  $\Delta t_{\text{HT}} = t'_{\text{HT}} - t''_{\text{HT}}$  випаровується рідина пропану (процес 4-1) за умови незмінної температури  $t_{\text{в}} = t'_{\text{HT}} - \Delta t_{\text{HT}}$ , де  $\Delta t_{\text{HT}} = 3-5 \text{ }^\circ\text{C}$  – кінцева різниця температур у випарнику. Суха насичена пара пропану, яка утворилася у випарнику, адіабатно стискається в компресорі (процес 1-2), внаслідок чого підвищується тиск і температура пропану. В конденсаторі ПКТН «вода-вода» пара пропану після компресора конденсується за умови сталої температури  $T_{\text{к}} = \text{const}$  (процес 2-3), віддаючи теплоту мережевій воді системи теплофікації, яка підігривається від температури  $t'_{\text{МВ}}$  до температури  $t''_{\text{МВ}} = t_{\text{к}} - \Delta t_{\text{к}}$  (конденсація пропану відбувається при температурі конденсації  $+73 \text{ }^\circ\text{C}$  і тиску конденсації  $2,8 \text{ МПа}$ ). Далі конденсат пари пропану дроселюється ( $h_3 = h_4$ ) в дросельному вентилі (процес 3-4) і з температурою  $T_{\text{в}}$  знов надходить у випарник.

Енергетична ефективність ПКТН залежить від характеристик теплових джерел, що беруть участь у термотрансформації: від температурного рівня нагрівання середовища споживача теплового навантаження і від температури надходження утилізованого низькопотенційного середовища<sup>12</sup>.



**Рис. 3. Цикл роботи ПКТН «вода-вода» в  $p$ - $h$ -діаграмі**

<sup>12</sup> Безродний М.К., Пригула Н.О. Енергетична ефективність теплонасосних схем тепlopостачання: монографія. К.: НТУУ «КПІ». 2012. 208 с.

За ексергетичним методом оцінюємо енергоефективність термодинамічних процесів перетворення енергії, що відбуваються у ТН<sup>13</sup>.

Термодинамічна модель описується ексергетичним балансом ТН, і на її базі досліджується ступінь досконалості процесів, що відбуваються в ТН, і оцінюються можливі межі збільшення енергоефективності<sup>14</sup>.

Аналіз енергоефективності ПКТН «вода-вода», проводився для робочого тіла холодоагента R290. Для R290 температура випаровування становить  $t_b = 2...5^\circ\text{C}$ , а конденсації –  $t_k = 73^\circ\text{C}$ . Вибираємо низькопотенційне джерело теплоти – ґрунтову воду, яка на вході у випарник має температуру  $t'_{нт} = 8...15^\circ\text{C}$ , а на виході з нього  $t''_{нт} = 4...10^\circ\text{C}$ . Температура мережевої води (теплоносія) на вході в конденсатор становить  $t'_{мв} = 35^\circ\text{C}$ , а на виході з нього –  $t''_{мв} = 55^\circ\text{C}$ .

Розглянемо визначення показників енергоефективності циклу ПКТН «вода-вода» для системи тепlopостачання.

Питома теплота, яка підводиться до R290 у випарнику

$$q_b = h_1 - h_4, \quad (7)$$

де  $h_1, h_4$  – ентальпії R290 на виході з випарника та вході у випарник.

Робота стиснення в компресорі

$$l_{ст} = h_2 - h_3, \quad (8)$$

Питома робота компресора

$$l_{км} = (h_2 - h_1) / \eta_{км}, \quad (9)$$

де  $\eta_{км}$  – внутрішній ККД компресора.

Питома робота, яка витрачається на привід компресора

$$l_{пр} = l_{км} / \eta_{пр}, \quad (10)$$

де  $\eta_{пр}$  – ККД привода компресора.

---

<sup>13</sup> Босий М.В., Кузик О.В. Ефективність циклу теплового насоса для тепlopостачання. *Центральноукраїнський науковий вісник Технічні науки*. 2020. Вип. 3 (34). С. 136-142.

<sup>14</sup> Мартыновский В.С. Цыклы, схемы и характеристики термотрансформаторов / Под ред. В.М. Боромянского. Москва : Энергия. 1979. 288 с.

Питома теплота, яка віддається R290 в конденсаторі воді

$$q_k = h_2 - h_3 = q_B + l_{KM}, \quad (11)$$

де  $h_2, h_3$  – ентальпії R290 на вході в конденсатор та виході з нього.

$$\eta_c^B = 1 - T_{nc} / T_{cp}^B -$$

Рівняння

$$\eta_{ex} = e_{вих.} / e_{вх.} = e_k / (e_B + l_{пр}) = q_k \cdot \eta_c^k / (q_B \cdot \eta_c^B + l_{пр}) \text{COP} = \mu = q_k / l_{пр} = (q_B + l_{KM}) / l_{пр}$$

енергетичного балансу ТН

$$l_{ст} + q_B = q_k = q_{ТН}. \quad (12)$$

За допомогою коефіцієнта перетворення теплоти COP оцінюємо енергетичну ефективність роботи ПКТН «вода-вода»<sup>15</sup>

$$\text{COP} = \mu = q_k / l_{пр} = (q_B + l_{KM}) / l_{пр}. \quad (13)$$

Для визначення термодинамічної ефективності ПКТН «вода-вода» використовуємо ексергетичний метод<sup>16</sup>.

Критерієм термодинамічної досконалості ПКТН «вода-вода», як відомо, є ексергетичний ККД

$$\eta_{ex} = e_{вих.} / e_{вх.} = e_k / (e_B + l_{пр}) = q_k \cdot \eta_c^k / (q_B \cdot \eta_c^B + l_{пр}), \quad (14)$$

де  $e_{вх.}, e_{вих.}$  – ексергія входу у випарнику і в компресорі та виходу в конденсаторі;  $\eta_c^B = 1 - T_{nc} / T_{cp}^B$  – ексергетична температурна функція для входу теплоти у випарнику;  $\eta_c^k = 1 - T_{nc} / T_{cp}^k$  – ексергетична температурна функція для виходу теплоти з конденсатора;  $T_{cp}^B$  і  $T_{cp}^k$  – середньотермодинамічні температури входу і виходу теплоти;  $T_{nc}$  – абсолютна температура довкілля, К.

Результати проведеного вище термодинамічного розрахунку ПКТН «вода-вода», наведені в табл. 1.

<sup>15</sup> Соколов Е.Я., Бродянский В.М. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. М: Энергоиздат. 1981. 320 с.

<sup>16</sup> Куделя П.П., Соломаха А.С., Очеретянюк М.Д. Оцінка ефективності опалювальних теплових насосів з використанням методу циклів. *Відновлювальна енергетика*. 2016. № 4. С. 74–85.

## Термодинамічний розрахунок ПКТН «вода-вода»

Параметр	Розмірність	Формула, рисунок	Розрахунок ві значення
Температура випаровування R290, $T_v$	К	Рис. 3	276
Ентальпія R290 після випарника, $h_1$	кДж/кг	Рис. 3	580
Тиск R290 у випарник, $P_v$	МПа	Рис. 3	0,5
Температура конденсації R290, $T_k$	К	Рис. 3	346
Ентальпія R290 після конденсатора, $h_3$	кДж/кг	Рис. 3	210
Тиск конденсації R290, $P_k$	МПа	Рис. 3	2,8
Ентальпія R290 на вході в компресор, $h_1$	кДж/кг	Рис. 3	580
Ентальпія R290 після компресора, $h_2$	кДж/кг	Рис. 3	680
Ентальпія R290 перед випарником, $h_4$	кДж/кг	Рис. 3	210
Питоме теплове навантаження випарника, $q_v$	кДж/кг	(1)	370
Питоме теплове навантаження конденсатора, (теплового насоса), $q_k = (q_{тн})$	кДж/кг	(5)	470
Робота стиснення в компресорі, $l_{ст}$	кДж/кг	(2)	100
Питома робота компресора, $l_{км}$	кДж/кг	(3)	94,14
Питома робота, яка витрачається на привід компресора, $l_{пр}$		(4)	104
Перевірка теплового балансу	-	(6)	470
Коефіцієнт перетворення теплоти, COP	-	(7)	4,5
Ексергетичний ККД ТН, $\eta_{ex}$	-	(8)	0,44

Значні втрати ексергії в ТН «вода-вода» з'являються через необоротності процесів теплопередачі. Втрата ексергії через необоротну передачу теплоти і гідравлічного тертя тим більша, чим нижчий температурний рівень у процесі. Зміна  $\Delta T_v$  більше впливає на термодинамічну ефективність циклу  $\eta_{ex}$ , ніж  $\Delta T_k$ . Тому вибору величини  $\Delta T_v$ , тобто вибору теплообмінного апарату для процесу підведення теплоти до робочої речовини R290 від теплоносія з низькою температурою, необхідно приділяти більше уваги.

Отже, показники енергоефективності роботи циклу ПКТН «вода-вода», коефіцієнт перетворення COP ТН «вода-вода» і ексергетичний ККД  $\eta_{ex}$  ТН «вода-вода» суттєво залежать від середньотермодинамічних температур входу і виходу теплоти, а також докілья. Проведений аналіз впливу температур на енергоефективність ПКТН «вода-вода» дозволяє прогнозувати оптимальні температурні режими роботи.

## ВИСНОВКИ

1. Використання ТН передбачає лише оплату за електроенергію на роботу та технічне обслуговування установки. Оплата за електроенергію у порівнянні з витратами на центральне опалення,

роботу газових або електричних котлів аналогічної потужності в декілька разів менша.

2. Впровадження ТН є перспективним напрямком використання альтернативних джерел енергії для забезпечення потреб систем опалення, вентиляції та гарячого водопостачання будівель, але даний процес суттєво залежить від місцезнаходження об'єкта та наявності доступу до певного оптимального для нього джерела низькопотенціальної теплової енергії.

3. Незважаючи на свою ефективність ТН (особливо повітряні) далеко не завжди повноцінно покривають теплове навантаження будівель в 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).

4. Найефективнішим джерелом низькопотенціальної теплової енергії є геотермальні води, оскільки значення їх температури знаходиться в межах  $+20\dots +50$  °С, коефіцієнт перетворення ТН при цьому найвищий.

5. Також високоефективними джерелами низькопотенціальної теплоти є скидна теплота від водооборотних процесів в енергетиці та промисловості, вентиляційні скиди та відпрацьована теплота повітряних і холодильних компресорів та ін.

6. Найбільшим потенціалом з природних низькотемпературних джерел теплоти є теплота ґрунту і ґрунтових вод, повітря, а також річкових, озерних і морських вод.

7. Проведено термодинамічне дослідження ефективності застосування ПКТН «вода-вода» для системи опалення приміщення при використанні ґрунтових вод як джерела низькопотенційної теплової енергії. Оцінка енергоефективності термодинамічних процесів перетворення енергії, що відбуваються в ПКТН «вода-вода», робочим тілом якого є холодильний агент R290 виконана методом ексергетичного аналізу.

8. Показано, що енергетичну ефективність ПКТН «вода-вода» оцінювали коефіцієнтом перетворення COP ТН, який за розрахунками становить 4,5. Досконалість перетворення енергії в ПКТН «вода-вода» оцінювали за допомогою ексергетичного ККД в залежності від середньотермодинамічних температур  $T_{cp}^B$  і  $T_{cp}^K$ , він становить 44 %.

## **АНОТАЦІЯ**

Розглянуто термодинамічну енергоефективність застосування парокompресійного теплового насоса (ПКТН) з природними джерелами теплової енергії доквілля та проведено оцінку

ефективності використання ґрунтових вод в системах теплопостачання. Представлені схема ПКТН «вода-вода» для системи теплопостачання, температурні рівні в загальній системі ПКТН «вода-вода» та наведено приклад роботи циклу ПКТН «вода-вода» в  $p-h$  діаграмі для пропану (R290). Приведено результати термодинамічного дослідження енергоефективності застосування ПКТН при використанні ґрунтових вод як джерела низькопотенційної теплової енергії. Розглянуто застосування чистих вуглеводнів як робочих речовин для ПКТН, а також метод оцінки енергоефективності за ексергетичним аналізом термодинамічних процесів перетворення енергії, що відбуваються в ПКТН, робочим тілом якого є холодильний агент R290. Енергетичну ефективність ПКТН оцінювали коефіцієнтом перетворення ТН COP, він за розрахунками дорівнює 4,5. Термодинамічну ефективність ПКТН в системах теплопостачання розглядали за допомогою ексергетичного ККД в залежності від середньотермодинамічних температур теплоносіїв в конденсаторі і випарнику, який характеризує досконалість перетворення енергії і становить 44 %.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Ткаченко С.Й., Остапенко О.П. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання: монографія. Вінниця : ВНТУ. 2009. 176 с.
2. Закон України №1959-VIII від 21.03.2017 «Про внесення змін до Закону України «Про теплопостачання» щодо стимулювання виробництва теплової енергії з альтернативних джерел енергії».
3. Остапенко О.П. Холодильна техніка та технологія. Теплові насоси: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ. 2015. 123 с.
4. Ткачук К.К.. Перспективи застосування теплових насосів в Україні. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*. Випуск 27. 2015 р. С. 144–153.
5. Драганов Б.Х., Мищенко А.В. К вопросу о тепловых насосах. *Пром. Теплотехник*. 2006. т. 28. № 2. С. 94–98.
6. Пісарев В.Є. Теплові насоси та холодильні установки. Навчальний посібник. Київ : КНУБА. 2002. 124 с.
7. Арсеньєв В.М., Мелейчук С.С. Теплові насоси: основи теорії і розрахунку: навчальний посібник. Суми.СДУ. 2018. 364 с.
8. Арсеньєв В.М. Теплонасосная технология энергозбереження. Суми: Вид-во СДУ. 2009. 251 с.
9. 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. Київ: 2008. 104с.

10. Сірко З.С., Коренда В.А., Вишняков І.Ю., Протасов О.С., Охріменко С.М., Цірень Н.Л. Використання теплових насосів для опалення та гарячого водопостачання будівель підприємств на прикладі установок HelioTerm. *Наукові доповіді НУБіП України. Техніка і енергетика АПК*. № 5 (87). 2020.

11. Счастний Є.Є., Смірнов А.В. Перспективи використання теплових насосів при модернізації системи теплопостачання громадської будівлі. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2012. Вип. 128. С. 276–282.

12. Безродний М.К., Припула Н.О. Енергетична ефективність теплонасосних схем теплопостачання: монографія. Київ : НТУУ «КПІ». 2012. 208 с.

13. Босий М.В., Кузик О.В. Ефективність циклу теплового насоса для теплопостачання. *Центральноукраїнський науковий вісник Технічні науки*. – 2020. Вип. 3(34). С. 136–142.

14. Мартыновский В.С. Цыклы, схемы и характеристики термотрансформаторов / под ред. В.М. Бородянского. Москва : Энергия. 1979. 288 с.

15. Соколов Е.Я., Бродянский В.М. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. Москва : Энергоиздат. 1981. 320с.

16. Куделя П.П., Соломаха А.С., Очеретянко М.Д. Оцінка ефективності опалювальних теплових насосів з використанням методу циклів. *Відновлювальна енергетика*. 2016. №4. С. 74–85.

#### **Information about the authors:**

##### **Bosyi Mykola Viktorovych,**

Lecturer at the Department of Materials and Foundry Engineering  
Central Ukrainian National Technical University  
8, Universytetskyi Avenue, Kropyvnytskyi, Ukraine

##### **Kuzyk Oleksandr Volodymyrovych**

PhD in Technical Sciences,  
Associate Professor at the Department of Materials  
and Foundry Engineering  
Central Ukrainian National Technical University  
8, Universytetskyi Ave, Kropyvnytskyi, Ukraine