

ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТІ ХОЛОДОАГЕНТИ В ТЕПЛОВИХ НАСОСАХ З ВИКОРИСТАННЯМ НИЗЬКОПОТЕНЦІЙНОГО ТЕПЛА ШАХТНИХ ВОД

Бондар О.І.¹, Салій І.В.¹, Мостицький А.В.², Литвиненко М.П.³,
Кокул С.В.⁴, Квасюк В.Я.², Машина П.В.⁵

¹Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління
вул. Митрополита Василя Липського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ

²Науково-виробниче підприємство «Дніпро «МТО»
вул. Верховної Ради, 22, 02094, м. Київ

³Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
пр. Берестейський, 37, 03056, м. Київ

⁴Одеський національний технічний університет
вул. Канатна, 112, 65039, м. Одеса

⁵Інженерна компанія «Івік»
вул. Крамського, 14/34, 03115, м. Київ

dei205@ukr.netamostitskiy@gmail.com, mashina@ivik.com

Вивчені теоретичні та практичні дослідження, пов'язані із заміною традиційних холодоагентів (синтетичних), що використовуються у теплових насосах, на екологічно чисті суміші вуглеводнів. Такий захід зумовлений зменшенням впливу на довкілля парникових газів та збільшенням енергоефективності теплових насосів.

Тема переходу від традиційних методів використання корисних копалин до впровадження енергоефективних технологій на сьогодні досить актуальна. Саме таким критеріям відповідають теплові насоси, в яких коефіцієнт перетворення електроенергії COP у теплову енергію збільшується в рази.

Теплові насоси, що працюють по зворотному циклу Карно, поглинають тепло, отримане з навколишнього середовища, та передають його споживачу завдяки роботі стиснення у компресорі. Перспективним є розроблення теплових насосів, що отримуватимуть теплову енергію не з навколишнього середовища, а, наприклад, з використанням тепла шахтних вод. Тоді кількість тепла переданого від низько-потенційного джерела, збільшиться, а енерговитрати зменшаться, що сприятиме поліпшенню коефіцієнту перетворення COP.

Окрім запропонованого переходу на використання суміші вуглеводнів, проведені дослідження ефективності низькопотенційного тепла шахтних вод. Дані проаналізовані та занесені до таблиць з відповідними розрахунками.

Мета наукової праці – означення перспектив застосування теплових насосів в Україні та підвищення їх енергоефективності. Проаналізовано існуючий досвід застосування теплових насосів, а також перспективи використання їх у різних сферах.

Зроблено теоретичний розрахунок ефективності використання суміші природних газів замість синтетичного холодоагенту R32, представлено результати випробувань, які демонструють, що використання сумішевого холодоагенту на основі природних газів має низку переваг, зокрема, підвищений COP, зниження енерговитрат, а також тисків, підвищення кінцевої температури. *Ключові слова:* тепловий насос, енергозбереження, екологічно чисті холодоагенти, суміш природних газів, вуглеводневий холодоагент, низько потенційне тепло шахтних вод, COP.

Environmentally clean refrigerants in heat pumps using the low potential heat of mine waters. Bondar O., Saliy I., Mostytskiy A., Lytyvnenko M., Kokul S., Kvasyuk V., Mashyna P.

Currently, a relevant topic is the transition from traditional methods of using fossil fuels to the implementation of energy-efficient technologies. Heat pumps meet such criteria, where the coefficient of conversion of electricity (COP) into thermal energy exceeds six.

Heat pumps, operating on the reverse Carnot cycle, absorb heat from the surrounding environment and transfer it to the consumer through compression work in the compressor. A promising direction is the development of heat pumps that will derive heat not from the surrounding environment but for example, from the heat of mine waters. In this case, the amount of heat transferred from the low-potential heat source will increase, and energy consumption will decrease, leading to an improved COP.

This article presents theoretical and practical research on replacing traditional refrigerants used in heat pumps with environmentally friendly hydrocarbon mixtures. This transition is driven by the reduction of greenhouse gas emissions and the increase in energy efficiency of heat pumps.

In addition to the proposed transition to hydrocarbon mixtures, studies have been conducted on the efficiency of using low-potential heat from mine waters. Data analysis is present in tables.

The article's goal was to determine the prospects for the application of heat pumps in Ukraine and to improve their energy efficiency. The existing experience with heat pumps and their potential use in various sectors were analyzed.

The study also includes a theoretical calculation of the efficiency of using a mixture of natural gases instead of the synthetic refrigerant R32. The results of the tests show that using a blended refrigerant based on natural gases has several advantages, such as increased COP, reduced energy consumption, lower pressures, and higher final temperatures. *Key words*: heat pump, energy saving, environmentally friendly refrigerants, mixture of natural gases, hydrocarbon refrigerant, low potential heat of mine waters, COP.

Постановка проблеми. На сьогодні використання викопних паливних ресурсів для обігріву приміщень та гарячого водопостачання, наприклад, у котельних, призводить до забруднення навколишнього середовища продуктами горіння. Шкідливі викиди продуктів згоряння поділяють за ступенем небезпеки (токсичності) на п'ять класів: надзвичайно небезпечні (бенз(а)пірен, V_2O_5); небезпечні (NO_2 , H_2S , летка зола при масовій частці CaO не менше 35%); помірно небезпечні (NO , SO_2 , SO_3 , сажа, летка зола при масовій частці CaO менше 35%, неорганічний пил); малонебезпечні (NH_3 , CO); безпечні (N_2 , O_2 , CO_2 , H_2O) [1].

У сфері опалення приміщень важливим напрямком є застосування теплових насосів, що замінюють традиційні котельні. Вони не лише ефективні у використанні, але й не потребують великих затрат на установку та обслуговування. Проте одним із істотних недоліків цього напрямку є вплив на глобальне потепління – як наслідок використання синтетичних холодоциклів агентів.

Для розв'язання такої проблеми виникає необхідність використання екологічно чистіших альтернативних холодоциклів агентів. Світова практика засвідчує, що перехід до холодоагентів, що містять природний газ, дозволяє підвищити енергоефективність систем опалення та зменшити їхній негативний вплив на довкілля.

До таких холодоагентів відносяться: бутан, ізобутан, пропан та інші, що мають високий потенціал теплової енергії та можуть успішно використовуватися у теплових насосах, що дозволить замінити синтетичні холодоагенти. Такий перехід стане позитивним явищем у напрямку сталого розвитку та збереження екологічної рівноваги нашої планети.

Актуальність роботи. Енерго – та ресурсозбереження, охорона довкілля – це пріоритетні напрямки розвитку досліджень у сфері використання паливно-енергетичних ресурсів.

У промисловому комплексі України споживання природного газу нині ще залишається у пріоритеті. Більшість енергетичних проблем країни розв'язується завдяки використанню природного газу як джерела енергії. Зважаючи на енергетичну кризу, актуальним стає питання оптимального використання енергоресурсів та впровадження передових технологій із енергозбереження. Застосування паро-компресійних теплових насосів з використанням сумішевого холодоагенту, що містить природні гази, за низькотемпературних режимів сприятиме ефективнішому використанню електроенергії та захисту навколишнього середовища, оскільки це зменшить

теплове забруднення, а також кількість шкідливих викидів від продуктів згоряння.

Актуальності наукової праці додає й такий факт; Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України спільно з Проектом енергетичної безпеки USAID (ПЕБ) підписали 28 листопада 2023 року Меморандум про взаєморозуміння, який має на меті відновлення, реформування та розвиток енергетичної і муніципальної інфраструктури громад, забезпечення енергетичної стійкості, включаючи, зокрема, розвиток розподіленої генерації енергії з інтегрованою когенерацією, використання відновлюваної енергії та біопалив і модернізацію централізованого теплопостачання [2].

Мета дослідження – визначення перспектив застосування теплових насосів в Україні та підвищення їх енергоефективності за рахунок використання сумішей природних газів у якості холодоагентів з урахуванням наявних у регіонах джерел низько-потенційного тепла шахтних вод, навколишнього середовища та скидного тепла підприємств.

Сучасний стан проблематики. Застосування теплових насосів, крім енергетичних переваг, зумовлює зменшення забруднення навколишнього середовища та скорочення шкідливих викидів в атмосферу.

Варто зазначити, що найвищий енергоощадний ефект забезпечується від впровадження теплових насосів, у яких тепловий насос поєднується з додатковим низько-потенційним джерелом тепла.

Тепло, що виробляється тепловими насосами, застосовується для опалення та гарячого водопостачання житлових, промислових та громадських споруд, а також для технологічних потреб. У «Концепції розвитку паливно-енергетичного комплексу України на 2006-2030 роки» прогнозується, що виробництво теплової енергії за рахунок теплових насосів до 2030 року буде еквівалентне використанню 20 млн. тон умовного палива в рік [3].

Нині працюють лише одиничні системи опалення, що використовують теплові насоси. І хоча дослідження у цій галузі проводяться давно, масштаби та сфери найефективнішого застосування теплових насосів не визначені, а роботи, пов'язані з розробкою і впровадженням їх в промислову енергетику, перебувають на стадії окремих досліджень і практичних застосувань. Це пов'язано з низкою чинників, зокрема:

- відсутність демонстраційних працюючих теплових насосів;
- широкої реклами їх використання;
- серійного виробництва теплових насосів.

Крім того, у розвинутих країнах світу впровадження теплових насосів відбувається за значної

державної підтримки у вигляді введення двох-ставкового тарифу на електроенергію, виділення субсидій при купівлі теплового насосу, податкових чи кредитних пільг тощо. Щодо напрямків застосування теплових насосів в Україні, то перспективними є такі:

- в Україні з промисловими і комунально-побутовими стічними водами скидається близько 70 тис. МВт/рік теплоти, яка може використовуватися у теплових насосах для теплопостачання комунальних і промислових об'єктів;

- електростанції (у тому числі й атомні) скидають для охолодження воду з температурою 30°C, яку також можна використати в системах теплових насосів;

- крім того, необхідно збільшити використання низькопотенційної енергії тепла землі, річок та морів [4].

На прикладі Київської ТЕЦ-5 був проведений аналіз можливостей використання теплового насоса та визначений його економічний ефект від такого використання у спільній роботі науково-дослідної лабораторії Інституту гідромеханіки НАН України, НТУУ «КПІ» та Королівського технологічного інституту (КТІ, Стокгольм, Швеція) [5]. Для зменшення споживання природного газу на ТЕЦ-5 було запропоновано використовувати низькопотенційне тепло води охолодження конденсатора та інших теплових стоків за допомогою теплових насосів.

Економія органічного палива за допомогою теплових насосів відбувається за рахунок корисного застосування скидного низькопотенційного тепла, що дасть можливість виробляти теплову енергію для потреб централізованого теплопостачання, охолоджувати воду до температури природного джерела та зменшити вплив на біологічні організми річки. Це дасть можливість отримати приблизно 200 Гкал/год теплової енергії.

Дослідниками Інституту технічної теплофізики НАН України, Національного аграрного університету України та Морської Академії Щецина (Польща) був проведений ексергетичний та економічний порівняльний аналіз традиційного і теплонасосного теплопостачання [6].

У якості об'єкта локального теплопостачання був розглянутий комплекс житлових будинків, для якого сумарна потреба в теплоті складає 3 МВт. Аналіз проводився на базі трьох систем традиційного теплопостачання на основі бойлерів, у яких джерелами енергії були: електроенергія; рідке паливо; газ; тепловий насос і сонячний колектор.

Проаналізувавши отримані результати, можна зробити висновок, що ефективність теплонасосної системи трохи перевищує ефективність на рідкому паливі. Аналіз впливу зміни ККД бойлерів на результати вибору системи теплопостачання показує, що з використанням бойлерів старих конструкцій ($\eta = 65\%$) теплонасосна система однозначно

виявляється ефективнішою. При використанні бойлерів нових конструкцій система стає більш ефективною, ніж тепловий насос, однак слід враховувати додаткову вартість заходів щодо збереження рідкого палива. Розбіжність у результатах аналізу для системи на газі і теплонасосної системи у 2,6% не істотна, тому таке теплопостачання може бути серйозною альтернативою тепловому насосу.

Порівняльний аналіз, який передбачає зміну цін на паливо, демонструє переваги теплонасосної системи теплопостачання. Зі зміною цін на енергоносії теплові насоси стали актуальними для України. Їхнє використання для опалення та гарячого водопостачання окремих будівель чи їх груп у геокліматичних умовах України має широкі перспективи, особливо з огляду на переваги теплових насосів порівняно з традиційними, джерела енергії яких через активне використання вичерпуються, зростають витрати на їх видобування або придбання та переробку та які мають негативні наслідки для довкілля.

Теоретичні розрахунки. Моделювання ґрунтується на проведенні розрахунків, пов'язаних із термодинамічним циклом. У даному випадку розглядаються тільки ключові компоненти теплового насоса: компресор, конденсатор, розширювальний клапан та випарник. Для спрощення моделі були внесені такі припущення:

- обидва теплообмінники (конденсатор і випарник) вважаються ізобарними;
- випробувальна установка в цілому вважається адіабатичною по відношенню до навколишнього середовища;
- зміна термодинамічного стану в розширювальному клапані відбувається ізентальпійним чином.

Розглянемо типові величини, характерні для теплового насоса, що застосовується для відновлення тепла.

Для розрахунку теоретичних циклів теплового насоса задаємось наступними значеннями температур навколишнього середовища +2°C, нагріву теплоносія 70°C, температура шахтних вод, що використовуються для підігріву холодної частини теплового насоса 19°C. Розрахунки проводились за формулою 1, а дані COP та тисків всмоктування і нагнітання занесено в таблицю 1.

Теоретичний COP теплового насоса розраховано за формулою 1:

$$COP = \frac{(h_2 - h_3)}{(h_2 - h_1)} \quad (1)$$

де h_1 – ентальпія в точці всмоктування в компресор, h_2 – ентальпія в точці теоретичного стиснення в компресорі, h_3 – ентальпія в точці стиснення в компресорі.

З таблиці 1 видно, що COP у теоретичних розрахунках теплового насоса на суміші не сильно відрізняється від синтетичного холодоагенту R32. При

Теоретичні показники циклів теплових насосів

Холодоагент	Без підігріву			З підігрівом		
	Тиск нагнітання, МПа	Тиск всмоктування, МПа	COP	Тиск нагнітання, МПа	Тиск всмоктування, МПа	COP
R32	4,87	0,58	2,93	4,86	1,1	4,02
Суміш на природних газах	1,06	0,086	3,03	1,06	0,18	4,24

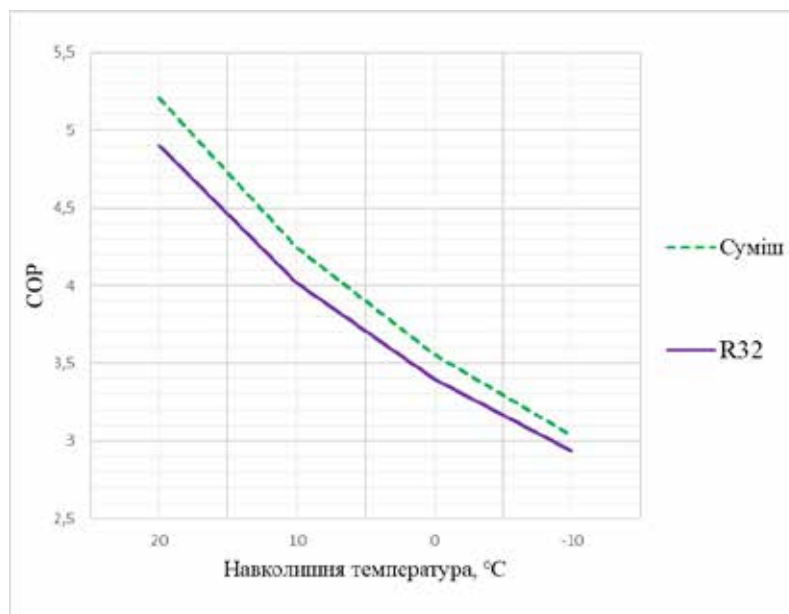


Рис. 1. Залежність COP від температури навколишнього середовища

цьому тиск R32 перевищує 4,87 МПа, що на практиці не можливо реалізувати, а тиски на пропані майже в 2,5 рази вище, ніж на сумішевих холодоагентах, що дозволяє догрівати теплоносії до 70°C.

Значення COP для сумішевого холодоагенту з використанням теплоти шахтних вод не в значній мірі перевищує показники синтетичних холодоагентів.

При порівнянні даних видно, що COP при використанні тепла надлишкових шахтних вод 30% вище, ніж в циклі з використанням тепла навколишнього середовища. Також використання синтетичних холодоагентів R32 неможливе через високі робочі тиски нагнітання, що не дає змоги їх використовувати в сучасному обладнанні теплового насосу.

Значення COP для розрахованих холодоагентів занесені на рис. 1 при температурі нагріву води до 70°C та зміні температури навколишнього середовища від +20°C до -10 °C. Як видно з графіку, показники COP для циклу теплового насосу на сумішах перевищують COP для циклу на синтетичних холодоагентах у всьому діапазоні температур навколишнього середовища.

Наведений графік на рисунку 2 підтверджує, що використання зеотропних сумішей при однакових температурах нагріву води дозволяє знизити тиски нагнітання, у порівнянні з холодоагентом R32.

Результати випробувань. Після теоретичних розрахунків було розроблено стенд для випробувань холодоагентів, схема якого наведена на рис. 3.

Результати досліджень зводилися до пошуку реперних точок теплового насосу для синтетичного холодоагенту R32 та сумішевого холодоагенту на природних газах для перевірки розрахунків та підтвердження ефективності.

На стенді були проведені випробування R32 та сумішевого холодоагентів при встановленій температурі навколишнього середовища 10°C. Дані випробувань представлені на графіку рис. 4.

Як видно з графіку, COP теплового насосу на холодоагенті, що містить суміш природних газів, перевищував свій синтетичний аналог майже у 2 рази при температурах нагріву води до 40°C.

Під час нагріву води до 60°C тепловий насос на R32 не працював через перевищення тисків нагнітання, що були більше 3,5 МПа, а це майже в 4 рази

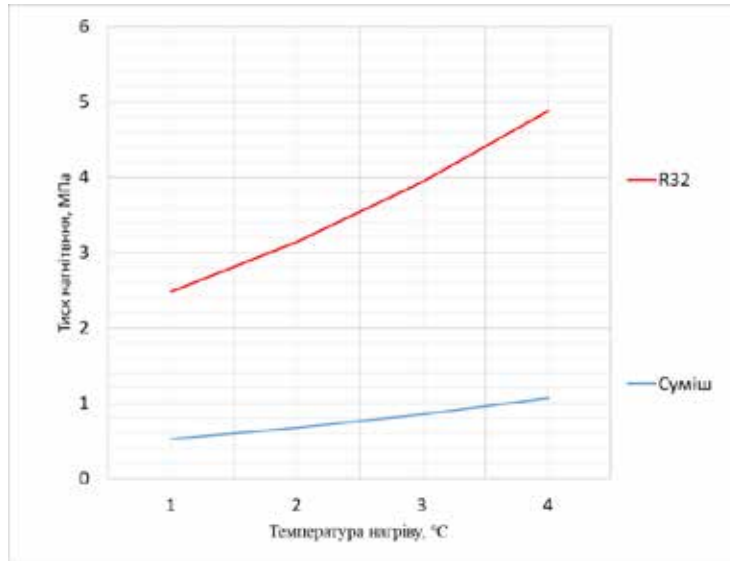


Рис. 2. Залежність тиску нагнітання від температури нагріву

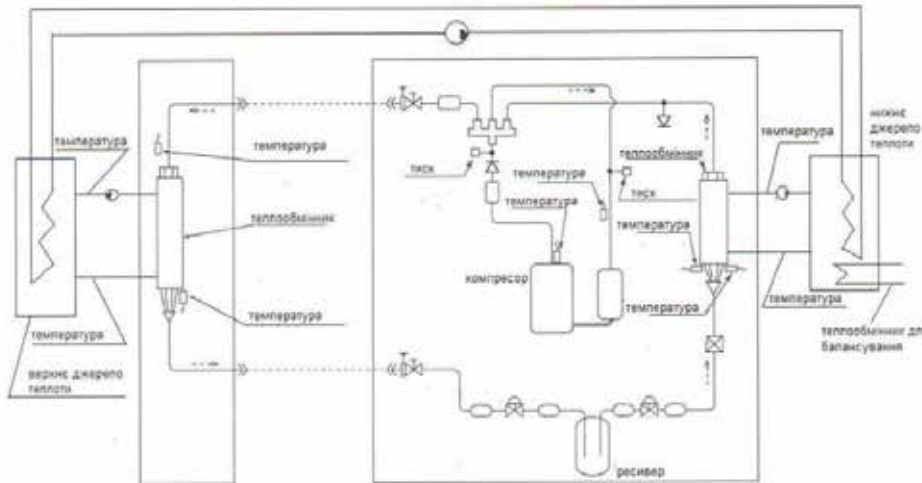


Рис. 3. Схема випробувального стенду теплового насосу

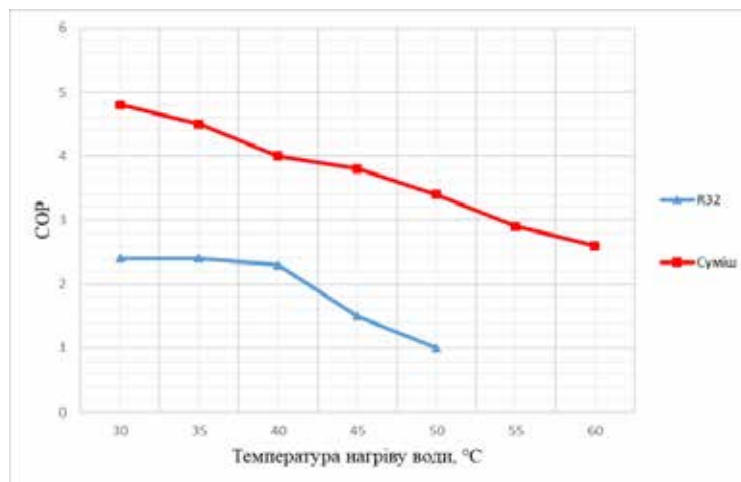


Рис. 4. Результати випробувань холодоагентів на випробувальному стенді теплового насосу

більше, ніж тиск нагнітання на сумішевому холодоагенті. При цьому тепловий насос на сумішевому холодоагенті мав високі показники COP.

Наступними були проведені випробування теплового насосу на холодоагентах R32 та суміші природніх газів, при заданих наступних умовах: температура низько-потенційного джерела тепла

встановлювалась 12,15, та 20°C. За даних температурах тепловий насос підігрівав теплоносії до температур від 35 до 60°C. У таблицю 2 занесено основні параметри циклу теплового насосу, які були отримані під час проведення досліджень, а саме: температура нагріву води, COP, тиск всмоктування і нагнітання, температура входу і виходу

Таблиця 2

Результати випробувань теплового насоса на R32 та холодоагенту, що містить природні газу

Температура нагріву води, °C	R32						Суміш природніх газів					
	COP	P _н бар	P _{вс} бар	t _{вх} води °C	t _{вих} води °C	Температура шахтної води, °C	COP	P _н бар	P _{вс} бар	t _{вх} води °C	t _{вих} води °C	Температура шахтної води, °C
60	-	-	-	-	-	-	3,3	7,15	1,68	55,4	60,2	12
	-	-	-	-	-	-	3,4	7,22	1,86	55,1	59,3	15
	-	-	-	-	-	-	3,7	7,2	2,2	55,3	60,1	20
55	2,9	37,7	8,7	50,2	55,2	12	3,8	6,83	1,72	50,4	55,6	12
	3,0	35,6	8,7	48,3	53,0	15	3,9	6,87	1,9	48,1	53,0	15
	3,2	38,1	10,0	49,9	55,2	20	4	6,81	2,15	49,7	55,2	20
50	3,1	33,7	8,0	45,7	50,2	12	3,9	6,55	1,72	45,5	50,5	12
	3,3	33,6	8,6	45,3	50,2	15	4,1	6,52	1,9	45,1	50,2	15
	3,7	34,1	9,9	50,0	44,6	20	4,5	6,5	2,1	50,0	44,4	20
45	3,7	29,7	8,0	40,4	45,1	12	4,5	5,8	1,77	40,2	45,2	12
	3,9	30,2	8,8	40,2	45,3	15	4,7	5,81	1,95	40,0	45,3	15
	4,3	30,7	9,7	39,6	45,3	20	5,1	5,82	2	38,9	44,8	20
40	4,2	26,4	7,8	35,2	40,0	12	5	5,33	1,66	35,0	40,1	12
	4,6	27,2	8,7	35,7	39,9	15	5,4	5,33	1,95	34,3	39,9	15
	4,7	28,0	9,5	32,4	40,8	20	5,7	5,33	2,3	32,2	40,8	20
35	4,8	22,8	8,3	28,9	34,8	12	5,6	4,05	1,78	28,7	34,8	12
	4,8	24,8	8,5	31,1	37,9	15	5,6	4,05	1,89	30,9	37,9	15
	4,9	27,8	8,3	29,8	35,6	20	6,3	5,3	2,2	30,3	37,9	20

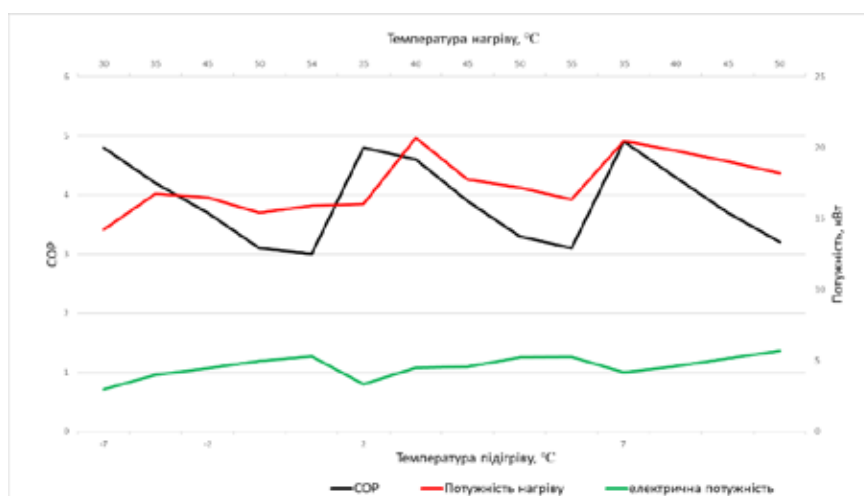


Рис. 5. Результати випробувань холодоагенту R32 на випробувальному стенді

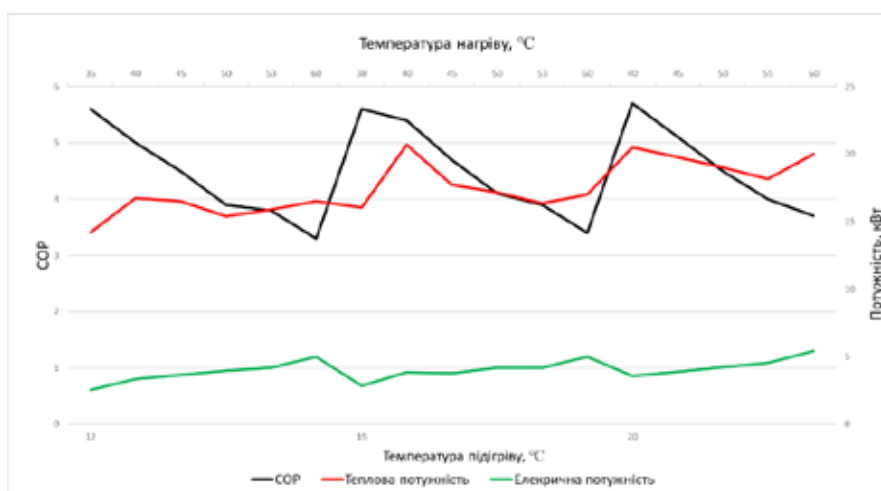


Рис. 6. Результати випробувань холодоагенту, що містить природні гази на випробувальному стенді

води в теплообмінник, температура підігріву низькопотенційного теплоносія.

На графіках рис. 5 та рис. 6 представлені результати випробувань R32 та сумішевого холодоагенту при температурах низько-потенційного тепла (12, 15, 20°C) та температури нагріву теплоносія від 35 до 60°C. Графіки демонструють дані щодо COP, потужності нагріву (кВт) та електричної потужності (кВт).

Висновки. Використання сумішевого холодоагенту на основі природних газів з підігрівом

теплом шахтних вод дає можливість значно підвищити енергоефективність теплового насоса порівняно з нині існуючими, широко розповсюдженими у всьому світі, тепловими насосами на синтетичних холодоагентах.

Додатковий перегрів холодоагенту за рахунок використання шахтних вод при температурі 20°C дає приріст COP у майже на 30 відсотків для сумішевих холодоагентів порівняно з циклом теплових насосів на синтетичних холодоагентах.

Література

1. Ткаченко С. Й., Степанов Д. В., Бондар Л. А. Котельні установки : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2016. 185 с.
2. Мінінфраструктури разом з USAID реформуватимуть сектор центрального тепlopостачання. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/mininfrastruktury-razom-z-usaid-reformuvatymut-sektor-tsentralnoho-teplopостачання>
3. Наказ Міністерства палива та енергетики № 288 (v0288558-05) від 29.06.2005 «Про результати розширеного засідання колегії Мінпаливенерго від 24 червня 2005 року». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0288558-05#Text>
4. Сліпець І. В. Ринок теплових насосів в Україні та світі. URL: https://ukrinterm.com.ua/images/nova-tema/st_18.pdf
5. Бутузов В.А. Перспективи використання теплових насосів. *Пром енергетика*. 2005. № 10. С 5–7.
6. Долинский А.А., Драганов Б.Х., Морозюк Т.В. Альтернативне тепlopостачання на базі теплових насосів: критерії оцінки. *Промислова теплотехніка*. 2007. № 6. С. 67–71.