

ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ БУФЕРНОГО НАКОПИЧУВАЧА ГІДРОТЕРМАЛЬНОЇ ТЕПЛОНАСОСНОЇ СИСТЕМИ ЯК АКУМУЛЯТОРА ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

Отримано 20 лют. 2023; рекомендовано до публікації 22 бер. 2023
Доступно онлайн 31 бер. 2023

О. В. Зур'ян¹, В. Г. Олійніченко²

Автор для кореспонденції: Олексій Зур'ян,
e-mail: alexey_zuryan@ukr.net

¹ канд. техн. наук.
<https://orcid.org/0000-0002-2391-1611>

² наук. співр.
<https://orcid.org/0000-0003-4651-9628>

^{1, 2} Інститут відновлюваної енергетики НАН
України, м. Київ, Україна.

Актуальною задачею при проектуванні комплексних локальних систем (кластера) енергозабезпечення з використанням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є врахування досвіду експлуатації конкретних типів обладнання в реальних умовах. У роботі розглядається можливість ефективного застосування як елемента енергетичного кластера буферного накопичувача гідротермальної теплонасосної системи як акумулятора теплової енергії для забезпечення об'єктів багатоцільового призначення тепловою енергією. Буферний накопичувач входить до складу малоємнісної системи отримання теплової енергії, яка є частиною загальної системи (юніт), що складається з буферного накопичувача теплоносія, теплового насоса та фанкойлів. Показана структурна схема енергетичного кластера та місце в ній малоємнісної системи отримання теплової енергії. Представлений діючий макет розробленої й сконструйованої в Інституті відновлюваної енергетики НАН України експериментальної гідротермальної теплонасосної системи, до складу якої входить буферний накопичувач. Описана методика проведення досліджень. Наведено характеристики вимірювального обладнання, встановленого на експериментальній установці, яке використовувалося для отримання даних у процесі проведення досліджень. Викладено результати науково-дослідної роботи, отримані в ході теоретичних розрахунків і проведених експериментальних досліджень ефективності буферного накопичувача гідротермальної теплонасосної системи як акумулятора теплової енергії. Наведено розрахунок коефіцієнта перетворення теплового насоса «вода-вода» в системі опалення приміщення площею до 100 м² з використанням фанкойлів та буферного накопичувача теплової енергії різної ємності. Виконано розрахунок необхідного об'єму теплоносія та ємності буферного накопичувача, на один кіловат виробленої теплової енергії, для забезпечення автономної роботи теплонасосної системи, де він виконує функцію акумулятора та колектора теплової енергії одночасно. Надано практичні рекомендації щодо кількісних та якісних характеристик обладнання при проектуванні систем накопичення низькопотенційної теплової енергії для гідротермальних теплонасосних систем. Визначено достатній об'єм теплоносія та ємність акумулятора, на один кіловат виробленої теплової енергії тепловим насосом, для забезпечення стабільної роботи гідротермальної теплонасосної системи в цілому. Експериментально підтверджено та теоретично обґрунтовано, що буферний накопичувач теплонасосної системи є необхідним елементом системи, він виконує як функцію амортизатора, так і суттєво підвищує ефективність роботи теплонасосної системи в цілому. Також буферний накопичувач залежно від теплового навантаження може самостійно працювати як автономне джерело низькопотенційної теплової енергії. Зроблено висновки, що мають перспективу подальші дослідження щодо можливості застосування як джерела, для підтримання необхідного енергетичного потенціалу в буферному накопичувачі гідротермальної теплонасосної системи, сонячної системи для нагріву води. Також є актуальними дослідження з порівняння ефективності комплексної роботи сонячної системи для нагріву води та теплового насоса, де теплообмін відбувається: по-перше, в контурі випарника теплового насоса; по-друге, в контурі конденсатора теплового насоса. Робота проведена в рамках виконання науково-дослідної роботи «Розроблення енергетичних кластерів для забезпечення об'єктів багатоцільового призначення електричною та тепловою енергією з використанням технологій відновлюваної та водневої енергетики (шифр: «Енерго-гарант»)».

Ключові слова: тепловий насос, теплонасосна система, теплопостачання, фанкойл, коефіцієнт перетворення

EFFICIENCY OF THE BUFFER ACCUMULATOR OF THE HYDROTHERMAL HEAT PUMP SYSTEM AS A HEAT ENERGY ACCUMULATOR

Received 20 Feb. 2023; accepted 22 Mar. 2023
Available online 31 Mar. 2023

O. Zurian¹, V. Oliynichenko²

Author for correspondence: Oleksii Zurian,
e-mail: alexey_zuryan@ukr.net

¹ Cand. of Tech. Sciences.
<https://orcid.org/0000-0002-2391-1611>

² Researcher.
<https://orcid.org/0000-0003-4651-9628>

^{1, 2} Institute of Renewable Energy NAS of
Ukraine, Kyiv, Ukraine.

An urgent task in the design of complex local energy supply systems (cluster) using renewable energy sources (RES) is to take into account the experience of operating specific types of equipment in real conditions. The paper considers the possibility of effective use as an element of the energy cluster of the buffer storage system of the heat pump system as a thermal energy accumulator to provide multi-purpose objects with thermal energy. The buffer storage is a part of the low-capacity system for obtaining heat energy, which is part of the general system (unit), which consists of a buffer storage of the heat carrier, a heat pump and fan coils. The structural diagram of the energy cluster and the place of the low-capacity thermal energy production system in it are given. The working layout of the experimental hydrothermal heat pump system developed and constructed at the Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, which includes a buffer storage device, is presented. The research methodology is described. The characteristics of the measuring equipment installed on the experimental setup, which was used to obtain data in the process of conducting research, are given. The results of research work, obtained in the course of theoretical calculations and conducted experimental studies of the effectiveness of the buffer storage of the hydrothermal heat pump system as a thermal energy accumulator, are outlined. The calculation of the conversion factor of the "water-to-water" heat pump in the heating system of a room with an area of up to 100 m² with the use of fan coils and buffer storage of thermal energy of different capacities is given. The calculation of the required volume of the heat carrier and the capacity of the buffer storage, per one kilowatt of produced thermal energy, was performed to ensure the autonomous operation of the heat pump system, where it performs the function of a battery and a collector of thermal energy at the same time. A sufficient volume of coolant and battery capacity per kilowatt of thermal energy produced by the heat pump to ensure stable operation of the hydrothermal heat pump system as a whole was determined. It has been experimentally confirmed and theoretically substantiated that the buffer storage of the heat pump system is a necessary element of the system, it performs both the function of a shock absorber and significantly increases the efficiency of the heat pump system as a whole. Including the buffer storage device, depending on the thermal load, it can work independently as an autonomous source of low-potential thermal energy. Conclusions were made that further research on the possibility of use as a source to maintain the necessary energy potential in the buffer storage of the heat pump system, the solar system for heating water, has a perspective. But it is relevant to carry out research on the comparison of the efficiency of the complex operation of the solar system for heating water and the heat pump, where the heat exchange takes place: first, in the circuit of the evaporator of the heat pump; secondly, in the circuit of the condenser of the heat pump. The work was carried out as part of the scientific research work: "Development of energy clusters to provide multi-purpose objects with electric and thermal energy using renewable and hydrogen energy technologies (code: "Energy-guarantor")"

Key words: heat pump, heat pump system, heat supply, fan coil, conversion factor

Перелік використаних скорочень та позначень

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ТН – тепловий насос

ТО – термоперетворювач опору

ПЗ – програмне забезпечення

ГВП – гаряче водопостачання

БДТЕ – безліч джерел теплової енергії

БТС – безліч технічних засобів

БС – безліч структур

φ – коефіцієнт перетворення теплоти (англ.

Coefficient of performance), коефіцієнт, що показує ефективність теплового насоса

Вступ. Підвищення енергетичної ефективності та необхідність ресурсозбереження є нагальними проблемами майже в усіх країнах світу. Для вирішення цих проблем останніми роками стає актуальною нова енергетична політика, яка ґрунтується на використанні розподіленої енергетики та створенні на її основі енергетичних кластерів.

Останнім часом відбувся великий прорив у створенні великих енергетичних систем з комплексним використанням традиційних та відновлюваних джерел енергії. Однак актуальним залишається питання забезпечення надійності гібридних систем при істотній варіативності параметрів природних носіїв енергії. Без вирішення цих завдань побудова комплексних енергетичних комплексів неможлива через різке зростання витрат, викликаних прийняттям неоптимальних рішень.

Основний недолік відновлюваної енергії – її непостійність. Виробництво і теплової, і електричної енергії енергетичними установками, що як джерело енергії використовують ВДЕ, залежить як від місця розміщення та умов експлуатації, так і від погодно-кліматичних умов, зміна яких має випадковий характер. Тому в локальних енергосистемах з ВДЕ є ризики енергопостачання споживачів, пов'язані з мінливістю енергоносія. Наслідки від цих ризиків полягають у високій імовірності порушення енергопостачання споживачів. Отже, важливим питанням стає розробка методики вибору оптимального поєднання ВДЕ з урахуванням випадкового характеру факторів, що впливають на стабільність отримання енергії від ВДЕ.

Питанням підвищення ефективності та надійності роботи комплексних енергетичних систем та її складовим елементам присвячена велика кількість досліджень. У роботі [1] розглянуто технології, методи та засоби перетворення нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії для отримання теплової та електричної енергії або нових видів палива. Дослідження ефективності комбінованого використання енергії вітру, Сонця і тепла Землі виконані авторами в роботі [2]. Методичні засади для оптимальної побудови енергетичних комплексів з використанням відновлюваних джерел енергії розглядаються в роботах [3, 4]. Розробленню математичної моделі роботи системи з кількома відновлюваними джерелами енергії присвячено роботи [5, 6]. Наукове обґрунтування залучення розумних мереж (Smart Grid) у систему управління комплексними енергосистемами на основі ВДЕ викладено в праці [7].

Водночас теоретичні та практичні методи побудови енергетичних комплексів з використанням відновлюваних джерел енергії в Україні досі не відпрацьовані.

В Інституті відновлюваної енергетики НАН України проводяться дослідження в галузі використання відновлюваних джерел енергії, широко ведуться роботи з дослідження джерел енергії та приладів для її перетворення, що можуть бути використані в умовах конкретного регіону, досліджуються особливості спільного використання

різних відновлюваних джерел енергії для роботи в єдиній системі та різноманітних систем її акумулювання.

Одним з високоефективних пристроїв перетворення низькопотенційної відновлюваної енергії є теплові насоси.

Водночас ефективність роботи теплонасосної системи суттєво залежить від температури на вході до випарника теплового насоса. Це обумовлює проведення широкого спектра досліджень щодо визначення оптимального поєднання в низькотемпературному контурі конденсатора теплового насоса його основних компонентів: самого відновлюваного джерела та системи відбору низькопотенційної теплової енергії, до складу якої входить мережа подачі теплоносія, насосне обладнання та буферний накопичувач теплонасосної системи.

Науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи з підвищення ефективності теплових насосів проводяться як в Україні, так і в інших країнах вже тривалий час. Перспективи застосування теплових насосів досліджені в роботах [8, 9, 10]. Аналіз ефективності використання теплового потенціалу доквілля та верхніх шарів земної кори наведено в роботах [12, 13]. У роботах [14, 15, 16] проведено оцінку ефективності теплових насосів різних типів. Авторами [17, 18] зроблено порівняльний енергетичний аналіз теплових насосів.

Очевидно, що пряме копіювання стандартних проєктів, відсутність науково обґрунтованого підходу до впровадження даних систем у конкретних умовах експлуатації можуть не тільки призвести до неоптимальних рішень, але й узагалі дискредитувати саму ідею впровадження теплонасосних технологій.

Постановка завдання. Об'єкт дослідження – процес теплообміну між випарником теплового насоса та буферним накопичувачем теплового насоса типу вода-вода.

Предмет дослідження – підвищення ефективності комплексної локальної системи (кластера) енергозабезпечення з використанням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) завдяки використанню буферного накопичувача в контурі випарника теплового насоса як акумулятора теплової енергії.

Метою роботи є аналіз термодинамічної ефективності теплонасосної системи; визначення оптимальних режимів роботи й конструктивних особливостей буферного накопичувача теплоносія, який використовується як акумулятор низькопотенційної теплової енергії в контурі випарника теплового насоса типу вода-вода.

Відповідно до поставленої мети дослідження мають бути вирішені такі завдання:

1. Обґрунтування структури енергетичного кластера та місця в ній системи акумулювання низькопотенційної теплової енергії.
2. Встановлення основних теплофізичних параметрів, що визначають ефективність системи акумулювання низькопотенційної теплової енергії.

3. Обґрунтування складу комплексу обладнання та вимірювальних приладів, що використовувалися для отримання даних у процесі проведення досліджень.
4. Створення методики проведення досліджень.
5. Узагальнення результатів, отриманих в ході теоретичних розрахунків і проведених експериментальних досліджень ефективності буферного накопичувача гідротермальної теплонасосної системи як акумулятора теплової енергії.
6. Виконання порівняльного аналізу ефективності використання гідротермальної теплонасосної системи з урахуванням роботи буферного накопичувача в різних конфігураціях.
7. Визначення перспективи подальших наукових розробок у цьому напрямі.

Виклад основного матеріалу

У методиці побудови енергетичних комплексів з використанням відновлюваних джерел енергії зазвичай головними критеріями вибору ВДЕ є: загальна потужність системи, вартість енергії, що виробляється, розміри й вартість застосовуваних енергоустановок, частка заміщення вуглеводневого палива та інше.

Ми проаналізували існуючі методики побудови цих систем. Насамперед тих, які стосувалися як методики вибору оптимального поєднання відновлюваних джерел

енергії, так і управління гібридними енергетичними системами з відновлюваними джерелами енергії [19].

Система зі змінною структурою (рис. 1) та відновлюваними джерелами енергії для забезпечення визначеної температури в процесі постачання теплоносія споживачам, як кортеж S , має вигляд:

$$S = \{\text{БДТЕ, БТС, БС}\}, \quad (1)$$

де БДТЕ – безліч джерел теплової енергії;

БТС – безліч технічних засобів;

БС – безліч структур.

Для об'єкта енергетики, що представлений у такому вигляді, також потрібна система управління, яка дає змогу вибрати найліпший варіант з можливих запропонованих залежно від потреб споживача, параметрів теплоносіїв системи й умов навколишнього природного середовища. Тобто дозволяє раціонально забезпечити з представлених множин вибір джерел енергії, технічних пристроїв та структури об'єкта.

Енергетичний кластер формується з окремих «юнітів», які мають самостійні елементи, та має змінну структуру, автономну та комбіновану форми живлення, з використанням можливостей розосередженої генерації й технологій «розумних мереж», будується за модульним принципом з можливістю масштабування до потреб споживача (рис. 1).

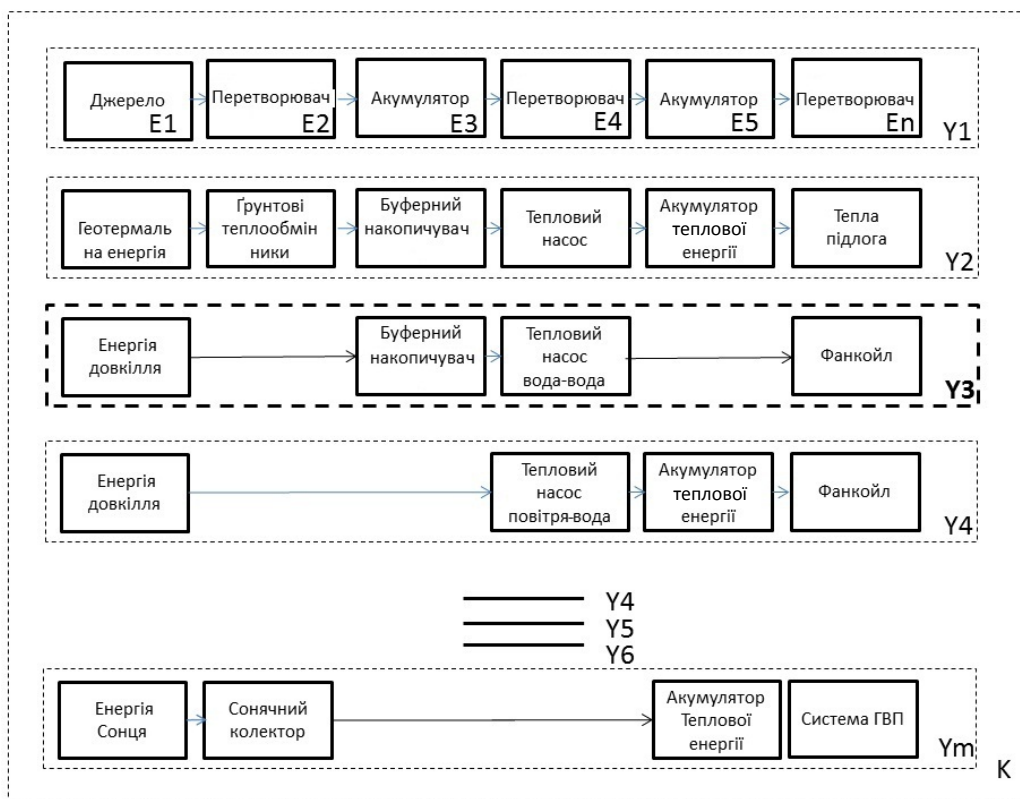


Рис. 1. Структурна схема енергетичного кластера генерування теплової енергії (K), який складається з безлічі структур (юнітів, $Y1 - Ym$), до складу кожного з яких входить безліч елементів (джерел теплової енергії та технічних засобів, $E1 - En$).

Fig. 1. Structural diagram of the energy cluster of thermal energy generation (K), which consists of many structures (units, $Y1 - Ym$), each of which includes many elements (sources of thermal energy and technical means, $E1 - En$)

У роботі розглядається можливість ефективного застосування як елемента енергетичного кластера, для забезпечення об'єктів багатобачного призначення тепловою енергією, малоємної системи отримання теплової енергії, що складається з буферного накопичувача теплоносія, теплового насоса та фанкойлів (Юніт – УЗ).

Для проведення досліджень теплових і гідродинамічних процесів в Інституті відновлюваної енергетики НАН України на прибудинковій ділянці корпусу 2, що розташований за адресою вул. Метрологічна, буд. 50, було створено експериментальну систему видобування геотермальних джерел енергії типу ГЦС (геотермальна циркуляційна система).

Основними фізичними параметрами для розрахунку гідротермальних теплонасосних систем є температура води на гирлі свердловини, яка для малих глибин (до 300 м) дорівнює температурі води водоносного горизонту, а також дебет свердловини, який повинен бути постійним (стабільним) при встановленому зниженні [21].

Експериментальна установка ІВЕ НАН України є теплообмінним пристроєм, який складається із двох свердловин, з'єднаних трубопроводами для циркуляції підземних вод між водоносним горизонтом та тепловим насосом, розташований у будівлі Інституту. Контур конденсатора теплового насоса з'єднано з фанкойлами, розташованими в офісному приміщенні будівлі. При цьому забезпечена конструктивна можливість підключення до контуру випарника теплового насоса буферного накопичувача теплової енергії, об'єм якого може

змінюватися залежно від завдань дослідження та потужності підключених приладів.

З метою проведення дослідження термодинамічної ефективності теплонасосної системи та визначення оптимальних режимів роботи й конструктивних особливостей буферного накопичувача теплоносія, що використовується як акумулятор низькопотенційної теплової енергії в контурі випарника теплового насоса типу вода-вода, в процесі дослідження, що проводилося, циркуляція теплоносія відбувалася тільки по малому контуру, між буферним накопичувачем та випарником теплового насоса. Як навантаження для теплового насоса використовувалися фанкойли. Буферний накопичувач теплоносія, тепловий насос та фітинги, що їх поєднують, складають елементи досліджуваної системи (рис. 2).

- Тепловий насос – холодильна машина типу вода-вода. Він забирає низькопотенційну енергію з навколишнього середовища за допомогою теплоносія, яким у нашому випадку є вода, й передає її з підвищеним потенціалом для забезпечення опалення або кондиціювання у приміщення за допомогою теплообмінних приладів.
- Фанкойл – теплообмінний прилад, який передає теплову енергію або холод від теплоносія (води) повітря приміщень.
- Буферний накопичувач теплової енергії – теплоізольована ємність, яка виконує роль акумулятора теплової енергії та стабілізатора теплових навантажень на систему. До акумулятора теплової енергії

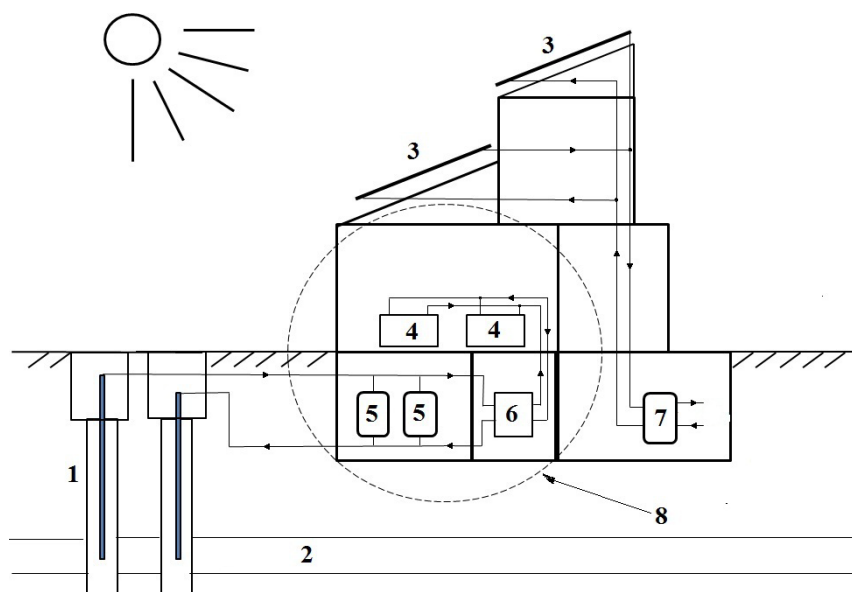


Рис. 2. Експериментальна гідротермальна теплонасосна система Інституту відновлюваної енергетики НАН України: 1 – свердловина; 2 – водоносний горизонт; 3 – сонячний колектор; 4 – фанкойл; 5 – буферний накопичувач теплоносія; 6 – тепловий насос; 7 – акумулятор теплової енергії; 8 – малоємнісна система отримання теплової енергії

Fig. 2. Experimental hydrothermal heat pump system of the Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine: 1 – well; 2 – aquifer; 3 – solar collector; 4 – fan coil; 5 – coolant buffer storage; 6 – heat pump; 7 – thermal energy accumulator; 8 – low-capacity heat energy production system

може бути підключено додаткове джерело теплової енергії для нагріву теплоносія при низьких температурах оточуючого середовища, коли ефективність теплового насоса істотно знижується.

Відповідно до поставленого завдання дослідження для вимірювань температури у контрольних точках системи були встановлені датчики температури (термоперетворювачі опору) ТСП-204. Термоперетворювачі опору ТСП-204 внесені до Державного реєстру засобів вимірювальної техніки України за номером У246-07. Робочий діапазон вимірюваних температур від -40 до $+270$ °С, показник теплової інерції не більше 6–8 с.

Датчики температури встановлені: на вході та виході з випарника й конденсатора теплового насоса. Також було встановлено пристрої для вимірювання температури повітря в підвальному приміщенні, де розташовані буферні накопичувачі теплоносія, в приміщенні де розташовані фанкойли, та на вулиці. Крім того, для вимірювання об'єму використаного теплоносія були встановлені лічильники потоку рідини NOVATOR ЛК-15Г. Поріг чутливості $0,015$ м³/год. Максимальний тиск – 1 МПа, температура – $0,1$ – 30 °С.

На рис. 3 представлено елементи теплонасосної системи, які входять до складу експериментальної установки, та вимірювальні пристрої, що були використані під час проведення дослідження.

Для перетворення даних з вимірювальних пристроїв на цифрову інформацію та її візуалізації для комфортного аналізу оператором застосовували вимірювач температури восьмиканальний І8 8УВ/10К-RS485-ІПІ-Щ. Інформація з вимірювача знімалася в автоматичному режимі

за допомогою перетворювача інтерфейсів ПІ RS 485/USB з часовим інтервалом у десять секунд. Для візуалізації отриманих з датчиків температури даних та їх архівації було використано програмне забезпечення ПЗ SSD v/3.7, встановлене на персональний комп'ютер.

Дослідження проводилися в два етапи, зі зміною ємкості (об'єму) буферного накопичувача. На першому етапі дослідження була використана ємкість об'ємом 1 м³, заповнена водою у кількості 900 л. На другому етапі дослідження була використана ємкість об'ємом 2 м³, заповнена водою у кількості 1800 л. В обох випадках навантаження теплового насоса залишалося незмінним. Було використано два фанкойли потужністю $2,5$ кВт. Максимальна температура нагріву теплоносія на виході з конденсатора теплового насоса була встановлена 43 °С.

На рис. 4 та рис. 5 представлено графіки коливань температур у контрольних точках системи буферний накопичувач – тепловий насос – фанкойл у процесі проведення першого та другого етапів дослідження.

Для визначення ефективності буферного накопичувача при роботі як акумулятора теплової енергії було розраховано такі параметри:

1. Теплова енергія, яка відводиться з теплового акумулятора при різних його об'ємах.
2. Теплова енергія, яка відводиться з теплового насоса при різних об'ємах теплового акумулятора.
3. Теплова енергія, яка підводиться до акумулятора від зовнішнього відновлюваного джерела в місці його розташування.

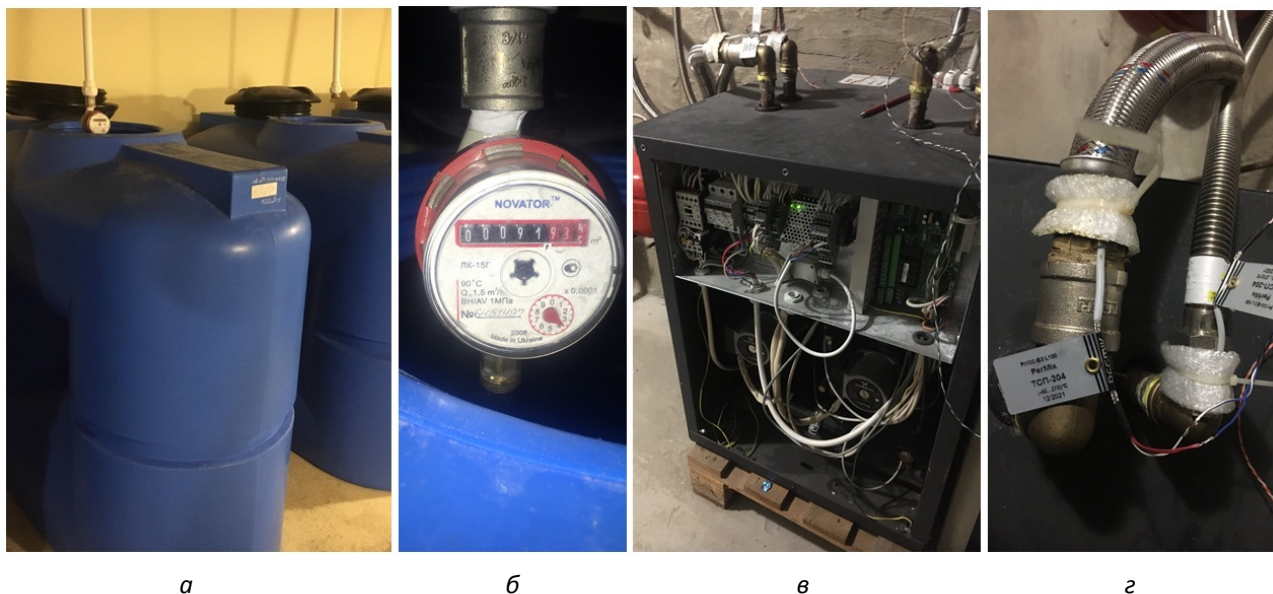


Рис. 3. Вимірювальні пристрої та елементи теплонасосної системи, які входять до складу експериментальної установки ІВЕ НАНУ: а – буферний накопичувач теплоносія; б – лічильник потоку рідини NOVATOR ЛК-15Г; в – тепловий насос вода-вода; г – термоперетворювачі опору ТСП-204, змонтовані на фітингах теплового насоса

Fig. 3 Measuring devices and elements of the heat pump system, which are part of the experimental installation of the Institute of Renewable Energy NAS of Ukraine: а – buffer storage of the heat carrier; б – heat meter NOVATOR LK-15G; в – water-water heat pump; г - Liquid flow meter TSP-204 mounted on heat pump fittings

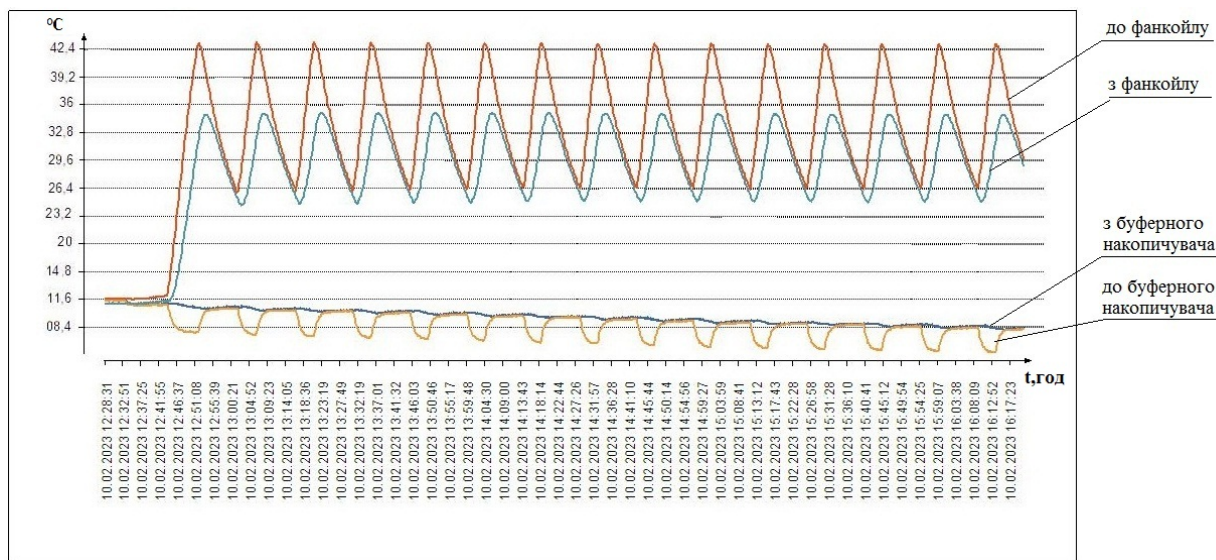


Рис. 4. Графік залежності температури в контрольних точках теплонасосної системи при використанні як акумулятора теплової енергії буферного накопичувача об'ємом 1 м³, заповненого водою у кількості 900 л

Fig. 4. Graph of temperature dependence at the control points of the heat pump system when using a buffer storage with a volume of 1 m³ filled with water in the amount of 900 liters as a heat energy accumulator

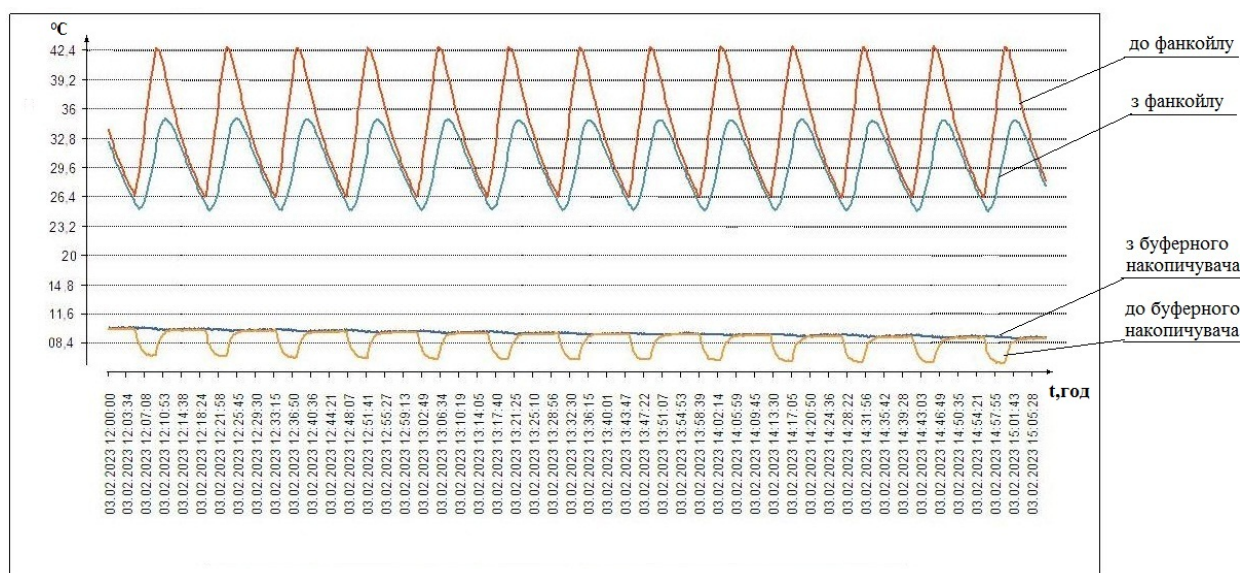


Рис. 5. Графік залежності температури в контрольних точках теплонасосної системи при використанні як акумулятора теплової енергії буферного накопичувача об'ємом 2 м³, заповненого водою у кількості 1800 л

Fig. 5. Graph of the temperature dependence at the control points of the heat pump system when using a buffer storage with a volume of 2 m³ filled with water in the amount of 1800 liters as a thermal energy accumulator

4. Коефіцієнт перетворення теплового насоса під час роботи в автономному режимі від теплового акумулятора різної ємності.
5. Об'єм акумулятора цієї конструкції, необхідний для стабільної роботи системи в автономному режимі на кожний кіловат виробленої теплової енергії тепловим насосом.

Експериментально отримані дані витрат теплоносія та значень температури в контрольних точках експериментальної системи під час автономної роботи теплового насоса на

максимальну загрузку від акумулятора теплової енергії різної ємності (900 та 1800 л) наведено в табл. 1.

Кількість теплової енергії Q (кВт), що виробляється за одиницю часу, визначається за співвідношенням:

$$Q = m \cdot C_v \cdot \Delta T / 3600, \quad (1)$$

де: C_v – питома масова теплоємність рідини [Дж / кг · К];

m – об'єм теплоносія, [м³];

ΔT – різниця температур теплоносія до і після віддачі теплової енергії [К].

Таблиця 1. Експериментально отримані дані витрат теплоносія та значень температури в контрольних точках експериментальної системи**Table 1. Experimentally obtained data on coolant consumption and temperature values at control points of the experimental system**

Номер та дата проведення дослідження	Кількість води в системі (л)	Контур теплового насоса	Витрати води (м³/год)	ΔT (°C)	Δt_1 (°C)
№1: 03.02.2023	900	випарник	1200	3	0,8
		конденсатор	350	13	0
№2: 10.02.2023	1800	випарник	1200	3	0,35
		конденсатор	350	13	0

* Δt_1 – падіння температури теплоносія в акумуляторі теплової енергії під час автономної роботи теплового насоса на максимальну навантаження, за годину

* Δt_1 – temperature drop of the heat carrier in the heat energy accumulator, during autonomous operation of the heat pump at maximum load, per hour

Результати розрахунку основних параметрів системи на основі експериментально отриманих даних, наведено в табл. 2.

Подібно до всіх інших холодильних машин, тепловий насос використовує механічну (електричну або іншу) енергію для реалізації термодинамічного циклу. Ця енергія витрачається на привід компресора. Основною характеристикою теплового насоса є коефіцієнт трансформації (коефіцієнт перетворення).

Коефіцієнт перетворення (φ_T) – це співвідношення теплової енергії, що відводиться з теплового насоса Q_1 , та електроенергії N , що споживається тепловим насосом.

$$\varphi_T = \frac{Q_1}{N} = \frac{(Q_2 + N)}{N} = \frac{T_2}{(T_2 - T_{11})}, \quad (2)$$

де: Q_1 – теплова енергія, що відводиться з теплового насоса, Вт;

N – потужність компресора теплового насоса, Вт;

Q_2 – теплова енергія, що підводиться до теплового насоса від низькопотенційного джерела;

T_2 – температура теплоносія на виході з конденсатора, К;

T_{11} – температура теплоносія на вході у випарник, К.

Дійсний коефіцієнт трансформації теплового насоса φ може мати вигляд

$$\varphi = \varphi_T \eta_{TH}, \quad (3)$$

де η_{TH} – коефіцієнт втрат, що враховує реальні процеси, які здійснюються робочим тілом в ТН [19].

Розрахункові дані коефіцієнта перетворення теплового насоса, отримані під час роботи в автономному режимі

Таблиця 2. Розрахункові дані ефективності теплонасосної системи та джерела теплової енергії**Table 2. Estimated data on the efficiency of the heat pump system and the source of heat energy**

Номер та дата проведення дослідження	Кількість теплоносія в акумуляторі (л)	Q_1 (Вт/год)	Q_2 (Вт/год)	Q_3 (Вт/год)	V_1 (м³)	V_2 (м³)
№1: 03.02.2023	900	5280,00	4180,00	741,95	5,07	1,21
№2: 10.02.2023	1800	5280,00	4128,00	1483,90	5,07	1,21

* Q_1 – теплова енергія, що відводиться з теплового насоса; Q_2 – теплова енергія, що підводиться до теплового насоса від низькопотенційного джерела; Q_3 – теплова енергія, що підводиться до акумулятора від зовнішнього відновлюваного джерела в місці його розташування; V_1 – необхідний об'єм теплового акумулятора для забезпечення роботи теплонасосної системи в автономному режимі заданої потужності; V_2 – необхідний об'єм теплового акумулятора для забезпечення роботи теплонасосної системи в автономному режимі, на 1 кВт потужності теплового насоса.

* Q_1 – thermal energy removed from the heat pump; Q_2 – thermal energy supplied to the heat pump from a low-potential source Q_3 – thermal energy supplied to the battery from an external renewable source in the city of its location; V_1 – the necessary volume of the heat accumulator to ensure the operation of the heat pump system in the autonomous mode of the given capacity; V_2 – the necessary volume of the heat accumulator to ensure the operation of the heat pump system in autonomous mode, per 1 kW of heat pump power.

від теплового акумулятора різної ємності, представлено на графіку (рис. 6).

Розрахунок проводився з урахуванням показників температури теплоносія на виході з конденсатора та на вході до випарника теплового насоса на відрізок часу, що дорівнював одній годині. Інформація про значення температури була отримана експериментально. Тривалість експерименту визначалася досягненням мінімальної температури подачі теплоносія у випарник, при якій гарантовано унеможлиблювалося його обмерзання та закупорювання льодяною сумішшю.

З розрахункових даних можна зробити висновок, що підвищення об'єму акумулятора подовжує час його роботи, але водночас на його ефективність впливає теплова потужність середовища, яке його оточує, що є особливістю акумулятора, розміщеного в приміщенні, розташованому нижче рівня землі.

Крім того, було проведено дослідження з визначення потужності середовища, в якому перебуває акумулятор теплової енергії, як джерела теплової енергії для регенерації (відновлення) його ємності.

Експериментально було встановлено, що після закінчення дослідження № 1 відновлення значення температури з позначки 8,6 до 11,1 °C відбулося за 3 год 30 хв, ($\Delta t_2 = 0,71$). Де, Δt_2 – відновлення температури теплоносія в акумуляторі теплової енергії в час, коли тепловий насос не працює, за годину.

На підставі розрахунків за формулою (1) встановлено, що об'єм акумулятора цієї конструкції необхідний для підтримання стабільної автономної роботи теплонасосної системи цієї конструкції в автономному режимі дорівнює 1,21 м³ на кожний кіловат виробленої теплової енергії тепловим насосом.

В табл. 3 наведені дані щодо необхідної кількості теплоносія для різних систем відбору низькопотенційної теплової енергії для теплових насосів типу вода-вода. Розрахунки проводилися з урахуванням використання: для ґрунтових зондів – теплообмінника у вигляді поліпропіленової труби діаметром 32 мм, – розміщених вертикально або горизонтально у ґрунті; для свердловин, якими розкрито водоносний горизонт, – поліпропіленової труби діаметром 32 мм; для акумуляторів теплової енергії, розміщених нижче рівня землі, – ємкості, виготовленої з поліпропілену, об'ємом 1 м³.

Порівняльний аналіз отриманих даних свідчить, що використання буферного накопичувача в контурі випарника теплонасосної системи як теплового акумулятора для автономної роботи конструктивно є недоцільним, оскільки він займає велику площу та потребує значного обсягу теплоносія для ефективної роботи. Водночас, враховуючі можливі зміни дебіту при роботі гідротермальних циркуляційних систем, використання буферного накопичувача має суттєве значення для забезпечення стабільності температури теплоносія на вході у випарник теплового насоса та підтримання постійного високого значення коефіцієнта трансформації системи.

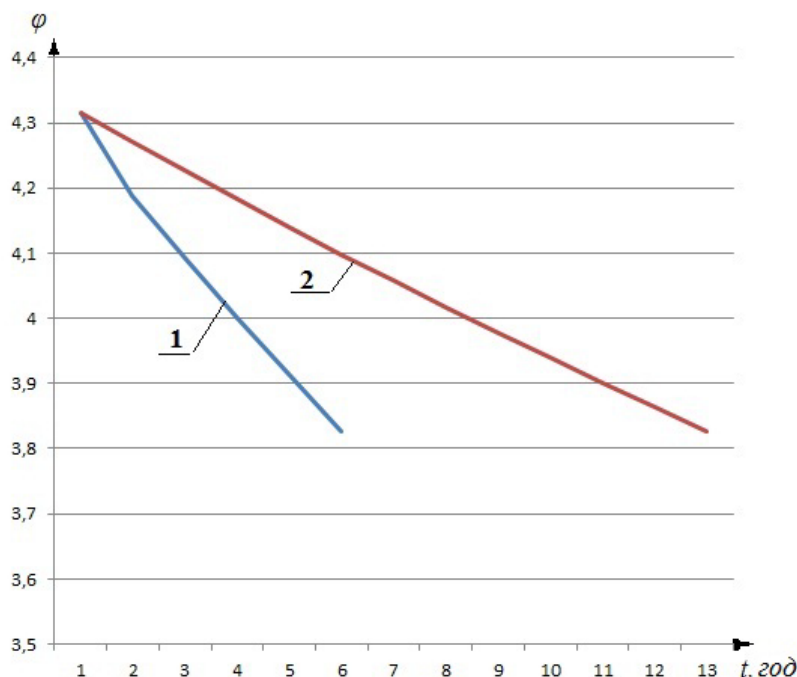


Рис. 6. Графік залежності коефіцієнта перетворення теплонасосної системи в автономному режимі від тривалості роботи: 1 – як акумулятор використана ємність об'ємом 1 м³, заповнена водою у кількості 900 л; 2 – як акумулятор використано дві ємкості об'ємом 2 м³, заповнені водою у кількості 1800 л

Fig. 6. The graph of the dependence of the conversion factor of the heat pump system in autonomous mode on the period of operation: 1 – a container with a volume of 1 m³ filled with water in the amount of 900 liters was used as an accumulator; 2 – two containers with a volume of 2 m³ filled with water in the amount of 1800 liters were used as a battery

Таблиця 3. Показники щодо необхідної кількості теплоносія в колекторі та площі для його розміщення в системі відбору низькопотенційної теплової енергії для теплових насосів типу вода-вода потужністю 5/10/50 кВт по теплу**Table 3. Indicators regarding the required amount of coolant in the collector and the area for its placement in the low-potential thermal energy selection system for water-to-water heat pumps with a capacity of 5/10/50 kW by heat**

№ з. п.	Система	Довжина труби (м)	Кількість ємкостей (шт.)	Кількість теплоносія (л)	Необхідна площа поверхні під теплообмінник (м²)
1	Горизонтальні ґрунтові зонди	200/400/2000	-----	250/470/2500	175/330/1750
2	Вертикальні ґрунтові зонди	160/300/1600	-----	100/187/1000	5/25/125
3	Свердловини, якими розкрито водоносний горизонт	100/100/100	-----	125/125/125	5/5/5
4	Ємкості, розміщені нижче рівня землі	-----	5/10/50	3200/6000/32000	20/30/200

На основі експериментально отриманих даних та аналітичних розрахунків доведено, що тепловий акумулятор цієї конструкції, наповнений теплоносієм у кількості 300 л, може працювати з коефіцієнтом перетворення теплового насоса потужністю 5 кВт не менше ніж 3,6 протягом однієї години до досягнення мінімальної встановленої температури теплоносія 3 °C на вході до випарника. Отже, можна зробити висновок, що для підтримання стабільної роботи гідротермальної циркуляційної системи з коефіцієнтом перетворення не менше 3,6 необхідно встановлювати буферну ємність з урахуванням співвідношення на 1 кВт теплової енергії, що виробляє теплонасосна система – 60 л теплоносія в буферній ємності цієї конструкції.

Доцільно використовувати для відновлення ємності акумулятора теплової енергії крім геотермальної енергії інші джерела відновлюваної енергії, що входять до енергетичного кластера.

Висновки:

1. Теоретично обґрунтовано, що малоємнісна система акумуляування теплової енергії, до якої входить буферний накопичувач теплоносія, тепловий насос та фанкойли, може ефективно застосовуватися як самостійний елемент енергетичного кластера для забезпечення об'єктів багатоцільового призначення тепловою енергією.
2. Експериментально підтверджено, що коефіцієнт перетворення теплового насоса вода-вода в системі опалення з використанням фанкойлів та буферного накопичувача теплової енергії як акумулятора теплової енергії, що працює автономно, є високим та дорівнює 4 (чотирьом), але суттєво залежить від теплового навантаження, часу роботи та ємності буферного накопичувача.
3. Експериментально підтверджено, що для стабільної роботи системи в автономному режимі необхідно на кожний кіловат виробленої теплової енергії тепловим насосом встановлювати один акумулятор низькопотенційної теплової енергії, заповнений тепло-

носієм (водою) у кількості 1210 л. Слід враховувати, що на ефективність акумулятора має вплив його конструкція (форма та матеріал виготовлення).

4. Аналітично доведено, що доцільно при застосуванні гідротермальних теплонасосних систем потужністю до 50 кВт використовувати буферні накопичувачі у співвідношенні: на 1 кВт теплової енергії, що виробляє теплонасосна система – буферний накопичувач, заповнений теплоносієм (водою) у кількості не менше 60 л.
5. Мають перспективу подальші дослідження щодо можливості застосування сонячної системи нагріву води для інтенсифікації регенераційних процесів у теплому акумуляторі з метою підтримання оптимальної температури на вході до випарника теплового насоса та забезпечення максимального коефіцієнта перетворення системи. Також є актуальними проведення досліджень з порівняння ефективності комплексної роботи сонячної системи для нагріву води та теплового насоса, де теплообмін відбувається: по-перше, в контурі випарника теплового насоса; по-друге, в контурі конденсатора теплового насоса.

ПОСИЛАННЯ

1. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії. Київ.: НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка». 2012. 489 с.
2. Кудря С. О., Морозов Ю. П., Кузнецов М. П. Дослідження ефективності комбінованого використання енергії вітру, сонця і теплоти землі для отримання водню при електролізі води. Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях: Тези доп. наукової звітної сесії НАН України. 2013. Київ.
3. Зур'ян О. В. Комбіновані енергосистеми для ефективного отримання екологічно безпечної енергії. Екологія та промисловість. 2016. № 3. С. 96–100.

4. Тимчук С. О. Прийняття оптимальних рішень при керуванні гібридними електричними мережами з відновлювальними джерелами енергії. /С. О. Тимчук, В. В. Шендрик, С. О. Шендрик, О. В. Шулима. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2016. № 2 (34). С. 55–61.
5. Зур'ян О. В. Екологічно безпечні відновлювані джерела отримання теплової енергії. Укр. Держ. геологорозвідувальний ін-т [Електронний ресурс]: автор дисертації Зур'ян О. В. Режим доступу: http://www.niiep.kharkov.ua/sites/default/files/dis_Zurian.pdf
6. Tiba C., Candeias A.L.B., Fraidenraich N. et al. A GIS-based decision support tool for renewable energy management and planning in semi-arid rural environments of northeast of Brazil. *Renewable Energy*. 2010. № 35 (12). Pp. 2921–2932.
7. Dagdougui H., Minciardi R., Ouammi A. et al. A dynamic optimization model for smart micro-grid: integration of a mix of renewable resources for a green building. *Proceedings of the 2010 International Congress on Environmental Modelling and Software*. Canada. Ottawa. 2010.
8. Безродний М. К. Пуховий І. І., Кутра Д. С. Теплові насоси та їх використання: навч. посіб. К. НТУУ «КПІ». 2013. 312 с.
9. Долинский А. А., Драганов Б. Х. Тепловые насосы в системе теплоснабжения зданий. *Промышленная теплотехника*. 2008. Т. 30. № 6. С. 71–83.
10. Кудря С. О. Відновлювані джерела енергії. ІБЕ НАН України. Київ. 2020. 354 с.
11. Lund J., Sanner B., Rybach L. Curtis R., Hellstrom G. Geothermal (ground-source) heat pumps a world overview. *GHC bulletin*. 2004. Vol. 9. Pp. 1–10.
12. Морозов Ю. П., Чалаєв Д. М., Ніколаєвська Н. В., Добровольський М. П. Оцінка ефективності використання теплового потенціалу доквілля та верхніх шарів Землі України. *Відновлювана енергетика*. 2019. № 4 (63). С. 80–88. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4\(63\).80-88](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4(63).80-88)
13. Zhu Ke, Blum Philipp, Ferguson Grant, Balke Klaus-Dieter, Bayer Peter. The geothermal potential of urban heat islands. 2010. *Environ. Res. Lett.* No. 5. Pp. 1–6. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/6/1/019501>
14. Морозов Ю. П. та ін. Енергетична ефективність використання перших від поверхні водоносних горизонтів для тепло- і холодопостачання /Ю. П. Морозов, А. А. Баріло, Д. М. Чалаєв, М. П. Добровольський. *Відновлювана енергетика*. 2019. № 2. С. 70–78. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2\(57\).70-78](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57).70-78)
15. Zurian O. V. Comparison of efficiency of geothermal and hydrothermal energy systems. *XIX International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. Renewable Energy Sources and Clean Tech.* Varna. Bulgaria. 2019. С. 83–90. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/4.1/S17.011>
16. Малкін Е. С., Кулінко Є. О. Перспективи та аспекти застосування систем теплохолодопостачання, які використовують приповерхневі шари води в якості теплового акумулятора. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. 2014. № 17. С. 63–69.
17. Denisov O. I. Comparative energy analysis of heat pumps and traditional heating systems. *Tekhnicheskaya teplofizika i promyshlennaya teploenergetika. Ukraine*. 2010. Vol. 2, Pp. 22–34.
18. Зур'ян О. В., Олійніченко В. Г. Гідротермальна система отримання теплової енергії, фізичні процеси, ефективність. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2021. № 4. С. 40–46. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-157-4-40-46>
19. Зур'ян О. В. Експериментальні дослідження теплового режиму гідротермальної теплонасосної системи. *Відновлювана енергетика*. 2021. 4 (67). С. 77–89. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4\(67\).77-89](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4(67).77-89)
20. Антипова Е. И. Исследование и разработка экспертной системы определения оптимального состава оборудования комбинированной системы энергообеспечения жилого помещения с использованием возобновляемых источников энергии / Е. И. Антипова. Алматы. 2014. 54 с.
21. Zurian O. Barilo A. Impact of the natural temperature regime of the upper layers of Earth on efficiency of a hydrothermal heat pump system. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2022. Vol 31 No 3. P. 575–584 <https://doi.org/10.15421/112254>

REFERENCES

1. Kudria S. O. Netradytsiini ta vidnovliuvani dzherela enerhii. [Non-traditional and renewable energy sources] Kyiv.: NTUU «KPI» «Politehnika». 2012. 489 с.
2. Kudria S. O., Morozov Yu. P., Kuznietsov M. P. Doslidzhennia efektyvnosti kombinovanoho vykorystannia enerhii vitru, sontsia i teploty zemli dlia otrymannia vodniu pry elektrolizi vody. Voden v alternatyvnykh enerhetytsi ta novitnikh tekhnolohiiakh [Research on the effectiveness of the combined use of wind, sun and earth's heat to obtain hydrogen during water electrolysis. Hydrogen in alternative energy and the latest technologies]: Tezy dop. naukovoi zvitnoi sesii NAN Ukrainy. 2013. Kyiv.
3. Zurian O. V. Kombinovani enerhosystemy dlia efektyvnoho otrymannia ekolohichno bezpechnoi enerhii. [Combined energy systems for efficient production of environmentally safe energy] *Ekolohiia ta promyslovist*. 2016. № 3. С. 96–100.

4. Tymchuk S. O. Pryiniattia optymalnykh rishen pry keruvanni hibrydnymy elektrychnymy merezhamy z vidnovliuvannykh dzherelamy enerhii [Making optimal decisions when managing hybrid electrical networks with renewable energy sources]. /S. O. Tymchuk, V. V. Shendryk, S. O. Shendryk, O. V. Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy. 2016. №2 (34). С. 55–61.
5. Tymchuk S. O. Pryiniattia optymalnykh rishen pry keruvanni hibrydnymy elektrychnymy merezhamy z vidnovliuvannykh dzherelamy enerhii. [Environmentally safe renewable sources of heat energy] /S. O. Tymchuk, V. V. Shendryk, S. O. Shendryk, O. V. Shulyma. Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy http://www.niiep.kharkov.ua/sites/default/files/dis_Zurian.pdf
6. Tiba C., Candeias A.L.B., Fraidenraich N. et al. A GIS-based decision support tool for renewable energy management and planning in semi-arid rural environments of northeast of Brazil. *Renewable Energy*. 2010. № 35 (12). Pp. 2921–2932.
7. Dagdougui H., Minciardi R., Ouammi A. et al. A dynamic optimization model for smart micro-grid: integration of a mix of renewable resources for a green building. *Proceedings of the 2010 International Congress on Environmental Modelling and Software*. Canada. Ottawa. 2010.
8. Bezrodnyi M. K. Pukhovyi I. I., Kutra D. S. Teplovi nasosy ta yikh vykorystannia. [Heat pumps and their use]: navch. posib. K. NTUU «KPI». 2013. 312 c.
9. Dolynskyi A. A., Drahanov B. Kh. Teplovye nasosy v systeme teplosnabzheniya zdanyi. [Heat pumps in the heat supply system are installed] *Promishlennaia teplo-tekhnika*. 2008. T. 30. № 6. Pp. 71–83.
10. Kudria S.O. Vidnovliuvani dzherela enerhii. [Renewable energy sources]. IVE NAN Ukrainy. Kyiv. 2020. 354 p.
11. Lund J., Sanner B., Rybach L. Curtis R., Hellstrom G. Geothermal (ground-source) heat pumps a world overview. *GHC bulletin*. 2004. Vol. 9. P. 1–10.
12. Morozov Yu. P., Chalaiev D. M., Nikolaievskaya N. V., Dobrovolskyi M. P. Otsinka efektyvnosti vykorystannia teplovoho potentsialu dokillia ta verkhnikh shariv Zemli Ukrainy. [Evaluation of the effectiveness of the use of the thermal potential of the environment and the upper layers of the Earth of Ukraine]. *Vidnovliuvana enerhetyka*. 2019. № 4 (63). P. 80–88. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4\(63\).80-88](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4(63).80-88)
13. Zhu Ke, Blum Philipp, Ferguson Grant, Balke Klaus-Dieter, Bayer Peter. The geothermal potential of urban heat islands. 2010. *Environ. Res. Lett.* No. 5. P. 1–6. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/6/1/019501>
14. Morozov Yu. P. et al. Enerhetychna efektyvnist vykorystannia pershykh vid poverkhni vodonosnykh horyzontiv dlia teplo- i khladopostachannia. [Energy efficiency of using the first aquifers from the surface for heating and cooling] /Yu. P. Morozov, A. A. Barylo, D. M. Chalaiev, M. P. Dobrovolskyi. *Vidnovliuvana enerhetyka*. 2019. № 2. P. 70–78. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2\(57\).70-78](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57).70-78)
15. Zurian O. V. Comparison of efficiency of geothermal and hydrothermal energy systems. XIX International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. *Renewable Energy Sources and Clean Tech.* Varna. Bulgaria. 2019. C. 83–90. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/4.1/S17.011>
16. Malkin E. S., Kulinko Ye. O. Perspektyvy ta aspekty zastosuvannia system teplokhodopostachannia, yaki vykorystovuiut prypoverkhnevi shary vody v yakosti teplovoho akumulatora. [Prospects and aspects of the application of heat and cold supply systems that use near-surface layers of water as a heat accumulator]. *Ventyliatsiia, osvittennia ta teplohozopostachannia*. 2014. № 17. P. 63–69.
17. Denisov O. I. Comparative energy analysis of heat pumps and traditional heating systems. *Tekhnicheskaya teplofizika i promyshlennaya teploenergetika*. Ukraine. 2010. Vol. 2. Pp. 22–34.
18. Zurian O. V., Oliinichenko V. H. Hidrotermalna systema otrymannia teplovoi enerhii, fizychni protsesy, efektyvnist. [Hydrothermal system for obtaining thermal energy, physical processes, efficiency]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. 2021. № 4. P. 40–46. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-157-4-40-46>
19. Zurian O. V. Eksperymentalni doslidzhennia teplovoho rezhymu hidrotermalnoi teplonasosnoi systemy. [Experimental studies of the thermal regime of the hydrothermal heat pump system]. *Vidnovliuvana enerhetyka*. 2021. 4 (67). 77–89. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4\(67\).77-89](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4(67).77-89)
20. Antypova E. Y. Yssledovanye y razrabotka ekspertnoi systemy opredeleniya optymalnogo sostava oborudovaniya kombynyrovannoi systemy enerhosnabzheniya zhyloho pomeshcheniya s yspolzovaniem vozobnovliaemykh ystochnykov enerhyi. [Research and development of an expert system for determining the optimal equipment composition of a combined residential energy supply system using renewable energy sources]. Алматы. 2014. 54 p.
21. Zurian O. Barilo A. Impact of the natural temperature regime of the upper layers of Earth on efficiency of a hydrothermal heat pump system. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2022. Vol 31 No. 3. P. 575–584 <https://doi.org/10.15421/112254>