

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТВАРИННИЦЬКИХ КОМПЛЕКСІВ ІЗ ЗАЛУЧЕННЯМ ТЕПЛОНАСОСНИХ УСТАНОВОК**

**Дзюбан Ю.І.<sup>1</sup>**, аспірант, **Маляренко О.Є.<sup>2</sup>**, канд., техн. наук, ст. наук. співр., пр. наук. співр., **Горський В.В.<sup>3</sup>**, д-р філософії (PhD), наук. співр, **Євтухова Т.О.<sup>4</sup>**, канд. техн. наук, доц., ст. наук. співр.

<sup>1</sup>Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, Київ, Україна, 03150  
email: 1809ura@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-4585-7835>

<sup>2</sup>Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, Київ, Україна, 03150  
email: malyarenlana@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5882-916X>

<sup>3</sup>Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, Київ, Україна, 03150  
email: witalij.3d@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9128-955>

<sup>4</sup>Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, Київ, Україна, 03150  
email: tatyana.evtyukhova@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-9687-4631>

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2025.8>

*У статті розглянуто проблему підвищення енергоефективності теплозабезпечення тваринницьких комплексів шляхом впровадження теплонасосних установок типу «повітря-вода» на заміщення електричного бойлера. Встановлено, що застосування теплонасосної технології дозволяє зменшити річні витрати електроенергії майже у 5 разів, забезпечуючи значну економію коштів. Розрахунки показали, що термін окупності проєкту становить від 2-х до 5-ти років, що підтверджує його економічну доцільність. Результати дослідження свідчать про доцільність масштабного впровадження теплонасосних систем у сільськогосподарські підприємства для підвищення конкурентоспроможності галузі та сталого розвитку агропромислового сектору.*

*The article considers the problem of increasing the energy efficiency of heat supply of livestock complexes by introducing heat pump units of the "air-to-water" type to replace an electric boiler. It was established that the use of heat pump technology allows reducing annual electricity costs by almost 5 times, providing significant cost savings. Calculations showed that the payback period of the project is from 2 to 5 years, which confirms its economic feasibility. The results of the study indicate the feasibility of large-scale implementation of heat pump systems in agricultural enterprises to increase the competitiveness of the industry and sustainable development of the agro-industrial sector.*

Бібл. 37, табл. 8.

**Ключові слова:** енергозабезпечення, тепловий насос, тваринництво, гаряча вода, енергоефективність.

**Вступ та аналіз останніх публікацій**

Сучасний розвиток агропромислового комплексу значною мірою залежить від ефективності енергозабезпечення тваринницьких комплексів. Високі витрати на енергоносії, залежність від викопних видів палива та негативний вплив на довкілля вимагають розробки нових підходів до енергозабезпечення, зокрема впровадження відновлюваних джерел енергії. Енергоефективність тваринницьких комплексів є критично важливим напрямом для зменшення витрат на виробництво продукції, підвищення конкурентоспроможності підприємств та зниження викидів парникових газів. Розвиток фермерського господарства та природна конкуренція як в середині країни, так і за її межами спонукають власників впроваджувати передові технології (зокрема, біогазові установки, біопаливні котли, сонячні панелі, теплонасосні установки різного типу), що забезпечують економію викопного палива і знижують забрудненість

довкілля [1–6]. Так, у роботі [1] Стадніком М.І. та його колегами запропоновано метод відстеження графіка електричного навантаження тваринницької ферми, що заснований на визначенні необхідної потужності генерування електроенергії в залежності від фактичного графіка електронавантаження, що дозволяє здійснювати керування біогазовими енергоустановками на базі двигунів внутрішнього згорання. У роботі [2] Стадніком М.І. і співавторами визначено можливість повного покриття потреби в електроенергії тваринницької ферми за умови спільного використання біогазової установки та сонячних панелей. У роботі [3] Гайдукевич С.В. та співавтор розглянули проблему створення оптимального мікроклімату в приміщеннях для утримання молодняку сільськогосподарських тварин та з метою підвищення енергоефективності системи підтримання нормованих параметрів мікроклімату запропонували опалювальну систему на базі теплово-

го насосу «повітря-вода» для опалення приміщень, дуже вразливих до змін мікроклімату. У роботі [4] Довбненко О.Ф. розглянув скорочення енерговитрат в системах забезпечення мікроклімату тваринницьких приміщень шляхом застосування теплоутилізаторів на вентиляційних викидах. Мельничуком О.В. [5] досліджено світовий та вітчизняний досвід застосування комбінованих геліо-вітрових енергетичних установок у системах теплопостачання підприємств агропромислового комплексу, що дозволяє підвищити надійність енергопостачання споживача. У публікації [6] Болтянською Н.І. й співавтором розглянуто потребу у створенні та використанні автономного енергозабезпечення тваринницьких підприємств, зокрема потребу у комплексному енергопостачанні (електричної і теплової енергії), використання біомаси в децентралізованих системах енергозабезпечення, можливість переобладнання котелень в міні-ТЕЦ на базі когенераційних установок. Міні-ТЕЦ з когенераційними установками (газопоршневіми, газотурбінними, газодизельними) широко використовуються у системах енергопостачання тваринницьких і птахівничих комплексів, теплиць, комбикормових підприємств, цукрових заводів, фермерських господарств. В іншій публікації Болтянської Н.І. [7] розглянуто структуру енергоємності одиниці продукції рослинництва і тваринництва в Україні і визначено напрями енергозбереження в сільському господарстві. У колективній монографії Таврійського державного агротехнологічного університету [8] представлено комплекс заходів із енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності у тваринництві. Оцінкою потенціалів енергозбереження у сільськогосподарському виробництві в ІЗЕ НАН України багато років займався Симборський А.І. Зокрема, в [9] ним досліджено вплив основних техніко-економічних показників розвитку сільськогосподарського виробництва на обсяги викидів парникових газів (структура використаного органічного палива, частка електрифікації технологічних процесів) та відмічено необхідність впровадження принципово нових напрямків розвитку, зорієнтованих на енерго- та ресурсозберігаючі технології, використання нетрадиційних та поновлювальних джерел енергії.

У сучасних умовах переходу європейських країн до вуглецевонейтральної енергетики однією з ключових технологій, що сприятимуть цьому переходу, є теплонасосні технології [10–15]. В Україні дослідженнями застосування теплонасосних технологій (ТН) у промисловості та комунальній енергетиці займаються такі провідні українські учені як Снежкін Ю.Ф., Басок Б.І., Дубовський С.В., Чалаєв Д.М. [10, 16–

19] в ІТТФ НАН України, Безродний М.К. [20–24] у НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Нікітін Є.Є. в Інституті газу НАН України [10, 25], Дерій В.О., Соколовська І.С., Тесленко О.І. [22, 26, 27] в Інституті загальної енергетики НАН України. У цих роботах відмічено, що ці ТН технології активно розвиваються у Європі (країнах північної Європи, Німеччині, Австрії, Польщі), Китаї та Північній Америці завдяки привабливій інвестиційній політиці та впровадженню відповідних організаційно-правових заходів, особливо після 2021 р. [28]. Державна підтримка у вигляді грантів, позик під низькі відсотки, податкові знижки, програми стимулювання та субсидювання, ін. суттєво впливає на вибір теплонасосної технології для потреб опалення та гарячого водопостачання [29, 30].

Теплонасосні технології є перспективними і ефективними джерелами перетворення низькопотенційної теплоти навколишнього середовища в теплоту більш високого рівня і для сільськогосподарських підприємств: створення мікроклімату в приміщеннях для утримання молодняку сільськогосподарських тварин [3], зокрема використання для цього теплоти вентиляційних викидів для забезпечення мікроклімату тваринницьких та птахівничих приміщень [4]. У публікації [31] розглянуто комбінацію парокompресійної теплонасосної установки на екологічно безпечних холодоагентах з фотоелектричними сонячними панелями. В роботі [32] проаналізовано заміщення традиційного холодоагенту на альтернативні, що мають менший вплив на навколишнє середовище. За висновком цих авторів, перспективними холодоагентами є пропан та суміші вуглеводнів. Цієї ж думки дотримується і Босий М.В. у своїх публікаціях [33, 34].

Використання теплових насосів повітря-вода на пропані для приготування гарячої води для технологічних потреб тваринницьких комплексів є перспективним напрямком, який дозволяє досягти значної економії енергії та зменшення негативного впливу на довкілля.

**Метою дослідження** є обґрунтування ефективності використання теплових насосів «повітря-вода» на пропані для приготування гарячої води на технологічні потреби тваринницьких комплексів в Україні.

#### **Матеріал і результати досліджень**

Аналіз існуючих систем гарячого водопостачання тваринницьких комплексів є важливим етапом для оптимізації енергоспоживання та зменшення витрат на ресурси. Ефективне гаряче водопостачання є критично важливим для забезпечення належних умов утримання тварин, підтримки гігієни та технологічних процесів. До традиційних систем гарячого водопостачання відносяться наступні: водонагрівачі, що працюють

на викопному паливі, що використовують природний газ, вугілля або мазут для нагріву води та які можуть бути досить ефективними, але мають значні екологічні недоліки через викиди парникових газів та залежність від викопних ресурсів; електричні водонагрівачі (бойлери), що використовуються для локального або додаткового підігріву води, є зручні у використанні, але вартість електроенергії робить їх менш економічно вигідними для великих тваринницьких комплексів.

Як було відмічено у наукових публікаціях [3, 4, 10, 11, 16, 18], теплонасосні установки є перспективними електричними теплогенераторами, що виконують функції забезпечення гарячої водою відповідно до технології виробництва молока та молочних продуктів [35], підтримання мікроклімату приміщень [3, 4] при набагато меншій витраті електричної енергії, що виробляється з різних джерел, зокрема при спалюванні органічного палива.

Для дослідження ефективності використання теплових насосів (ТН) порівняно із традиційними електричними водонагрівачами було впроваджено ТН типу «повітря-вода» на тваринницькому комплексі, що станом на вересень 2024 р. вирощувало 480 голів корів молочних порід (с. Федунка, Полтавської області). Для дослідження обрано одне з приміщень комплексу, яке вміщує 194 корови. Гаряча вода у даному комплексі готується з температурою до 65°C для знешкодження

шкідливих бактерій у молокопроводах. До реалізації проекту гаряча вода на тваринницькому комплексі готувалась за допомогою електричного бойлера об'ємом 400 л електричною потужністю 24 кВт фірми «Титан» [36]. Тваринницький комплекс обладнано окремими лічильниками споживання електроенергії та води для оцінки витрат електроенергії на технологічні потреби та для визначення собівартості молочної продукції. Протягом 6 днів проводились дослідження на молочній фермі, де впроваджено ТН на заміщення бойлера, що дозволило оцінити ефективність цього заходу. Фактичне споживання електроенергії бойлером протягом 6 днів коливалось в межах 186-201 кВт·год/добу, середньодобове споживання склало 193.33 кВт·год/добу. А споживання гарячої води протягом цього ж періоду коливалось в межах 2876-3212 л/добу, середньодобове споживання склало 3018 л/добу. Дані наведені у табл. 1.

В якості нового джерела теплопостачання, враховуючи вартість та технічні характеристики, було обрано тепловий насос повітря-вода фірми Najster, із тепловою потужністю 19 кВт [37]. У встановленому тепловому насосі в якості холодоагенту використано пропан R 290, що дозволяє отримати теплоносії температурою до 75°C (максимально). Після завершення монтажних та пусконаладжувальних робіт було проведено заміри споживання електричної енергії для роботи теплового насоса повітря-вода протягом 6 днів у період з 23 по 28 вересня 2024 р., результати наведено в табл. 2.

Табл. 1. Параметри роботи електричного бойлера за досліджуваний період

Table 1. Operating Parameters of the Electric Water Heater During the Study Period

Дата	Споживання електроенергії, кВт·год/добу	Продуктивність по гарячій воді, л/добу
Пн / 02.09.2024 р.	192	2986
Вт / 03.09.2024 р.	194	3012
Ср / 04.09.2024 р.	189	3212
Чт / 05.09.2024 р.	198	2876
Пт / 06.09.2024 р.	201	3106
Сб / 07.09.2024 р.	186	2916

Табл. 2. Характеристика роботи теплового насосу при приготуванні гарячої води у період, що досліджувався

Table 2. Performance Characteristics of the Heat Pump for Domestic Hot Water Production During the Study Period

Дата	Середньодобова температура, °C	Фактичний добовий COP	Споживання електроенергії, кВт·год/добу	Продуктивність по гарячій воді, л/добу
Ср / 23.09.2024 р.	19,9	4,9	38,4	2939
Чт / 24.09.2024 р.	19,5	4,8	40,4	3029
Пт / 25.09.2024 р.	20,5	5,1	37,0	2948
Сб / 26.09.2024 р.	18,5	4,7	40,4	2966
Нд / 27.09.2024 р.	20	5,0	40,2	3140
Пн / 28.09.2024 р.	20,5	5,1	36,7	2924

Середньодобове споживання електроенергії ТН склало 38,85 кВт·год/добу. Враховуючи середньодобове споживання електричним бойлером 193,33 кВт·год/добу, можемо стверджувати, що встановлення теплового насоса повітря-вода дозволило зменшити споживання електричної енергії у зазначений період практично у 5 разів, або близько 150 кВт·год на добу, при такій же продуктивності по гарячій воді. Проведений аналіз споживання електричної енергії електричним бойлером у поєднанні з обсягами виробленої гарячої води дозволив встановити фактичні показники енерговитрат у досліджуваній період. Однак отримані дані, попри свою інформативність, не дають цілісного уявлення про енергоефективність системи теплозабезпечення в динаміці, з урахуванням зовнішніх впливів, зокрема зміни температури зовнішнього повітря. У зв'язку з цим доцільним є розрахунок річного коефіцієнта продуктивності системи теплозабезпечення (COP — Coefficient of Performance), який дозволяє оцінити ефективність перетворення електричної енергії в корисну теплову енергію протягом року, що дасть змогу порівняти термін окупності даного проекту. Визначення річного COP є особливо актуальним при переході від традиційних електричних бойлерів до теплонасосних установок, де ефективність роботи суттєво залежить від температури навколишнього середовища. Для порівняння потенційної ефективності альтернативного варіанту теплозабезпечення, у даному дослідженні також буде враховано екстремальні температурні значення (табл. 3), зафіксовані протягом всього періоду роботи (починаючи від жовтня 2024 р. до поточного часу (квітень 2025 р.) за даними постійного моніторингу показників).

Наведені значення у табл. 3, зафіксовані при пікових температурах зовнішнього повітря, дозволяють оцінити граничну ефективність роботи теплонасосної установки в умовах найбільшого та найменшого навантаження. Проте, такі окремі значення, хоча й інформативні, не відображають повної сезонної динаміки енергоспоживання та ефективності системи теплозабезпечення впродовж усього року.

Таблиця 3. Пікові зафіксовані точки зовнішньої температури повітря

Table 3. Recorded Peak Points of Outdoor Air Temperature

Температура зовнішнього повітря, °C	COP	Споживання електричної енергії, кВт·год	Температура теплоносія на виході, °C
min +1,1	3,2	5,3	61
mean +7*	3,8	4,4	59
max +24,1	5,5	2,7	57

З огляду на це, для більш точної оцінки економічної доцільності впровадження високотемпературних теплових насосів у тваринницькому комплексі, доцільно виконати розрахунок COP у місячному розрізі. Такий підхід дозволяє врахувати:

- вплив середньомісячних температур зовнішнього повітря на продуктивність теплового насосу;
- коливання споживаної електричної енергії;
- економічний ефект від використання теплового насоса замість традиційного електричного бойлера.

На основі щомісячних розрахунків COP можна також визначити середньорічний коефіцієнт продуктивності, який є узагальнюючим показником енергоефективності системи. Такий комплексний підхід дозволяє надати як технічне, так і економічне обґрунтування ефективності застосування теплонасосних установок у системах теплозабезпечення тваринницьких об'єктів. Для об'єктивного порівняння ефективності роботи традиційного електричного бойлера та теплонасосної установки (ТНУ) упродовж року, здійснено розрахунок коефіцієнта продуктивності (COP) у помісячному розрізі. Це дозволяє врахувати вплив зовнішніх температурних умов, характер споживання теплової енергії та сезонної варіативності навантаження на ефективність теплового насоса. Для теплонасосних установок значення COP<sub>i</sub> залежить від температури зовнішнього повітря, тому для кожного місяця використовуються середньомісячні температури. На їхній основі визначається розрахункове значення COP з використанням паспортних даних виробника обладнання, емпіричних залежностей або довідкових графіків. Для забезпечення порівняльності результатів, помісячні значення теплової енергії  $Q_{th,i}$  беруться на основі фактичного або нормативного теплоспоживання тваринницького комплексу. Розрахунок помісячного COP виконується за формулою:

$$COP_i = \frac{Q_{th,i}}{W_{el,i}} \quad (1)$$

де COP<sub>i</sub> – коефіцієнт продуктивності у i-му місяці;

$Q_{th,i}$  – вироблена теплова енергія у  $i$ -му місяці, кВт•год, яка визначається за рівнянням:

$$Q_{th,i} = C_v G (T_{вих} - T_{вх}), \quad (2)$$

де  $C_v$  – об’ємна теплоємність води, Дж/м<sup>3</sup>\*К;

$G$  – витрата води згідно з даними вихрового витратоміра, встановленого в контурі теплового насосу, м<sup>3</sup>;

$T_{вх}$  – температура повітря на вході у теплообмінник, приймається за температурою зовнішнього повітря згідно з даними табл. 3, К;

$T_{вих}$  – температура води на виході з теплообмінника, приймається за даними табл. 3 - температури теплоносія на виході, К;

$W_{el,i}$  – сумарна спожита електрична енергія на електропривод вентилятора, компресора, циркуляційного насосу у  $i$ -му місяці, кВт•год; споживання електричної енергії вираховується за допомогою вбудованого цифрового лічильника.

Узагальнений річний COP визначається як середньозважене значення:

$$COP_{річ} = \frac{\sum_{i=1}^{12} Q_{th,i}}{\sum_{i=1}^{12} W_{el,i}} \quad (3)$$

Цей показник є ключовим для економічного обґрунтування доцільності впровадження ТНУ у

досліджуваному об’єкті. У табл. 4 наведено помісячну ефективність роботи теплового насосу у порівнянні із електричним бойлером.

Згідно з наведеними у табл. 4 даними, тепловий насос демонструє суттєво вищу ефективність протягом року, що безпосередньо залежить від температури зовнішнього повітря. Найнижчі значення COP спостерігаються у зимовий період — зокрема, у січні (2,76) та грудні (3,11), коли середньомісячні температури перебувають у від’ємному діапазоні. Відповідно, у ці місяці електроспоживання ТН є найвищим — понад 2 000 кВт•год/місяць. Незважаючи на це, навіть у несприятливих умовах експлуатації, теплонасосна установка залишається більш енергоефективною, ніж електричний бойлер: економія електроенергії сягає 3815 кВт•год за місяць.

У весняно-літній період, коли температура зовнішнього повітря зростає, ефективність роботи теплового насоса суттєво підвищується. Максимальні значення COP зафіксовано влітку — у липні (5,59), серпні (5,42) та червні (5,27). При цьому споживання електроенергії системою знижується більш ніж удвічі у порівнянні з зимовими місяцями, попри незмінне теплове навантаження. Це дозволяє досягти найвищого рівня енергозбереження — до 4913 кВт•год економії електроенергії на місяць.

Таблиця 4. Помісячний розрахунок ефективності та електроспоживання теплового насосу та електричного бойлера  
Table 4. Monthly Calculation of Efficiency and Electricity Consumption of the Heat Pump and Electric Water Heater

Місяць	Середня температура, °С	Потреба в тепловій енергії, кВт•год	COP ТН	Споживання електроенергії ТН, кВт•год	Споживання електроенергії бойлером, кВт•год	Економія, кВт•год
Січень	-3,2	5983	2,76	2168	5983	3815
Лютий	1,4	5404	3,23	1673	5404	3731
Березень	4,2	5983	3,52	1700	5983	4283
Квітень	14,1	5790	4,51	1284	5790	4506
Травень	15,5	5983	4,65	1287	5983	4696
Червень	21,8	5790	5,27	1099	5790	4691
Липень	25	5983	5,59	1070	5983	4913
Серпень	23,3	5983	5,42	1104	5983	4879
Вересень	20,2	5790	5,12	1131	5790	4659
Жовтень	11,3	5983	4,23	1414	5983	4569
Листопад	2,4	5790	3,33	1739	5790	4051
Грудень	0,2	5983	3,11	1924	5983	4059
<b>Рік</b>	<b>11,35</b>	<b>70445</b>	<b>4,23</b>	<b>17592</b>	<b>70445</b>	<b>52853</b>

У міжсезоння (березень, жовтень, листопад) ефективність системи зберігається на задовільному рівні (COP 3,3–4,2), що також сприяє суттєвій економії електроенергії порівняно з електричним бойлером.

Загальна тенденція підтверджує, що використання теплового насоса для забезпечення технологічних потреб гарячого водопостачання є доцільним з точки зору енергетичної ефективності. Щомісячна економія варіюється від 3 815 до 4913 кВт•год, що в річному вимірі формує значний потенціал для зниження витрат на електроенергію, та може сягати рівня  $\Delta W = 52\ 853$  кВт•год/рік.

Враховуючи середньорічні показники теплового насоса повітря-вода із робочим агентом пропан [34], та ціну електричної енергії, за якою закуповує її дане підприємство  $w = 7,25$  грн/кВт•год, можемо стверджувати, що річний економічний ефект становитиме:

$$E\Phi = \Delta W * w = 52853 \text{ кВт}\cdot\text{год} *$$

$$* 7,25 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год} = 383\ 187,25 \text{ грн.}$$

Інвестиції у реалізацію проекту відповідно до даних, наданих підрядною організацією ТОВ «Сахара» (юридична особа ТОВ "САХАРА", код ЄДРПОУ 31138408) склали 660 475,60 грн. (табл. 5).

Проведемо розрахунок терміну окупності капітальний вкладень від заміни джерела приготування гарячого водопостачання, використовуючи формулу:

$$TO = I / E\Phi,$$

де TO – термін окупності, років;

I – інвестиції по реалізації проекту встановлення ТН, I = 660 473 грн;

EΦ – річний економічний ефект від впровадження ТНУ у порівнянні із електричним бойлером (враховано за економією від скорочення споживання електроенергії), EΦ = 383 187,25 грн.

Підставивши дані у формулу, отримуємо TO = 1 рік 8,5 місяців для конкретного тваринницького комплексу за вказаним тарифом на електрику. В результаті цього розрахунку видно, що інвестиції в заміну електричного бойлера на тепловий насос окупаються за менше ніж два роки.

Розглянемо різні варіанти терміну окупності. У розрахунок також додамо щорічні витрати на технічне обслуговування та амортизацію, які охоплюють сервісні огляди, заміну фільтрів, діагностику, частковий ремонт або дозаправку холодоагенту, а також умовний знос обладнання протягом гарантійного строку експлуатації. Рівень цих витрат залежить від обраного сценарію: в оптимістичному сценарії вони складають 10 тис. грн на рік, у реалістичному — 20 тис. грн, а в песимістичному — 30 тис. грн відповідно (табл. 6).

Проведено сценарний аналіз за трьома умовами: **Оптимістичний сценарій:** максимальні тарифи, низькі витрати, мінімальна вартість системи. **Реалістичний**

Таблиця 5. Вартість реалізації проекту по заміні джерела приготування гарячої води

Table 5. Project Implementation Cost for Replacing the Domestic Hot Water Generation Source

Найменування	Вартість, грн	% від загальної вартості
Тепловий насос Hajster Nebo mono 19 кВт, включачи монтажну раму	339810	51
Допоміжне обладнання, для забезпечення ефективної роботи теплового насоса	117807	18
Запірна та регулююча арматура, а також контрольно-вимірювальна	33976	5
Матеріали для обв'язки нової системи (кабельно-провідникова продукція а також трубопроводи та елементи)	46000	7
Вартість монтажу із врахуванням транспортних та відрядних витрат	122880	19
<b>Загалом система</b>	<b>660473</b>	<b>100</b>

Таблиця 6. Вихідні дані для аналізу

Table 6. Initial data for analysis

Сценарій	Обслуговування, грн/рік	Амортизація, грн/рік	Загальні витрати, грн/рік
Оптимістичний	6000	4000	<b>10000</b>
Реалістичний	10000	10000	<b>20000</b>
Песимістичний	15000	15000	<b>30000</b>

**сценарій:** середні значення. **Песимістичний сценарій:** мінімальні тарифи, високі витрати, максимальна вартість.

У табл. 7 наведено розрахунок щорічної економії коштів за рахунок зниження споживання електроенергії після впровадження теплонасосної установки, з урахуванням трьох можливих сценаріїв вартості електроенергії та витрат на технічне обслуговування системи. Валовий ефект визначено як добуток річної економії електроенергії на відповідний тариф. З цієї суми вираховуються щорічні витрати на обслуговування та амортизацію, щоб отримати чисту економію, яка є ключовим показником для подальшого визначення терміну окупності. Такий підхід дозволяє комплексно оцінити вплив коливань цін і експлуатаційних витрат на ефективність інвестицій у теплонасосне обладнання та забезпечити обґрунтоване прийняття рішень у процесі планування впровадження енергозберігаючих технологій.

У табл. 8 представлено розрахунок терміну окупності інвестицій у теплонасосну установку типу «повітря-вода» за трьома сценаріями. Для кожного з них враховано різні рівні вартості обладнання та монтажу, а також відповідну чисту економію, що визначається як річна економія електроенергії з урахуванням витрат на технічне обслуговування. Термін окупності обчислено як відношення повної вартості системи до чистої річної економії. Це дозволяє оцінити, за скільки років окупиться початкове капіталовкладення в залежності від умов ринку.

Результати розрахунків (табл. 8) свідчать, що теплонасосна установка типу «повітря-вода» має задовільну економічну ефективність у всіх розглянутих сценаріях. У разі сприятливих умов, за яких вартість системи є

Таблиця 7. Розрахунок економії з урахуванням тарифу та витрат

Table 7. Calculation of savings taking into account tariff and costs

Сценарій	Тариф, грн/кВт•год	Валовий ефект, грн/рік	Витрати на обслуговування та амортизацію, грн/рік	Чиста економія, грн/рік
Оптимістичний	5,00	264265	10000	254265
Реалістичний	4,20	221983	20000	201983
Песимістичний	3,50	184986	30000	154986

Таблиця 8. Розрахунок терміну окупності за сценаріями

Table 8. Calculation of payback period by scenarios

Сценарій	Вартість системи, грн	Чиста економія, грн/рік	Термін окупності, років
Оптимістичний	500000	254265	1,97
Реалістичний	650000	201983	3,22
Песимістичний	800000	154986	5,16

мінімальною, а тариф на електроенергію залишається високим, термін окупності становить менше двох років. У реалістичному сценарії, що відображає типові ринкові умови та помірні витрати на обслуговування, інвестиції повертаються протягом 3,2 року.

У песимістичному варіанті, коли вартість системи є максимальною, тарифи на електроенергію — нижчими, а експлуатаційні витрати — високими, термін окупності не перевищує 5,2 року. Це підтверджує, що теплонасосна технологія залишається економічно доцільною навіть за несприятливих зовнішніх факторів. Таким чином, незалежно від обраного сценарію, інвестиції у теплонасосну технологію демонструють привабливу економічну ефективність на фоні постійного зростання цін на енергоносії та актуальності декарбонізації енергоспоживання в агросекторі.

#### Висновки

У результаті проведеного експериментального дослідження встановлено, що впровадження теплових насосів типу «повітря-вода» на пропані для приготування гарячої води в умовах тваринницьких комплексів є ефективним як з технічної, так і з економічної та екологічної точок зору. Порівняно із електричним бойлером досягнуто зниження споживання електроенергії майже у 5 разів. Річна економія електроенергії становить понад 52000 кВт•год, що за актуальними тарифами забезпечує економічний ефект у понад 380 тис. грн на рік. Це дозволяє досягти терміну окупності менше двох років, що свідчить про високу інвестиційну привабливість технології навіть за умови значного стартового капіталовкладення. Більш високий тариф на електроенергію сприяє зниженню терміну окупності проекту. З технічної точки зору тепловий насос демонструє стабільну ефективність упродовж року —

від COP 2,76 у зимові місяці до понад 5,5 влітку. Така продуктивність зумовлена залежністю від температури зовнішнього повітря, однак навіть у несприятливих умовах теплонасосна система перевершує електричні бойлери за енергоефективністю. Важливо, що використання холодоагенту R290 (пропан) не лише забезпечує високу температуру теплоносія (макс до 75°C), а й відповідає сучасним вимогам екологічної безпеки, оскільки має низький потенціал глобального потепління (GWP).

Результати дослідження підтверджують, що впровадження теплових насосів у тваринницьких господарствах України є стратегічно доцільним кроком, який відповідає світовим тенденціям сталого розвитку, енергозбереження та децентралізації енергопостачання. Подальше масштабування подібних проєктів дозволить не лише підвищити конкурентоспроможність аграрного сектору, але й забезпечити його сталий розвиток з урахуванням екологічних викликів сучасності.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Стаднік М.І., Гришун А.В., Проценко Д.П., Метод покриття графіку навантаження тваринницької ферми при автономному електропостачанні, на базі біогазових установок. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2019. № 4(107). С. 79–87 <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2019-4-10>.
2. Стаднік, М.І., Проценко, Д.П., Бабій, С.М. Гібридне електропостачання з використанням відновлюваних джерел енергії. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2020. № 4. С. 32–41 <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-151-4-32-41>.
3. Гайдукевич С. В., Семенова Н. П. Шляхи підвищення енергоефективності тваринницьких приміщень. Харків: Держ. біотехнологічний ун-т., 2022 <https://biotechuniv.edu.ua/wp-content/uploads/2023/01/tezy-conf-22-12-22n.pdf>.
4. Довбненко О.Ф. Обґрунтування режимів роботи теплоутилізаторів вентиляційних викидів тваринницьких приміщень. Автореферат канд. техн. наук за спец. 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва. Глевах: ННЦ «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства» НААН України, 2011. 24 с.
5. Мельничук О.В. Підвищення ефективності використання сонячної та вітрової енергії для теплопостачання підприємств АПК. Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра. Житомир: Поліський національний університет МОН України, 2020. 30 с.

6. Болтянська Н.І., Болтянський О.В. Напрямки підвищення ефективності використання енергоресурсів в тваринництві. Київ: Національний університет біоресурсів і природокористування України, 2021.

7. Болтянська Н.І., Болтянський О.В. Визначення напрямів енергозбереження в сільському господарстві. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д. т. н., проф. В. М. Кюрчев. 2020. Вип. 1, № 10. С. 340 <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2020-1-16>.

8. Болтянський Б.В., Скляр О.Г., Скляр Р.В., Болтянська Н.І., Дереза С.В. Енерго- та ресурсозбереження в тваринництві: підручник для здобувачів вищої освіти закладів вищої освіти. Київ: 2020. 410 с.

9. Симборський А.І. Техніко-економічні показники розвитку сільськогосподарського виробництва та емісія парникових газів в Україні. Проблеми загальної енергетики. 2013. № 3(34). С. 60–65.

10. Басок Б.І., Дубовський С.В., Пастушенко Е.П., Нікітін Є.Є., Базєєв Є.Т. Теплові насоси як тренд низьковуглецевого розвитку енергетики. Енерготехнології та ресурсозбереження. 2023. Вип. 75, № 2. С. 23–44 <https://doi.org/10.33070/etars.2.2023.02>.

11. Rosenow J., Gibb D., Nowak T., Lowes R. Heating up the global heat pump market. Nature Energy. 2022. Вип. 7, № 10. С. 901–904 <https://doi.org/10.1038/s41560-022-01104-8>.

12. IEA (2022). Installed heat pump stock by region and global Net Zero Scenario deployment, 2010–2030. IEA, Paris. <https://www.iea.org/data-and-statistics%20/charts/installed-heat-pump-stock-by-region-and-global-net-zero-scenario-deployment-2010-2030> (дата звернення: 18, Квітень 2025).

13. IEA (2022). The future of heat pumps. Executive Summary, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps/executive-summary> (дата звернення: 18, Квітень 2025).

14. Energy Technology Perspectives 2023 – Analysis. 2023 <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023> (дата звернення: 18, Квітень 2025).

15. PORT PC: 2022 was the Year of Heat Pumps in Poland. <https://www.ehpa.org/news-and-resources/news/port-pc-2022-was-the-year-of-heat-pumps-in-poland/> (дата звернення: 18, Квітень 2025).

16. Снежкін Ю.Ф. Енергоефективні теплотехнології та обладнання для виробництва теплоти з відновлюваних джерел енергії. Теплофізика та теплоенергетика. 2022. Вип. 44. С. 7–12 <https://doi.org/doi.org/10.31472/tpe.4.2022.1>.

17. *Снєжкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Дабіжа Н.О.* Аналіз енергетичних показників процесу теплонасосного сушіння. *Промышленная теплотехника*. 2017. Вип. 39, № 3. С. 47–52 <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2017.07>. .
18. *Дубовський С.В.* Енергоекономічний аналіз сполучених систем генерації електричної енергії і теплоти. Київ:2014. 182 с. ISBN 978-966-00-1447-3.
19. *Снєжкін Ю.Ф.* Енергоефективні теплонасосні технології. Стан та перспективи їх впровадження в Україні. *Промышленная теплотехника*. 2017. Вип. 39, № 2. С. 18–24 <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2017.03>. .
20. *Безродний М.К., Ословський С.О.* Енергетична ефективність використання системи кондиціонування на базі ґрунтового теплового насосу. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2022. Вип. 44, № 1. С. 45–54 <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2022.6>. .
21. *Безродний М.К., Місюра Т.О.* Енергетичний аналіз теплонасосної припливно-витяжної установки для осушення та кондиціонування виробничого приміщення. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2022. Вип. 44, № 1. С. 55–64 <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2022.7>. .
22. *National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine, Bezrodny M. K.* Thermodynamic analysis of the heat pump-adsorption air drying system using a recovery. *Eurasian Physical Technical Journal*. 2023. Вип. 20, № 4 (46). С. 46–53 <https://doi.org/10.31489/2023No4/46-53>. .
23. *Bezrodny M.K., Prytula N.O., Teslenko O.I., Matushevych X.B.* Methodological approaches to determining the general parameters of solar collectors and ground heat accumulator for a heat pump heating system. *Energy Technologies & Resource Saving*. 2024. Вип. 81, № 4. С. 68–78 <https://doi.org/10.33070/etars.4.2024.05>. .
24. *Безродний М.К., Прутула Н.О.* Енергетична ефективність теплонасосних схем тепlopостачання: монографія. Київ:2012. 208 с.
25. *Nikitin Ye. Ye.* Conceptual positions of modernization of existing inefficient district heating systems. *Energy Technologies & Resource Saving*. 2017. № 2. С. 11–21 <https://doi.org/10.33070/etars.2.2017.02>. .
26. *Дерій В.О., Тесленко О. І., Соколовська І.С.* Методичний підхід до оцінки потенціалу виробництва теплової енергії теплонасосними установками у разі їх впровадження в регіональних системах теплопалення. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2023. Вип. 75, № 2. С. 44–56 <https://doi.org/10.33070/etars.2.2023.03>. .
27. *Дерій В.О., Соколовська І.С., Тесленко О. І.* Огляд низькоякісних джерел тепла для теплонасосних установок у системах централізованого тепlopостачання. *Системні дослідження в енергетиці*. 2022. Вип. 2022, № 1–2. С. 30–41 <https://doi.org/10.15407/pge2022.01-02.030>. .
28. *Heat Pumps*, IEA, Paris. <https://www.iea.org/energy-system/buildings/heat-pumps> (дата звернення: 18, Квітень 2025).
29. *How to Avoid Gas Shortages in the European Union in 2023 – Analysis*. 2022 <https://www.iea.org/reports/how-to-avoid-gas-shortages-in-the-european-union-in-2023> (дата звернення: 18, Квітень 2025).
30. *Fitzgerald J.* What Could Chill Heat Pumps. 2023 <https://prospect.org/api/content/e4d0bac2-a0ba-11ed-ba78-12b3f1b64877/> (дата звернення: 18, Квітень 2025).
31. *Плигун Е.В., Хмельнюк М.Г.* Дослідження ефективності роботи парокompресійного теплового насосу на природних робочих тілах із використанням відновлюваних джерел енергії. *Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК*. Харків:ФООП Бровін О.В., 2023. ISBN 978-617-8238-28-5 <http://btu.kharkov.ua/nauka/konferentsiyi/> .
32. *Заруба Г.Г., Хмельнюк М.Г.* Стан та перспективи використання енергоефективних робочих речовин у теплових насосах: аналіз наукових досліджень та потенціал розвитку. *Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК*. Харків:ФООП Бровін О.В., 2023. ISBN 978-617-8238-28-5 <http://btu.kharkov.ua/nauka/konferentsiyi/> .
33. *Босий М.В.* Енергетична ефективність повітряного теплового насоса на екологічно чистому робочому тілі пропан. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. Серія: Технічні науки. 2022. № 4. С. 144–148 <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/22>. .
34. *Босий М.В.* Термодинамічна енергоефективність перетворення тепла в циклі теплового насоса «вода-вода». *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2025. Вип. 82, № 1. С. 47–60 <https://doi.org/10.33070/etars.1.2025.04>.
35. *Власенко В.В., Семко Т.В., Шаблій Л.М., Лавицький В.П.* Технологія молока та молочних продуктів : навчальний посібник. Вінниця:ТОВ «Нілан-ЛТД», 2015. 330 с. ISBN ISBN 978-617-7212-72-9.
36. *Опалювальна техніка «Титан»*. <https://titan-kotly.com.ua/ru/vodonahrivachi-ru?ocf=F40S2V353947520F4S2V2686090180> .
37. *Робимо клімат правильно*. Опалення, охолодження та гаряча вода з мінімальними витратами та без шкоди для навколишнього середовища. <https://hajster.com> (дата звернення: 18, Квітень 2025).

**INCREASING THE EFFICIENCY OF HEAT SUPPLY OF LIVESTOCK COMPLEXES WITH THE USE OF HEAT PUMP UNITS**

**Dzuban Yu.I.<sup>1</sup>, Maliarenko O.Ye.<sup>2</sup>, Horskyi V.V.<sup>3</sup>, Eutukhova T.O.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Doctoral Student, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-4585-7835>, email: [1809yra@gmail.com](mailto:1809yra@gmail.com)

<sup>2</sup>PhD (Engin), Senior Research Fellow, ORCID ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5882-916X>, email: [malyarenlena@gmail.com](mailto:malyarenlena@gmail.com)

<sup>3</sup>PhD, ORCID ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9128-9556>, email: [witalij.3d@gmail.com](mailto:witalij.3d@gmail.com)

<sup>4</sup>PhD (Engin), docent, ORCID ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4778-2479>, email: [tatyana.eutykhova@gmail.com](mailto:tatyana.eutykhova@gmail.com)

1234 General Energy Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Antonovycha str., 172, Kyiv, Ukraine, 03150

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2025.8>

The article considers the problem of increasing the energy efficiency of heat supply of livestock complexes by introducing heat pump units of the “air-to-water” type. Modern means of energy supply of livestock farms are studied, the main shortcomings of traditional hot water supply systems from an electric boiler are identified, and alternative solutions are proposed using renewable energy sources - a heat pump unit of the “air-to-water” type using the propane refrigerant R290. In the process of the study, experimental studies and analysis of electricity consumption by traditional water heating devices were conducted. The effectiveness of implementing a heat pump to replace an electric boiler was assessed. The transformation coefficient of the heat pump unit by months of the year and the average annual one were analyzed. It was found that the heat pump provides stable efficiency throughout the year - from COP 2.76 in the winter months to over 5.5 in the summer. It was established that the use of heat pump technology allows reducing annual electricity costs by almost 5 times, providing significant cost savings. Calculations showed that the payback period of the project is about 2 to 5 years, which confirms its economic feasibility. It was estimated how the payback period of the project changes due to changes in the electricity tariff and the cost of operating and additional costs for servicing the heat pump unit. It

was found that a higher electricity tariff contributes to a decrease in the payback period of the project. The use of propane R290 refrigerant in the heat pump unit to replace freon ensures the environmental safety of the technology, since it has a low global warming potential (GWP). It is proven that heat pump units contribute to increasing energy efficiency, reducing dependence on fossil energy resources and reducing the negative impact on the environment. The results of the study indicate the feasibility of large-scale implementation of heat pump systems in agricultural enterprises to increase the competitiveness of the industry and sustainable development of the agro-industrial sector.

References 37, tables 8.

**Key words:** energy supply, heat pump, livestock, hot water, energy efficiency.

1. Antonenko, S.V., Dobryden, I.V. (2016). Porivnialnyi analiz rozrakhunku rivnia teplozabezpechennia dlia ob'ektiv riznoi kategorii teplospotrebuвання [Comparative analysis of the calculation of heat supply level for objects of different heat consumption categories]. Visnyk NTUU "KPI". Seriya: Teploenerhetyka. Enerhozberezhennia. Ekolohiia, (1), 50–56 (in Ukrainian).

2. Kucher, A.V., Kazakova, N.A. (2013). Metodolohichni pidkhody do otsinky efektyvnosti vykorystannia resursnoho potentsialu silskoho hospodarstva [Methodological approaches to assessing the efficiency of resource potential use in agriculture]. Ahrosvit – Agrosvit, (19), 15–19 (in Ukrainian).

3. Liashenko, V.I. (2017). Otsinka efektyvnosti vykorystannia enerhetychnykh resursiv v silskomu hospodarstvi Ukrainy [Assessment of the efficiency of energy resources use in agriculture of Ukraine]. Efektyvna ekonomika – Efektyvna ekonomika, (11). Retrieved from [http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/11\\_2017/117.pdf](http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/11_2017/117.pdf) (in Ukrainian).

4. Liashenko, V.I., Saliuk, L.O. (2019). Orhanizatsiini ta ekonomichni zasady enerhooshchadnosti u silskomu hospodarstvi Ukrainy [Organizational and economic principles of energy saving in agriculture of Ukraine]. Efektyvna ekonomika – Efektyvna ekonomika, (4). Retrieved from [http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/4\\_2019/92.pdf](http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/4_2019/92.pdf) (in Ukrainian).

5. Pylypenko, H.H. (2022). Doslidzhennia efektyvnosti vykorystannia teplonosiiu dlia zdiisnennia protsesiv teplozabezpechennia ob'ektiv silskoho hospodarstva [Research on the efficiency of heat carriers for the implementation of heat supply processes in agricultural facilities]. Teploenerhetyka ta teplotekhnika – Heat Power Engineering and Thermal Engineering, (64), 78–84. <https://doi.org/10.31472/tpe/64/78> (in Ukrainian).

6. *Pylypenko, H.H.* (2022). Otsinka efektyvnosti vykorystannia teplonasosnykh ustanovok dlia pidvyshchennia enerhoefektyvnosti ob'ektiv silskoho hospodarstva [Assessment of the efficiency of heat pump systems for increasing energy efficiency of agricultural facilities]. *Teplenerhetyka ta teplotekhnika – Heat Power Engineering and Thermal Engineering*, (65), 84–90. <https://doi.org/10.31472/tpe/65/84> (in Ukrainian).
7. *Rudenko, O.H., Ivanov, O.V.* (2014). Systemnyi pidkhid do planuvannia teplozabezpechennia ob'ektiv APK [A systematic approach to planning heat supply for agricultural production facilities]. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho aharnoho universytetu. Seriya: Mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia vyrobnychkykh protsesiv – Bulletin of Sumy National Agrarian University. Series: Mechanization and Automation of Production Processes*, (4), 28–33 (in Ukrainian).
8. *Saharuk, O.M., Tretiak, A.M.* (2020). Enerhoefektyvnist ta teplovyi komfort yak priorytetni napriamy rozvytku system teplozabezpechennia APK [Energy efficiency and thermal comfort as priority directions for the development of agricultural heat supply systems]. *Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannia – Modern Problems of Architecture and Urban Planning*, (57), 263–272. <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2020.57.263-272> (in Ukrainian).
9. *Pylypenko, H.H.* (2023). Rozrakhunok enerhetychnoi efektyvnosti vykorystannia teplonasosnykh tekhnolohii v systemakh teplozabezpechennia tvarynnytskykh kompleksiv [Calculation of energy efficiency of using heat pump technologies in livestock heat supply systems]. *Promyslova teplotekhnika – Industrial Heat Engineering*, 45(2), 70–77. <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2023.10> (in Ukrainian).
10. *Saharuk, O.M.* (2023). Rozrobka enerhoefektyvnykh system teplozabezpechennia dlia silskohospodarskykh pidpriemstv [Development of energy-efficient heat supply systems for agricultural enterprises]. *Teplenerhetyka – Heat Power Engineering*, (2), 58–65. <https://doi.org/10.31472/te.2.2023.6> (in Ukrainian).
11. *Rosenow, J., Gibb, D., Nowak, T., Lowes, R.* (2022). Heating up the global heat pump market. *Nature Energy*, 7(10), 901–904. <https://doi.org/10.1038/s41560-022-01104-8> (in English).
12. *IEA* (2022). Installed heat pump stock by region and global Net Zero Scenario deployment, 2010–2030. IEA, Paris. Retrieved April 18, 2025, from <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/installed-heat-pump-stock-by-region-and-global-net-zero-scenario-deployment-2010-2030> (in English).
13. *IEA* (2022). The future of heat pumps. Executive Summary. IEA, Paris. Retrieved April 18, 2025, from <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps/executive-summary> (in English).
14. *IEA* (2023). Energy Technology Perspectives 2023 – Analysis. Retrieved April 18, 2025, from <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023> (in English).
15. *PORT PC* (2022). 2022 was the Year of Heat Pumps in Poland. Retrieved April 18, 2025, from <https://www.ehpa.org/news-and-resources/news/port-pc-2022-was-the-year-of-heat-pumps-in-poland/> (in English).
16. *Snieszkin, Yu.F.* (2022). Enerhoefektyvni teplotekhnolohii ta obladdannia dlia vyrobnytstva teploty z vidnovliuvanykh dzherel enerhii [Energy-efficient thermal technologies and equipment for heat production from renewable energy sources]. *Teplofizyka ta teplenerhetyka – Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 44, 7–12. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2022.1> (in Ukrainian).
17. *Snieszkin, Yu.F., Chalaiev, D.M., Dabyzha, N.O.* (2017). Analiz enerhetychnykh pokaznykiv protsesu teplonasosnoho sushinnia [Analysis of energy performance of the heat pump drying process]. *Promyslova teplotekhnika – Industrial Heat Engineering*, 39(3), 47–52. <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2017.07> (in Ukrainian).
18. *Dubovskiy, S.V.* (2014). Enerhoekonomichni analiz spoluchenykh system heneratsii elektrychnoi enerhii i teploty [Energy-economic analysis of combined systems for electricity and heat generation]. Kyiv: 182 p. ISBN 978-966-00-1447-3 (in Ukrainian).
19. *Snieszkin, Yu.F.* (2017). Enerhoefektyvni teplonasosni tekhnolohii. Stan ta perspektyvy yikh vprovadzhennia v Ukraini [Energy-efficient heat pump technologies. State and prospects of their implementation in Ukraine]. *Promyslova teplotekhnika – Industrial Heat Engineering*, 39(2), 18–24. <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2017.03> (in Ukrainian).
20. *Bezrodnyi, M.K., Oslovskiy, S.O.* (2022). Enerhetychna efektyvnist vykorystannia systemy kondytsionuvannia na bazi hruntovoho teplovoho nasosu [Energy efficiency of using a ground source heat pump-based air conditioning system]. *Teplofizyka ta teplenerhetyka – Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 44(1), 45–54. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2022.6> (in Ukrainian).
21. *Bezrodnyi, M.K., Misiura, T.O.* (2022). Enerhetychnyi analiz teplonasosnoi pryplyvno-vytiazhnoyi ustanovky dlia osushennia ta kondytsionuvannia vyrobnychoho prymishchennia [Energy analysis of a supply and exhaust heat pump unit for dehumidification and air conditioning of a production facility]. *Teplofizyka ta teplenerhetyka – Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 44(1), 55–64. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2022.7> (in Ukrainian).
22. *National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”*, Kyiv, Ukraine, *Bezrodny, M.K.* (2023). Thermodynamic analysis of the heat pump-adsorption air drying system using a recovery. *Eurasian Physical Technical Journal*, 20(4), 46–53. <https://doi.org/10.31489/2023No4/46-53> (in English).

23. Bezrodny, M.K., Prytula, N.O., Teslenko, O.I., Matushevych, Kh.B. (2024). Methodological approaches to determining the general parameters of solar collectors and ground heat accumulator for a heat pump heating system. *Energy Technologies & Resource Saving*, 81(4), 68–78. <https://doi.org/10.33070/etars.4.2024.05> (in English).
24. Bezrodnyi, M.K., Prytula, N.O. (2012). Enerhetychna efektyvnist teplonasosnykh skhem teplopostachannia: monohrafiia [Energy efficiency of heat pump heating systems: monograph]. Kyiv: 208 p. (in Ukrainian).
25. Nikitin, Ye.Ye. (2017). Conceptual positions of modernization of existing inefficient district heating systems. *Energy Technologies & Resource Saving*, (2), 11–21. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2017.02> (in English).
26. Derii, V.O., Teslenko, O.I., Sokolovska, I.S. (2023). Metodichniy pidkhid do otsinky potentsialu vyrobnytstva teplovoi enerhii teplonasosnykh ustanovkamy u razi yikh vprovadzhennia v rehionalnykh systemakh teplopostachannia [Methodological approach to assessing the potential for heat production by heat pumps in case of their implementation in regional heating systems]. *Enerhotekhnologii ta resursozberezhennia – Energy Technologies & Resource Saving*, 75(2), 44–56. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2023.03> (in Ukrainian).
27. Derii, V.O., Sokolovska, I.S., Teslenko, O.I. (2022). Ohliad nyz'koiakisykh dzherel tepla dlia teplonasosnykh ustanovok u systemakh tseentralizovanoho teplopostachannia [Overview of low-grade heat sources for heat pump units in district heating systems]. *Systemni doslidzhennia v enerhetytsi – System Research in Energy*, 2022(1–2), 30–41. <https://doi.org/10.15407/pge2022.01-02.030> (in Ukrainian).
28. IEA (n.d.). Heat Pumps. IEA, Paris. Retrieved April 18, 2025, from <https://www.iea.org/energy-system/buildings/heat-pumps> (in English).
29. IEA (2022). How to Avoid Gas Shortages in the European Union in 2023 – Analysis. Retrieved April 18, 2025, from <https://www.iea.org/reports/how-to-avoid-gas-shortages-in-the-european-union-in-2023> (in English).
30. Fitzgerald, J. (2023). What Could Chill Heat Pumps. Retrieved April 18, 2025, from <https://prospect.org/api/content/e4d0bac2-a0ba-11ed-ba78-12b3f1b64877/> (in English).
31. Plyhun, E.V., Khmelniuk, M.H. (2023). Doslidzhennia efektyvnosti roboty parokompresiiinoho teplovoho nasosu na pryrodnykh robochykh tilakh iz vykorystanniam vidnovliuvanykh dzherel enerhii [Study of the efficiency of a vapor-compression heat pump operating on natural refrigerants using renewable energy sources]. In: *Elektroenerhetyka, elektromechanika ta tekhnologii v APK – Power Engineering, Electromechanics and Technologies in Agro-Industrial Complex*, Kharkiv: FOP Brovin O.V. ISBN 978-617-8238-28-5. <http://btu.kharkov.ua/nauka/konferentsiyi/> (in Ukrainian).
32. Zaruba, H.H., Khmelniuk, M.H. (2023). Stan ta perspektyvy vykorystannia enerhoefektyvnykh robochykh rehovyn u teplovykh nasosakh: analiz naukovykh doslidzen ta potentsial rozvytku [State and prospects for the use of energy-efficient refrigerants in heat pumps: analysis of scientific research and development potential]. In: *Elektroenerhetyka, elektromechanika ta tekhnologii v APK – Power Engineering, Electromechanics and Technologies in Agro-Industrial Complex*, Kharkiv: FOP Brovin O.V. ISBN 978-617-8238-28-5. <http://btu.kharkov.ua/nauka/konferentsiyi/> (in Ukrainian).
33. Bosyi, M.V. (2022). Enerhetychna efektyvnist povitrianoho teplovoho nasosa na ekolohichno chystomu robochomu tili propan [Energy efficiency of an air heat pump using environmentally friendly propane as a refrigerant]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnogo universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky – Scientific Notes of Tavria National University named after V.I. Vernadskyi. Series: Technical Sciences*, (4), 144–148. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/22> (in Ukrainian).
34. Bosyi, M.V. (2025). Termodynamichna enerhoefektyvnist peretvorennia tepla v tsykli teplovoho nasosa «voda-voda» [Thermodynamic energy efficiency of heat conversion in a "water-to-water" heat pump cycle]. *Enerhotekhnologii ta resursozberezhennia – Energy Technologies & Resource Saving*, 82(1), 47–60. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2025.04> (in Ukrainian).
35. Vlasenko, V.V., Semko, T.V., Shablii, L.M., Lavytskyi, V.P. (2015). *Tekhnologiiia moloka ta molochnykh produktiv: navchalnyi posibnyk [Milk and dairy products technology: textbook]*. Vinnytsia: TOV "Nilan-LTD", 330 p. ISBN 978-617-7212-72-9 (in Ukrainian).
36. *Opaliuvalna tekhnika «Titan» [Heating equipment "Titan"]*. Retrieved April 18, 2025, from <https://titan-kotly.com.ua/ru/vodonahrivachi-ru?ocf=F40S2V353947520F4S2V2686090180> (in Ukrainian).
37. *Robymo klimat pravylno. Opalennia, okhlo-dzhennia ta hariacha voda z minimalnymy vytratamy ta bez shkody dlia navkolyshnoho seredovyscha [We make climate right. Heating, cooling and hot water with minimal costs and no harm to the environment]*. Retrieved April 18, 2025, from <https://hajster.com> (in Ukrainian).

Отримано 21.04.2025

Received 21.04.2025

Прийнято до друку 10.05.2025  
Accepted for publication 10.05.2025