

## ТЕПЛОВІ НАСОСИ ДЛЯ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТА ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ АГРОПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Босий Микола Вікторович

викладач

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

ORCID ID: 0000-0002-3090-0427

bosiyvm@ukr.net

*Натепер зміни, які відбуваються в агропромисловому комплексі України потребують розробки та створення новітніх теплонасосних технологій для теплопостачання та гарячого водопостачання агропромислових підприємств. У статті розглядається проблема використання теплових насосів (ТН), що працюють на альтернативних джерелах енергії для теплопостачання та гарячого водопостачання агропромислових підприємств. У своїй роботі ТН використовують низькопотенційну теплоту повітря, водойм і надр землі. Метою роботи є обґрунтування та дослідження доцільності використання ТН на підприємствах агропромислового виробництва. 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 агропромислових підприємств України. Проаналізовано вплив тривалості температур повітря різних величин на теплопродуктивність ТН. Для підвищення ефективності роботи теплонасосної системи запропоновано схему відбору низькопотенційної теплоти з використанням ґрунтового ТН. 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. Використання ТН для утилізації низькопотенційних теплових потоків економічно вигідно. Аналіз ефективності систем теплопостачання показує, що в сучасних економічних умовах тенденція систем теплопостачання може розвиватися в наступних напрямках: застосування парокompресійних ТН, використання вторинних енергоресурсів промислових підприємств агропромислового комплексу, підвищення теплотехнічних характеристик будівель. Модернізація із застосуванням даних заходів може суттєво підвищити економічні і технічні характеристики теплопостачального обладнання для будівель агропромислового виробництва.*

**Ключові слова:** тепловий насос, агропромислові підприємства, термодинамічний цикл, тепла енергія, низькопотенційне джерело теплоти, системи теплопостачання, коефіцієнт трансформації.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.1>

**Вступ.** Нині зі скороченням запасів органічних видів палива та зростанням цін на енергоносії, як в Україні, так і у світі в цілому, необхідно на сучасному етапі використовувати та впроваджувати найновіші технології з використанням відновлювальних альтернативних природних джерел енергії, які відкривають для сьогодення можливість до енергозбереження і зменшення викидів парникових газів в довкілля. Одним із видів таких технологій є використання теплових насосів (ТН) (Zakon Ukrainy, 2017; Maliarenko & Lysak, 2004; Bezrodnyi et al., 2013; Ostapenko, 2015; Arseniev & Meleichuk, 2018).

На теперішньому етапі розвитку енергоефективних екологічно чистих теплонасосних технологій для систем теплопостачання сучасним екологічним та найефективнішим джерелом енергії для системи опалення агропромислових підприємств є використання енергії землі, що міститься у повітрі, ґрунті та воді. Тому ТН типу «повітря–вода», «ґрунт–вода» і «вода–вода» працюють з високими показниками ефективності і за опалювальний період заощаджують до 70% коштів у порівнянні із традиційною системою опалення газовим котлом, що

є вигідною інвестицією на майбутнє (Sniezhkin et al., 2008; Bosyi & Kuzyk, 2022; Pisarev, 2002; Bezrodnyi & Prytula, 2012).

Тому, необхідно впроваджувати теплонасосні технології з використанням поновлювальних альтернативних джерел енергії, які відкривають можливість до енергозбереження і зменшення викидів парникових газів в атмосферу. Проблема зниження затрат на опалення та гаряче водопостачання актуальна натепер і для агропромислових підприємств (Shevel, 2004; Khmelniuk & Martyniuk, 2008; Bosyi et al., 2020; Arseniev, 2009).

Підвищення енергоефективності ТН, які використовують геотермальну теплоту, в наш час є одним із найважливіших питань для подальшого розвитку та впровадження технологій застосування відновлювальних джерел енергії в системах теплопостачання для підприємств агропромислового комплексу (Bosyi, 2022; Moroziuk, 2006).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Найбільші енергетичні компанії займаються проектуванням, виготовленням і впровадженням ТН. Забезпечення енергетичної безпеки України і пошук шляхів поліпшення

екологічної ситуації є головним питанням впровадження ТН. Досвід зарубіжних країн, таких як Англія, Франція, Японія, Швеція, Фінляндія, Німеччина та інших доводить доцільність застосування ТН. При проектуванні та реконструкції сучасних систем теплопостачання необхідно враховувати можливість використання технологій ТН. Застосування ТН в комплексі з традиційною схемою теплопостачання для систем опалення, кондиціонування і вентиляції великих об'єктів агропромислових підприємств забезпечує повну автономність зон регулювання та істотну економію паливно-енергетичних ресурсів навіть при використанні традиційних джерел енергії (Bosyi & Kuzuk, 2020; Bosyi, 2022).

Термодинамічний цикл теплового насосу аналогічний холодильній машині, але навпаки. У теплому насосі конденсатор є 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 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 (Morozuk, 2006; Tkachenko & Ostapenko, 2009).

Схема парокомпресійного теплового насоса наведена на рис. 1.

**Постановка завдання.** Метою статті є обґрунтування та дослідження доцільності використання ТН на підприємствах агропромислового комплексу.

**Матеріали і методи 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.

Геотермальний ТН з вертикальним контуром (система «ґрунт-вода»), є ідеальним варіантом за всіма показниками: короткий контур, найбільш висока температура навколишнього середовища, як наслідок

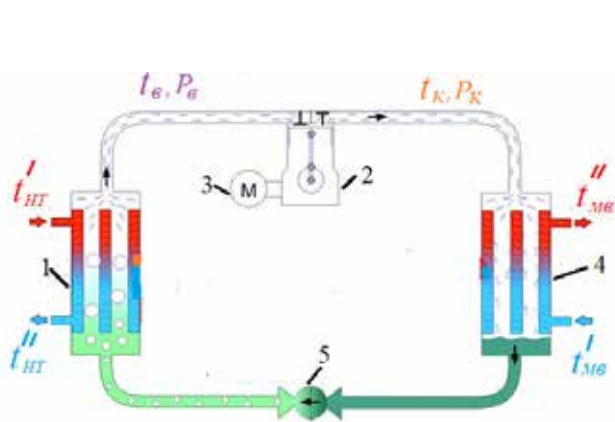


Рис. 1. Схема парокомпресійного ТН:  
1 – випарник; 2 – компресор; 3 – електродвигун;  
4 – конденсатор; 5 – дросель

висока ефективність роботи. Один метр труби підводного контуру дорівнює 30 Вт теплової енергії. Для отримання 10 кВт теплоти, потрібно 330 метри контурної труби. Це найбільш дешевий варіант, але є вимоги по мінімальній глибині.

Розглянемо геотермальний ТН з притопленим контуром (система «вода-вода»). Ґрунтові води є кращим джерелом енергії завдяки тому, що навіть в зимовий час температура цього ресурсу не опускається нижче від'ємної позначки та знаходиться в діапазоні від +5 до +15 °С. ТН, які отримують енергію від ґрунтових вод, мають найбільш високий ККД. Проходячи через нього, вода віддає свою теплоту (Arsenev & Hrechanenko, 2002).

Принципова схема парокомпресійного теплового насоса «ґрунт-вода» наведена на рис. 2.

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 підприємств агропромислового комплексу. 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 °С. Якщо вдарили сильні морози, і температура нижче цього показника, за справу в загальному випадку береться додатковий теплогенератор, а для ТН Heloitem, які мають робочий діапазон температур від -25 до +45 °С додатковий теплогенератор не потрібний (Bosyi et al., 2022). 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 можна використовувати в офісних будівлях, торгових центрах, промислових і складських приміщеннях, а також на підприємствах агропромислового комплексу (Bosyi et al., 2022).

Далі розглянемо ТН, які використовують вторинну

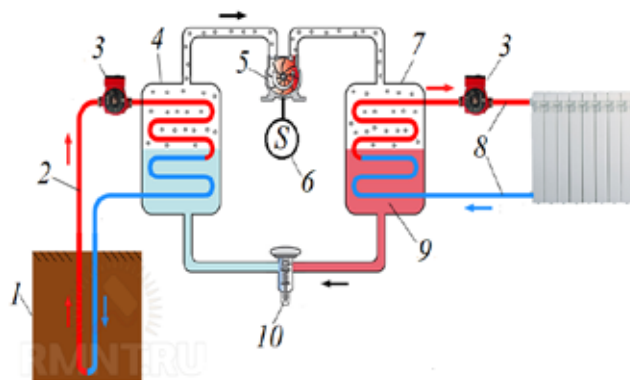


Рис. 2. Принципова схема ТН «ґрунт-вода»  
1 – ґрунт; 2 – розсіп; 3 – насос; 4 – випарник;  
5 – компресор; 6 – електродвигун; 7 – конденсатор;  
8 – система опалення; 9 – холодоагент R290;  
10 – дросель

теплоту (наприклад, теплоту трубопроводу центрального опалення, вентиляційні викиди тощо). Подібний варіант є найбільш доцільним для промислових об'єктів, де є джерела скидної теплоти, які вимагають утилізації. 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.

Загальні переваги, недоліки і особливості експлуатації ТН. Основною перевагою ТН є можливість перемикання з режиму опалення взимку на режим кондиціонування влітку: замість радіаторів до зовнішнього колектору підключаються фанкойли або система «холодні стелі» (Moroziuk, 2006; Tkachenko & Ostapenko, 2009; Bosyi et al., 2022).

ТН надійний, його роботою керує автоматика. ТН компактний (його модуль за розмірами не перевищує звичайний холодильник) і практично безшумний. До недоліків геотермальних ТН, які використовуються для опалення, слід віднести велику вартість монтажу зовнішніх підземних або підводних теплообмінних контурів. Період окупності ТН становить 4–6 років, при терміні служби 15–20 років до капітального ремонту. Реальні значення ефективності сучасних ТН становлять близько  $COP = 2,0$  при температурі джерела  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  і порядку  $COP = 5,0$  при температурі джерела  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  призводить до того, що 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  $+62\dots+65\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 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). 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. 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  $COP = 3$  (Bosyi et al., 2022; Bosyi et al., 2021).

Наявні ресурси теплової енергії довкілля багаторазово перевищують прогнозований рівень споживання

всіма секторами промисловості, особливо в агропромисловому виробництві 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 наступні: зовнішнє повітря  $+5\dots+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , витяжна вентиляція  $+15\dots+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , озерна вода  $0\dots+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , річкова вода  $0\dots+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , морська вода  $+3\dots+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ґрунт  $0\dots+12\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ґрунтові води  $>10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , геотермальна вода  $+20\dots+50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Tkachenko & Ostapenko, 2009).

Розглянемо встановлення ґрунтового ТН на прикладі агропромислового підприємства. На підприємстві знаходяться дві опалювальні будівлі адміністративно-побутового (опалювальний об'єм  $6473\text{ м}^3$ ) та господарського корпусів (опалювальний об'єм  $8287\text{ м}^3$ ), крім цього в адміністративно-побутовому корпусі також присутня система гарячого водопостачання. Необхідна теплова потужність ТН на  $1\text{ м}^3$  опалювального об'єму становить  $80\text{ Вт/м}^3$ , для гарячого водопостачання при витраті на 1 людину 50 літрів води при температурі  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $800\text{ Вт/людину}$ . Теплове навантаження адміністративно-побутового корпусу становитиме  $354\text{ кВт}$  (з них на гаряче водопостачання  $18\text{ кВт}$ ), господарсько корпусу –  $745\text{ кВт}$ . Тому для даного підприємства найбільш актуальним буде встановлення ґрунтового ТН.

Наступний приклад – це адміністративна будівля агропромислового підприємства. Опалюваний об'єм будівлі становитиме  $2635\text{ м}^3$ . Теплове навантаження системи опалення становитиме  $50,0\text{ кВт}$ , системи гарячого водопостачання –  $5\text{ кВт}$ , сумарне  $55\text{ кВт}$ . Враховуючи географічне розташування агропромислової будівлі, особливості ландшафту, правила пожежної безпеки та ін. для покриття теплового навантаження даної будівлі найбільше підходить ТН Heliotherm Solid Split (повітря-вода) потужністю  $55\text{ кВт}$  (Sirko et al., 2020).

**Результати досліджень.** 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 (Tkachenko & Ostapenko, 2009; Arsenev et al., 2002; Bosyi et al., 2022).

Для розрахунку  $COP$  використовується наступний вираз

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

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

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

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  $E$ :

$$Q = 1000 \cdot 4,19 \cdot 40 = 167600 \text{ кДж} = 46,55 \text{ кВт} \cdot \text{год}; \quad (4)$$

$$E = 0,380 \cdot 122 \cdot 0,27 = 12,51 \text{ кВт} \cdot \text{год}. \quad (5)$$

Коефіцієнт трансформації COP ТН розраховуємо за рівнянням (1)

$$\text{COP} = 46,55/12,51 = 3,72. \quad (6)$$

Тобто, при температурі ґрунту 10 °С на кожний кіловат електричної енергії ми отримуємо 3,72 кВт теплової енергії.

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 кВт теплоти. Такий результату полягає в тому, що обладнання ТН не виробляє теплоту, а переносить її (Bosyi et al., 2022; Bosyi et al., 2021).

Проведемо дослідження термодинамічної ефективності ТН при різних значеннях температури зовнішнього джерела теплоти – ґрунту табл. 1.

Аналіз енергоефективності ПКТН «ґрунт-вода», провадився для робочого тіла холодоагента R290. Для R290 температура випаровування становить  $t_g = 2...5$  °С, а конденсації –  $t_k = 67$  °С. Вибираємо низькопотенційне джерело теплоти – ґрунт, на вході у випарник має температуру  $t'_{нт} = 8...12$  °С, а на виході з нього  $t''_{нт} = 4...8$  °С. Температура мережевої води (теплоносія) на вході в конденсатор становить  $t'_{мв} = 35$  °С, а на виході з нього –  $t''_{мв} = 55$  °С.

**Обговорення.** З проведених вище термодинамічних розрахунків і наведених даних в табл.1. видно, що показники ефективності роботи циклу теплового насоса «ґрунт-вода», коефіцієнт перетворення COP і ексергетичний ККД суттєво залежить від середньотермодинамічних температур входу і виходу теплоти, а також довкілля. Проведений термодинамічний аналіз впливу температур на ефективність теплового насоса «ґрунт-вода» дозволяє прогнозувати оптимальні температурні режими його роботи.

**Висновки.** Використання ТН для теплопостачання підприємств агропромислового комплексу передбачає лише оплату за електроенергію на роботу та технічне обслуговування установки при порівнянні з витратами на центральне опалення та роботу газових або електричних котлів аналогічної потужності, яка в декілька разів менша. Впровадження ТН є перспективним напрямком використання альтернативних джерел енергії для забезпечення потреб систем опалення, вентиляції та гарячого водопостачання підприємств агропромислового комплексу, але даний процес суттєво залежить від місцезнаходження об'єкта та наявності доступу до певного оптимального для нього джерела низькопотенціальної теплової енергії. 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). Найефективнішим джерелом низькопотенціальної теплової енергії є теплота ґрунту, оскільки значення температури знаходиться в межах +8...+12 °С протягом року, коефіцієнт перетворення ТН при цьому становить 3,67 а ексергетичний коефіцієнт 43 %. Тому, найбільшим потенціалом з природних низькотемпературних джерел теплоти є теплота ґрунту.

Таблиця 1

Термодинамічний розрахунок ТН «ґрунт-вода»

Параметр	Розмірність	Розрахункові значення
Температура випаровування R290, $T_B$	К	275
Ентальпія R290 після випарника, $h_1$	кДж/кг	540
Тиск R290 у випарник, $p_B$	МПа	0,48
Температура конденсації R290, $T_K$	К	340
Ентальпія R290 після конденсатора, $h_3$	кДж/кг	220
Тиск конденсації R290, $P_K$	МПа	2,75
Ентальпія R290 на вході в компресор, $h_1$	кДж/кг	540
Ентальпія R290 після компресора, $h_2$	кДж/кг	660
Ентальпія R290 перед випарником, $h_4$	кДж/кг	220
Питоме теплове навантаження випарника, $q_B$	кДж/кг	320
Питоме теплове навантаження конденсатора, $q_K$	кДж/кг	440
Робота стиснення в компресорі, $l_{ст}$	кДж/кг	120
Перевірка теплового балансу ТН, $q_{тб.тн}$	–	440
Коефіцієнт перетворення теплоти, COP	–	3,67
Ексергетичний ККД ТН, $\eta_{ек}$	–	0,43

### Бібліографічні посилання:

1. Pro vnesennia zmin do Zakonu Ukrainy "Pro teplopostachannia" shchodo stymulivannia vyrobnytstva teplovoi enerhii z alternatyvnykh dzherel enerhii": Zakon Ukrainy vid 21.03.2017. №1959-VIII". [On Amendments to the Law of Ukraine "On Heat Supply" Regarding the Stimulation of the Production of Thermal Energy from Alternative Energy Sources": Law of Ukraine dated March 21.03.2017. No. 1959-VIII]. *Information of the Verkhovna Rada (VVR)*. 2017. No. 17. Art. 207 (in Ukrainian).
2. Maliarenko, V. A., & Lysak L. V. (2004). Enerhetyka, dokillia, enerhozberezhennia [Energy, environment, energy saving]. H: Rubicon. 368 p. (in Ukrainian).
3. Bezrodnyi, M. K., Pukhovyi, I. I., & Kutra, D. S. (2013). Teplovi nasosy ta yikh vykorystannia [Heat pumps and their use]. Tutorial. Kyiv: NTUU "KPI" 312 p. (in Ukrainian).
4. Ostapenko, O. P. (2015). Kholodylna tekhnika ta tekhnolohiia. Teplovi nasosy [Refrigeration equipment and technology. Heat pumps]. Tutorial. Vinnytsia: VNTU. 123 p. (in Ukrainian).
5. Arseniev, V. M., & Meleichuk, S. S. (2018). Teplovi nasosy: osnovy teorii i rozrakhunku [Heat pumps: basics of theory and calculation]. Tutorial. Sumy: SDU. 364 p. (in Ukrainian).
6. Arsenev, V. M. (2009). Teplonasosnaya tekhnologiya yenergozberezhennya [Heat pump energy saving technology]. Sumy: Type of SDU. 251 p. (in Russian).
7. Bosyi, M. V., & Kuzyk, O. V. (2022). Teplovi nasosy dlia opalennia ta hariachoho vodopostachannia [Heat pumps for scorching and hot water supply]. Findings of modern engineering research and developments: Scientific monograph. Riga, Latvia: «Baltija Publishing». P. 24-40 (in Ukrainian).
8. URL:<http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/book/217>
9. Pisarev, V. Ie. (2002). Teplovi nasosy ta kholodylni ustanovky [Heat pumps and refrigeration units]. Tutorial. K: KNUBA. 124 p. (in Ukrainian).
10. Sniezhkin, Yu. F., Chalaiev, D. M., Shavrin, V. S., & Dabizha, N. O. (2008). Teplovi nasosy v systemakh teplokhodopostachannia [Heat pumps in heating and cooling systems]. Under. ed. Acad. NAS of Ukraine A.A. Dolinskyi; National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Technology thermophysics. To: 104 p. (in Ukrainian).
11. Bezrodnyi, M. K., & Prytula, N. O. (2012). Enerhetychna efektyvnist teplonasosnykh skhem teplopostachannia [Energy efficiency of heat pump schemes of heat supply]. monograph. K: NTUU "KPI". 208 p. (in Ukrainian).
12. Shevel, V. Y. (2004). Rabota kompressorov seriinogo ispolneniia na smeci propan–butan v teplonasosnom rezhime raboti [Operation of series compressors for propane-butane oil in the heat pump mode]. Kompressornaia tekhnika y pnevmatyka v KhKhl veke: KhIII Mezhdunarodnaia nauchno-tekhnicheskaiia konferentsiia po kompressorostroenyiu. Sums: SumHU. P. 239–244 (in Russian).
13. Khmelniuk, M. H., & Martyniuk, M. O. (2008). Povishenie effektivnosti ustanovki nyzkotemperaturnoi kondensatsiit prirodnoho gaza [Increasing the efficiency of a low-temperature natural gas condensation installation]. Odessa: ODAH. Technical gases. № 4. P. 30–35 (in Russian).
14. Bosyi, M. V., & Kuzyk, O. V. (2020). Efektyvnist tsykladu teplovoho nasosa dlia teplopostachannia [Efficiency of the heat pump cycle for heat supply]. *Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences*. Vol. 3(34). P. 136–142. (in Ukrainian). URL: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/10447>
15. Bosyi, M. V. (2022). Termodynamichna enerhoefektyvnist heotermalnoho teplovoho nasosa na hruntovykh vodakh [Thermodynamic energy efficiency of a geothermal heat pump on groundwater]. *Moderní aspekty vědy: XX. Díl mezinárodní kolektivní monografie / Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o. Česká republika: Publishing Group. "Vědecká perspektiva"* P. 556–568 (in Ukrainian). URL: [http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/36\\_1.html](http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/36_1.html)
16. Bosyi, M. V. (2022). Teplovi nasosy – enerhoefektyvne vidnovliuvalne ekolohichno chyste dzherelo teploty [Thermal pumps are energy efficient, environmentally friendly, and provide warmth]. *Moderní aspekty vědy: XXI Díl mezinárodní kolektivní monografie Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o. Česká republika: Publishing Group "Vědecká perspektiva"* P. 357–380. (in Ukrainian). URL:<http://perspectives.pp.ua/public/site/mono/monography-21.pdf>
17. Moroziuk, T. V. (2006). Teoriya kholodilnikh mashin i teplovikh nasosov [Theory of refrigeration machines and heat pumps]. Odessa: Studio "Negotiant". 712 p. (in Russian).
18. Tkachenko, S. I., & Ostapenko, O. P. (2009). Parokompresiini teplonasosni ustanovky v systemakh teplopostachannia [Steam compression heat pump installations in heat supply systems]. Monograph. Vinnytsia: VNTU. 176 p. (in Ukrainian).
19. Arsenev, V. M., & Hrechanenko, V. A. (2002). Eksergeticheskaya otsenka effektivnosti teplonasosnoi tekhnologii energosberezhenii [Exergetic evaluation of the efficiency of heat pump technology energy-saving]. *Bulletin of Sumy State University*. № 9 (42). P. 81–85. (in Russian).
20. Bosyi, M. V., Kropivnyi, V. M., Kuzyk, O. V., Kropivna, A. V., & Molokost, L. A. (2022). Termodynamichna enerhoefektyvnist parokompresiinoho teplovoho nasosa na hruntovykh vodakh [Thermodynamic energy efficiency of a vapor compression heat pump on groundwater]. *Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences. Kropyvnytskyi*. Vol. 5(36). P. 47–54. (in Ukrainian).
21. URL: [http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/36\\_1.html](http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/36_1.html)
22. Bosyi, M. V., Kropivnyi, V. M., & Kuzyk, O. V. (2022). Termodynamichne doslidzhennia tsykladu teplovoho nasosa «hrunt-voda» dlia systemy opalennia prymishchennia [Thermodynamic study of the soil-water heat pump cycle for the room heating system]. *Scientific journal Visnyk of the Kremenchuk National University named after M. Ostrogradskiyi. Kremenchuk*: No. 1(132). P. 165–172. (in Ukrainian).
23. URL: <http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/pravila.php>

24. Sirko, Z. S., Korenda, V. A., Vyshniakov, I. Iu., Protasov, O. S., & Okhrimenko S. M., Tsiren N. L. (2020). Vykorystannia teplovykh nasosiv dlia opalennia ta hariachoho vodopostachannia budivel pidpriemstv na prykladi ustanovok Helioterm [The use of heat pumps for heating and hot water supply of enterprise buildings on the example of Helioterm installations]. *Scientific reports of NUBiP of Ukraine. Technology and energy of agricultural industry*. № 5 (87) (in Ukrainian).

25. Bosyi, M. V. (2022). Enerhetychna efektyvnist povitrianoho teplovoho nasosa na ekolohichno chystomu robochomu tili propani [The energy efficiency of an air heat pump based on an ecologically clean working medium of propane]. *Scientific journal "Scientific Notes of the Tavra National University named after V.I. Vernadsky". Series: Technical sciences*. Kyiv: Volume 33 (72), No. 4. P. 144–148. (in Ukrainian). DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/22>. URL: <https://tech.vernadskyjournals.in.ua/33-72-4>

26. Bosyi, M. V., Lysenko, A. Ia., Manuilovych, V. V., & Panishko, O. V. (2021). Efektyvnist tsykladu heotermalnoho teplovoho nasosa [Efficiency of the geothermal heat pump cycle]. The 5th International scientific and practical conference «Topical issues of modern science, society and education» (November 28–30) SPC «Sci-conf.com.ua». Kharkiv. Ukraine. P. 418–422. (in Ukrainian). URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/TOPICAL-ISSUES-OF-MODERN-SCIENCE-SOCIETY-AND-EDUCATION-28-30.11.21.pdf>

27. Bosyi, M. V., Lysenko, A. Ia., Manuilovych, V. V., & Barkar, M. M. (2021). Termodynamichna enerhoefektyvnist heotermalnoho teplovoho nasosa «voda-voda» [Thermodynamic energy efficiency of the water-to-water geothermal heat pump]. The 3rd International scientific and practical conference "Modern science: innovations and prospects" (December 5-7) SSPG Publish, Stockholm, Sweden. ISBN 978-91-87224-02-7. 1036 p. (in Ukrainian). URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/MODERN-SCIENCE-INNOVATIONS-AND-PROSPECTS-5-7.12.21.pdf>

28. Bosyi, M. V., Lysenko, A. Ya., Manuilovych, A. V., Panishko, O. V., & Barkar, M. M. (2022). Heotermalnyi teplovyi nasos «hrunt-voda» [Ground-water geothermal heat pump]. The 2nd International scientific and practical conference "Modern research in world science" (May 15–17) SPC "Sci-conf.com.ua". Lviv. Ukraine. ISBN 978-966-8219-86-3. P. 406–413. (in Ukrainian). URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/05/MODERN-RESEARCH-IN-WORLD-SCIENCE-15-17.05.22.pdf>

**Bosyi M. V.**, Lecturer, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

#### **Heat pumps for heat supply and hot supply of agricultural enterprises**

*Currently, the changes taking place in the agro-industrial complex of Ukraine require the development and creation of the latest heat pump technologies for heat and hot water supply of agro-industrial enterprises. The article considers the problem of using heat pumps (TN) operating on alternative energy sources for heat and hot water supply of agro-industrial enterprises. In its work, TN uses low-potential heat, air, water bodies, and the subsoil of the earth. The purpose of the work is to substantiate and investigate the expediency of using TN at agro-industrial production enterprises. An analysis of the characteristics of TNs operating with various sources of low-potential heat was performed. The factors affecting the energy efficiency of TN are determined, the peculiarities of the operation of soil, water and air TN for agro-industrial enterprises of Ukraine are evaluated. The influence of the duration of air temperatures of different values on the thermal productivity of TN was analyzed. In order to increase the efficiency of the heat pump system, a scheme for selecting low-potential heat using soil TN is proposed. On the basis of the conducted research, it was established that the advantage of air as a heat carrier is that air heaters can work almost everywhere and do not require the arrangement of a low-temperature circuit. A promising way to increase the efficiency of the TN during the annual cycle of its operation is the combined use of low-potential heat of the soil and air. A heat pump system with two sources of energy ensures high thermal productivity of the heating system throughout the year and has a higher energy efficiency index compared to traditional solutions. TNs have a significant advantage over other thermal power plants. They consume energy from renewable sources, reduce electricity costs by more than half. It is a fully automated device. The use of TN for the disposal of low-potential heat flows is economically beneficial. The analysis of the efficiency of heat supply systems shows that in modern economic conditions, the trend of heat supply systems can develop in the following directions: the use of steam-compression heating systems, the use of secondary energy resources of industrial enterprises of the agro-industrial complex, and the improvement of the thermal characteristics of buildings. Modernization with the application of these measures can significantly improve the economic and technical characteristics of heat supply equipment for buildings of agro-industrial production.*

**Key words:** heat pump, agro-industrial enterprises, thermodynamic cycle, thermal energy, low-potential heat source, heat supply systems, transformation coefficient.