

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ ТА ЕКОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ВПРОВАДЖЕННЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ТЕПЛОНАСОСНОЇ СИСТЕМИ

Зур'ян О.В.

Інститут відновлюваної енергетики Національної академії наук України
вул. Гната Хоткевича, 20А, 02094, м. Київ
alexey_zuryan@ukr.net

Вирішення проблем екології, доступу до енергоресурсів, захисту здоров'я, запобігання змінам клімату можливе шляхом декарбонізації економіки і переходу до чистих джерел енергії – сонця, вітру, малої гідроенергетики, геотермальної енергії, теплоти навколишнього середовища, «зеленого» водню. З усіх відновлюваних джерел енергії найбільш стабільною є низькопотенційна геотермальна теплова енергія приповерхневих шарів Землі. З різноманітних систем перетворення якої, самими розповсюдженими, є теплонасосні системи з теплообмінниками змонтованими у ґрунті горизонтально або встановленими вертикально у свердловини. Метою даного дослідження є визначення економічних та екологічних показників ефективності геотермальної теплонасосної системи (ГеоТНС) виконаних на основі даних отриманих для конкретної будівлі лабораторного комплексу м. Чорнобиль (Україна). Встановлено, що необхідна потреба в опаленні будівлі на рік складає 75 000 кВт*год, а потреба в охолодженні 45 000 кВт*год. Для забезпечення опалення та охолодження будівлі запропонована ГеоТНС, що має два теплових насоса загальною потужністю 40 кВт поєднаних з геотермальним теплообмінником. Моделювання дозволило отримати імовірнісний розподіл капітальних витрат на ГеоТНС із середнім значенням 1280 млн. грн. Встановлено, що підземна частина системи ГеоТНС становить 35% від загальних капітальних витрат і тому є одним з основних фактором витрат. Виконано порівняльний економічний аналіз ГеоТНС з референтною технологією теплопостачання та кондиціювання будівлі, яка складається з чиллерів (компресорних холодильних установок) для охолодження та електричних котлів для опалення. Встановлено, що незважаючи на 30% вищі капітальні витрати системи ГеоТНС від референтної, середній термін її окупності становить близько 2,2 роки завдяки меншим витратам, пов'язаним як з меншими витратами на опалення так і суттєвою мірою з прямим охолодженням, що призводить до зменшення витрат на електроенергію на 80%. Розраховано, що в порівнянні з референтною системою, ГеоТНС досягає зменшення викидів CO₂ близько 30 т на рік, що демонструє потенційні економічні та екологічні переваги ГеоТНС в Україні. Разом з тим потребують проведення подальших досліджень щодо обґрунтування переваги ГеоТНС по відношенню до відкритих геотермальних систем. Також для ефективного використання низько потенційної енергії приповерхневих шарів Землі як природного акумулятора теплоти необхідно проведення попередніх гідрогеологічних досліджень та якісне вивчення як існуючого антропогенного навантаження так і геоморфологічних, геологічних та гідрогеологічних параметрів ділянки проведення бурових робіт. *Ключові слова:* акумулявання теплової енергії, низькопотенційна геотермальна енергія, опалення та охолодження, відновлювана енергетика, економічний аналіз, екологічний аналіз.

Technical-economic and environmental analysis of implementation of geothermal heat pump system. Zurian O.

Solving the problems of ecology, access to energy resources, health protection, and prevention of climate change is possible through decarbonization of the economy and transition to clean energy sources – sun, wind, small hydropower, geothermal energy, environmental heat, “green” hydrogen. Of all renewable energy sources, the most stable is the low-potential geothermal heat energy of the near-surface layers of the Earth. Of the conversion systems, the most widespread are heat pump systems with heat exchangers mounted horizontally in the soil or installed vertically in wells. The purpose of this study is to determine the economic and environmental indicators of the effectiveness of the geothermal heat pump system (GeoHPS) performed on the basis of data obtained for a specific building of the laboratory complex in Chernobyl (Ukraine).

It was established that the required heating requirement of the building is 75,000 kWh per year, and the cooling requirement is 45,000 kWh. To ensure heating and cooling, GeoHPS is proposed, which has two heat pumps with a heat capacity of 40 kW connected to a geothermal collector with a cold capacity of 30 kW. Modeling makes it possible to obtain the probability distribution of capital costs for GeoHPS with an average value of UAH 1, 280 million. The underground part of the GeoHPS system requires about 35% of capital costs and is therefore one of the main cost factors after the heat pump. In addition, GeoHPS is compared with a reference technology for building heating and air conditioning, which consists of chillers (compressor refrigeration units) for cooling and heating with electric circuits. Despite the 30% higher capital costs of the GeoHPS system than the reference system, its average payback period is about 2.2 years due to lower costs associated with both heating and, to a significant extent, direct cooling. The most effective supply option is direct cooling with the help of GeoHPS, which leads to a reduction in electricity costs by 80%. Compared to the reference system, GeoHPS achieves a reduction in CO₂ emissions of about 30 tons per year, which clearly demonstrates the potential economic and environmental benefits of GeoHPS in Ukraine. At the same time, further research is needed to substantiate the superiority of GeoHPS in relation to open geothermal systems. For effective use of the surface layers of the Earth as a natural accumulator of thermal energy, it is necessary to conduct preliminary hydrogeological studies and a qualitative study of both the existing anthropogenic load and the geomorphological, geological and hydrogeological parameters of the drilling site. *Key words:* thermal energy storage, low-potential geothermal energy, heating and cooling, renewable energy, economic analysis, environmental analysis.

Постановка проблеми. Основні принципи сталого розвитку людства, проголошені ООН, значною мірою базуються на використанні відновлюваних джерел енергії – це питання екології, доступу до енергоресурсів, захисту здоров'я, запобігання змінам клімату. Вирішення цих і інших проблем можливе шляхом декарбонізації економіки і переходу до чистих джерел енергії – сонця, вітру, теплоти навколишнього середовища, «зеленого» водню. Для України ці питання набувають особливої гостроти в умовах відбудови економіки та досягнення енергетичної безпеки.

У регіонах з помірним кліматом, таких як Центральна та Північна Європа, використання та акумулювання теплової енергії ґрунту нижче нейтрального шару є відомою технологією для забезпечення будівель великими обсягами опалення та охолодження. Геотермальна теплонасосна системи (ГеоТНС) долає сезонну невідповідність між температурою навколишнього середовища та потребою будівлі в опаленні або охолодженні. ГеоТНС – це двонаправлена система з відкритим контуром, яка використовує щонайменше одну або декілька свердловин з встановленими у них теплообмінниками для активного накопичення надлишкової теплоти влітку і холоду взимку. Взимку теплоносій, що циркулює між ґрунтовим теплообмінником та тепловим насосом відбирає низькопотенційну теплову енергію у ґрунту та направляє її до випарника теплового насоса, після чого тепловий насос через контур конденсатора перекачує отриману від ґрунту теплову енергію до будівлі, але з більшим температурним потенціалом, після чого цикл повторюється. Влітку теплоносій що циркулює в ґрунтових теплообмінниках піднімається з свердловини для охолодження будівлі. У більшості випадків рівень температури є достатнім для прямого охолодження без застосування теплового насоса. Однак теплові насоси також можуть використовуватися для активного охолодження. Надлишкове тепло, отримане в процесі охолодження, повертається в через той же теплообмінник у ґрунт.

Така система дійсно має теплоенергетичні переваги в порівнянні з референтними технологіями, разом з тим постає питання необхідності в одержанні більш детальної інформації щодо техніко-економічної та екологічної ефективності впровадження геотермальних теплонасосних систем та обґрунтуванні шляхів їх оптимізації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи щодо використання низькопотенційної теплової енергії приповерхневих шарів ґрунту за допомогою теплових насосів проводяться як в Україні так і світі вже тривалий час [1, 2, 3, 4]. Відомо, що надлишкове тепло отримане в процесі охолодження можливо зберігати в ґрунті [5, 6, 7]. Дослідження щодо встановлення теплового балансу в ґрунті під

час експлуатації ГеоТНС описані в роботах [8, 9, 10]. Оцінка ефективності використання теплового потенціалу доквілля та верхніх шарів Землі України виконана авторами [10, 11, 12]. Техніко-економічний аналіз впровадження теплонасосних систем з геотермальними теплообмінниками було висвітлено в роботах [13, 14, 15, 16]. Більшість систем даного типу в Європі є неглибокими та працюють з глибинами свердловин до 150 м [17, 18]. Вони класифікуються як низькотемпературні. Вважається, що ГеоТНС є найбільш економічно ефективною та екологічно чистою системою отримання теплової енергії для будівель з високим і постійним попитом на енергію протягом року, таких як офіси, аеропорти, університети, торгові центри, лікарні [19, 4, 18, 20, 21].

Окрема увага при дослідженні ефективності теплонасосних систем з ґруновими теплообмінниками встановленими у свердловини приділялась екологічній безпеці. Вплив на доквілля при використанні геотермальних свердловин в залежності від місця їх розташування розглядався дослідниками в роботах [22, 23, 24, 25].

Формулювання мети дослідження. Для впровадження ГеоТНС інвестиції в дану технологію повинні мати позитивний економічний ефект порівняно зі звичайними, а в подальшому й іншими технологіями сталого постачання. Однак детальні економічні дослідження щодо ГеоТНС публікуються рідко [18]. Оцінка економічних даних у більшості випадків є непрозорою або вже застарілою. Крім того, застосовані методи майже не описані і недостатньо обговорюються для реконструкції.

Однак комплексна техніко-економічна та екологічна оцінка є необхідною для того, щоб переконати інвесторів та осіб, які приймають рішення, у позитивному впливі ГеоТНС у регіонах, де вона ще не є поширеною. Таким чином, це дослідження зосереджується на техніко-економічній та екологічній ефективності референтного прикладу.

ІПБ АЕС НАНУ м. Чорнобиль стояв перед вибором: використовувати компресійні чиллери для охолодження та електричні котли для автономного тепlopостачання відновленого лабораторного корпусу чи інтегрування пристрої та систем, що працюють за рахунок відновлювальних джерел енергії, а саме ГеоТНС. Таким чином, метою дослідження є порівняння за оціночними економічними показниками поточної технології енергопостачання, що складається з компресійних холодильних установок і електричного котла, далі названою еталонною технологією и технології ГеоТНС за період спостереження 10 років. Чутливість різних витрат на компоненти ГеоТНС, що визначають капітальні витрати, визначається за допомогою моделювання методом Монте-Карло з урахуванням невизначеності вхідних параметрів. Крім того, аналіз чутливості надає інформацію про найбільш важливі параметри для капітальних витрат. Оцінені екологічні переваги

досліджуваних ГеоТНС під час експлуатації проілюстровані на основі річного зменшення викидів CO₂ за рік. Також, результати цього дослідження порівнюються з економічними показниками існуючих систем централізованого теплозабезпечення, та автономних котелень на твердому паливі та природньому газі.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Будівля лабораторний комплексу входить до комплексу окремих будівель та прибудов що використовуються Інститутом проблем безпеки атомних електростанцій НАН України, що розташовані в м. Чорнобиль.

При проведенні вивчення об'єкту виконано комплекс робіт, який включав:

- збір даних щодо діючої системи опалення, кондиціонування та вентиляції, яка використовується на підприємстві, їх технічних характеристик та особливостей роботи.

- збір даних, щодо існуючих витрат підприємства на опалення, гаряче водопостачання та електричну енергію.

- збір даних, щодо геопросторових даних об'єкта що досліджується та визначення відновлюваних джерел енергії які є найбільш доцільними для використання з урахуванням його конкретного місця розташування.

- аналіз отриманих даних з метою виявлення технічних можливостей для інтегрування в діючу систему опалення, кондиціонування та вентиляції виробничих приміщень підприємства пристроїв та систем, що працюють за рахунок відновлювальних джерел енергії;

- розрахунок технічних характеристик систем та пристроїв, які пропонуються для інтегрування в діючу систему опалення, кондиціонування та вентиляції для зменшення енерговитрат підприємства;

- економічне обґрунтування доцільності впровадження запропонованих систем та пристроїв, що працюють за рахунок відновлювальної енергії;

- складання звіту про виконану роботу та передача його замовнику.

Вибір відновлюваного джерела з метою енергозабезпечення вибраного об'єкту виконано методом порівняння та аналогії. Розрахунки потужностей на даному етапі робіт виконано спрощеним методом. Для порівняння ефективності запропонованих систем вибрано традиційне автономне опалення електричними котлами.

Будівля лабораторного комплексу загальною площею 500 м² складається з підвального приміщення, двох поверхів та технічного приміщення даху. Висота стелі в приміщеннях 2,5 м. Фасад будівлі розташований на південь, дах похилий двоскатний. Будинок відключений від система центрального опалення та гарячого водопостачання, магістральні труби та конвектори централізованого опалення демонтовані. Планується перебудова внутрішніх

приміщень та заміна даху, Автономна котельня та тепловий пункт будівлі відсутні. Біля будівлі є вільна територія загальною площею 600 м² огорожена металевим забором. Параметри, що визначають опалення та охолодження будівлі наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри, що визначають опалення та охолодження будівлі лабораторного корпусу

Параметр	Значення
Опалювальна площа (м ²)	500
Охолоджувана площа (м ²)	250
Теплова потужність (кВт)	40
Холодильна потужність (кВт)	25
Потреба в потужності для обігріву приміщення (Вт/м ²)	80
Потреба в потужності для охолодження приміщення (Вт/м ²)	100
Потреба в опаленні на рік (кВт*год)	72 000
Потреба в охолодженні на рік (кВт*год)	45 000

Відповідно до даних таблиці 1, для гарантованого теплозабезпечення будинку підприємства необхідно встановити тепловий насос потужністю не менше 40 кВт. Тому було запропоновано встановлення двох теплових насосів типу Вода-Вода по 20 кВт кожний, які для забезпечення комфортних умов перебування людей у приміщенні будуть працювати одночасно, а при виході із ладу одного з них інший буде підтримувати достатню температуру у системі теплозабезпечення необхідний час відновлення роботи обладнання для недопущення розморожування системи опалення. Теплові насоси типу Повітря-Повітря та Повітря-Вода не пропонуються так як мають суттєво нижчий коефіцієнт перетворення і зазвичай використовуються за відсутності можливості встановлення системи забору відновлюваної низькопотенційної теплової енергії з ґрунту, води відкритих водойм або водоносних горизонтів. Тепловий насос типу Вода-Вода з ґрунтовими вертикальними теплообмінниками має найвищий коефіцієнт перетворення (КОП), який дорівнює чотирьом. Тобто на один кіловат затраченої електричної енергії ГеоТНС може отримати до чотирьох кіловат теплової енергії.

На рис. 1 показано енергетичні потоки ГеоТНС для опалення та охолодження. Залежно від COP теплового насосу, в середньому 56 250 кВт*год, або 75% від опалення покривається тепловою енергією, що міститься в надрах землі.

Решту енергії забезпечує тепловий насос. Оскільки в системі ГеоТНС можливе пряме охолодження, кількість холоду, що постачається з водоносного горизонту, еквівалентна потребі будівлі в охолодженні. Як наслідок, розглянута система ГеоТНС має коефіцієнт енергетичного балансу між опаленням та охолодженням 0,25.

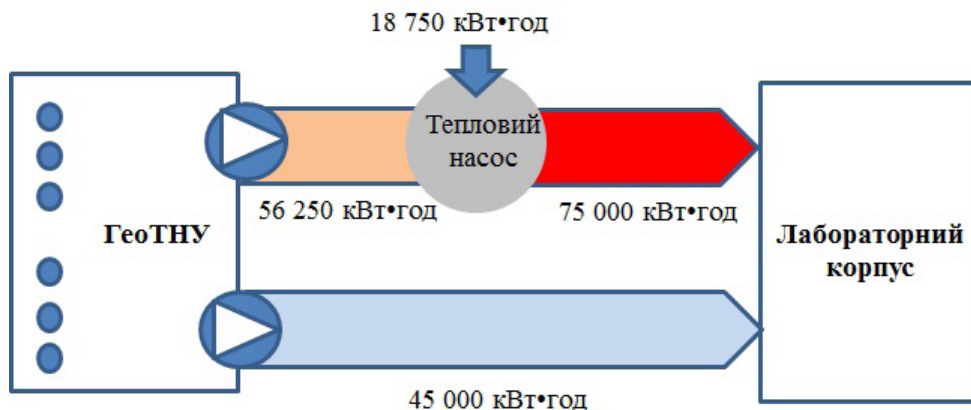


Рис. 1. Поток енергії розглянутої системи ГеоТНС для опалення та охолодження

В якості конвекторів опалення запропоновано встановити фанкойли. При наявності прибудинкової території прощею 600 м² запропоновано встановити ГеоТНС з вертикальним ґрунтовими теплообмінниками. Для тепло насосної системи потужністю 40 кВт, при прогнозованому КОП – 4, потужність первинного джерела теплової енергії складає 30 кВт.

Кількість теплоти, що можливо зняти з вертикального теплообмінника вище, ніж у горизонтального, і приймається в середньому 50 Вт/м. Однак реальне значення може сильно відрізнятись, і залежить від вологості породи та наявності ґрунтових вод. Необхідна довжина горизонтального теплообмінника теплового насоса визначається з співвідношенням:

$$L = Q/q, \text{ м}$$

де q – приймаємо 50 Вт/м (середнє значення для вертикальних U – подібних колекторів).

$$L = 30/0,05 = 600,0 \text{ м свердловини}$$

Це може бути як одна 600 м свердловина, так і шість свердловин по 100 м. При використанні кількох зондів необхідно робити свердловини на максимально можливому віддаленні одна від другої (не менше 5 м). Для більш ефективної роботи рекомендується бурити менше свердловин. Тому у нашому випадку було запропоновано пробурити шість свердловин по 100 м, та встановити в них U-подібні геотермальні зонди, по два у кожен свердловину.

Для ефективної роботи теплових насосів необхідно застосовувати низькотемпературні конвектори опалення, а саме такі пристрої як фанкойли, теплі поли або інші.

У нашому випадку доцільно змонтувати фанкойли. Для будівлі прощею 500 м², необхідно встановлення фанкойлів загальною потужністю 40 кВт, а саме приблизно 40 штук по 1 кВт.

Параметри, що використовуються для визначення капітальних витрат ГеоТНС, не є специфічними для конкретного місця, а це означає, що вони мають значну варіабельність. Деякі витрати на компоненти, такі як витрати на теплообмінник, взяті з літератур-

них джерел, інші з використанням використовуються каталогів. У цьому випадку точний і детермінований розрахунок капітальних витрат не є можливим. Таким чином, моделювання за методом Монте-Карло з великою кількістю варіацій дозволяє кількісно оцінити невизначеність кожного параметра. Для кожного параметра використовується симетричний трикутний розподіл, обмежений мінімальним, середнім та максимальним значенням. Найбільш вірогідним значенням є середній, тоді як до мінімального та максимального значення ймовірність безперервно зменшується. У даній симуляції мінімальні та максимальні значення є найкращим (найдешевшим) та найгіршим (найдорожчим) сценаріями. Крім того, аналіз чутливості визначає компоненти, що мають найбільший вплив на капітальні витрати. Аналіз чутливості дає уявлення про структуру інвестиції та визначає вплив її невизначеності [22]. У таблиці 2 наведені підсумкові данні мінімального, середнього та максимального значення для кожного компоненту ГеоТНС, що були використані для моделювання за методом Монте-Карло та аналізу чутливості.

Поточні витрати $CC_{\text{ГеоТНС}}$ включають витрати, пов'язані з попитом DC та витрати, пов'язані з експлуатацією OC . Витрати, пов'язані з попитом, складаються з витрат на опалення CH та охолодження CCO .

Витрати, пов'язані з експлуатацією, складаються з витрат на технічне обслуговування M та заміну R компонентів протягом терміну служби ГеоТНС.

$$CC_{\text{ГеоТНС}} = DC + OC = CH + CCO + M + R \quad (1)$$

$$CC_{\text{ГеоТНС}} = \frac{ED_H}{COP_{HP}} \cdot EC + P \cdot t_H \cdot EC + P \cdot t_c \cdot EC + C \cdot M + R \quad (2)$$

Витрати на електроенергію EC є специфічними витратами лабораторії, тоді як COP_{HP} є загальним значенням з довідкових джерел. Витрати на опалення складаються з витрат на електроенергію EC для роботи теплових та циркуляційних насосів. Для прямого охолодження використання теплових насосів не потрібне, тому витрати на електроенергію складають лише витрати EC на живлення циркуляційних

насосів. Витрати на технічне обслуговування визначаються як певний відсоток від вартості ГеоТНС. Період спостереження визначено як 10 років, однак деякі компоненти, такі як циркуляційні насоси, можуть мати менший термін служби і повинні бути замінені протягом періоду експлуатації.

Будівля лабораторного корпусу не підключена до мережі централізованого тепlopостачання міста. Таким чином, як референтна технологія для опалення будівлі розглядаються витрати на встановлення автономного електричного кола відповідної потужності. Вартість капітальних витрат буде складатися з вартості обладнання та витрат на його монтаж. Поточні витрати будуть залежати від витрат на електричну енергію, технічне обслуговування та заміну компонентів.

Також як референтна технологія для охолодження будівлі розглядається система з використанням чиллерів. Ці типи охолоджувачів зазвичай використовуються в адміністративних приміщеннях, лікарнях, торгових центрах і центрах обробки даних і тому є репрезентативними для стандартної технології постачання холоду [25].

Враховуючи необхідну холодопродуктивність 25 кВт, оціночні капітальні витрати C_{CCN} для компресійних холодильних машин коливаються між 200 євро/кВт та 300 євро/кВт [26, 27], що відпо-

відно приблизно складає 6–10 тис. грн/кВт. Витрати на техніко-економічне обґрунтування, розробку та інжиніринг визначаються як певний відсоток від капітальних витрат (таблиця 3).

Поточні витрати на компресійні холодильні машини CC_{CCN} залежать від енергоспоживання системи і складаються з COP_{CCN} витрат на електроенергію EC та витрат на технічне обслуговування M_{CCN} і заміну R_{CCN} .

$$CC_{CCN} = \frac{ED_c}{COP_{CCN}} \cdot EC + C_{CCN} \cdot M_{CCN} + R_{CCN} \quad (3)$$

Рекомендований термін амортизації компресійної холодильної машини становить 15 років, що не призводить до інвестицій у заміну протягом 10-річного періоду спостереження [28].

Витрати на електроенергію підлягають щорічному зростанню цін на основі загальної тенденції останніх років в Україні. Для витрат на електроенергію враховано фактор 100%. Для порівняння, всі поточні витрати дисконтуються з відсотковим коефіцієнтом до початку періоду спостереження. Відсотковий коефіцієнт q^T розраховується за допомогою рівняння 4:

$$\frac{1}{q^T} = \frac{1}{(1+i)^T} \quad (4)$$

Таблиця 2

Вхідні параметри для розрахунку поточних витрат ГеоТНС

Параметр	Мінімум	Середній	Максимум
**COP теплового насосу (COP_{HP})	3	4	5
*Витрати на електроенергію EC (грн/кВт*год) (транспортування та розподіл)	8	10	12
**Технічне обслуговування M (%)		4	
**Період опалення t_H (год)	1557	1800	2043
**Період охолодження t_C (год)	1557	1800	2043

*Національна енергетична компанія «Укренерго» <https://www.nerc.gov.ua>;

**International Energy Agency (2007); Sommer et al. (2015) [23, 24]

Таблиця 3

Вхідні параметри, що визначають капітальні витрати C_{CCN} і поточні витрати CC_{CCN} компресійних чиллерів

Параметр	Мінімум	Середній	Максимум
**Капітальні витрати C_{CCN} (Тис Грн/кВт)	8	10	12
**Розробка (%)	2	3	4
**Інженерія (%)	4	5	6
**Непередбачені обставини (%)	8	10	12
**COP Компресійного чиллера COP_{CCN}	1,5	2	2,5
**Технічне обслуговування M_{CCN} (%)	3	4	5
*Витрати на електроенергію EC (грн/кВт*год) (транспортування та розподіл)	7	8	9
**Період охолодження t_C (год)	1557	1800	2043
**Тривалість життя (роки) j	10	15	20

*Національна енергетична компанія «Укренерго» <https://www.nerc.gov.ua>;

**International Energy Agency (2007); Sommer et al. (2015) [23, 24]

T – дата платежу, причому $T \geq 0$. $T = 0$ – початок інвестування в обидві технології. Ставка дисконтування встановлюється Національним банком і, знаходиться за 2022–2023 рік на рівні 25%. Чиста теперішня вартість NPV інвестицій визначається як теперішня вартість чистих платежів за інвестиціями в момент часу $t = 0$. NPV розраховується як сума теперішньої вартості всіх доходів і теперішньої вартості всіх витрат протягом періоду спостереження [29].

$$NPV = -C_{\text{GeoTNC}} + \sum_{t=1}^T R_t \cdot q^{-t} \quad (5)$$

C_{GeoTNC} – це капітальні витрати на ГеоТНС, R_t – це дохід у момент часу t , який є результатом різниці між поточними витратами на систему ГеоТНС та еталонну технологію. Інвестиції в систему ГеоТНС є вигідними по відношенню до інвестицій в еталонну технологію, якщо чиста теперішня вартість системи ГеоТНС є позитивною

Екологічний аналіз системи ГеоТНС та еталонної технології базується на їх річних викидах CO_2 , спричинених експлуатацією CE . Конкретні викиди CO_2 розраховуються за допомогою рівнянь 6 та 7.

$$CE_{\text{GeoTNC}} = E_{\text{GeoTNC}} \cdot EF_{el} \quad (6)$$

$$CE_{ref} = E_{\text{CCH}} \cdot EF_{el} + ED_{DH} \cdot EF_{DH} \quad (7)$$

Тут CE це річне споживання електроенергії за певною технологією, а ED_{DH} це попит на централізоване теплопостачання на основі ED_H та η_{DH} . EF_{el} та EF_{DH} – це коефіцієнти викидів для

електроенергії та централізованого теплопостачання, наведені в таблиці 4.

Таблиця 4

Коефіцієнти викидів CO_2 для та електроенергії

Коефіцієнти викидів CO_2	Мінімум	Середній	Максимум
Електроенергія (т/МВт·год)	0, 209	0, 417	0,725

EnbW (2017); Fair Energy (2018); Ukraine. 2023 National Inventory Report (NIR) (2023); [30, 31, 32].

Результат моделювання методом Монте-Карло капітальних витрат на систему ГеоТНС представлено в таблиці 5.

Основний фактор витрат пов'язаний з підземною частиною системи що складається з шести свердловин та труб теплообмінників – 33%, та витратами на тепловий насос та його монтаж – 37%, разом вони складають 70% від загальних капітальних витрат. Надземна частина системи ГеоТНС включає інтеграцію в будівлю опалювальних пристроїв (фанкойлів) теплопункту та мережі і становить 30% капітальних витрат (рис. 2).

Рівень цін залежить від постачальника послуг та якості встановлених компонентів. Вищі витрати на спорудження та монтаж свердловин можуть збільшити капітальні витрати більш ніж на 10%. Таким чином, планувальник системи ГеоТНС повинен ретельно вибирати компоненти для реалізації свердловин відповідно до фактичних вимог. Контроль і моніторинг також є важливим фактором, якщо брати

Таблиця 5

Вартість обладнання та робіт для запровадження опалення будівлі тепловими насосами потужністю 40 кВт з геотермальними 2U-подібними теплообмінниками

№ п/п	Найменування	Кількість (шт)	Вартість (грн)	Усього (грн)
Обладнання				
1.	Тепловий насос (ТН) 20 кВт (по теплу)	2	220 000,00	440 000,00
2.	Грунтовий теплообмінник для ТН	2 400 м	30,00	72 000,00
3.	Зовнішня мережа (труба PE)	200 м	40,00	8 000,00
4.	Теплопункт с системою безпеки та обв'язкою	1	30 000,00	30 000,00
5.	Фанкойли 1–1, 5 кВт	40	3 000,00	120 000,00
6.	Внутрішня мережа	1	50 000,00	50 000,00
	Усього обладнання			720 000,00
Монтажні роботи				
1.	Монтаж теплового насосу	2	20 000,00	40 000,00
2.	Буріння свердловин та монтаж грунтового теплообмінника	6	60 000,00	360 000,00
3.	Монтаж зовнішньої мережі	1	50 000,00	50 000,00
4.	Монтаж теплопункту	1	20 000,00	20 000,00
5.	Монтаж фанкойлів	40	1 000,00	40 000,00
6.	Монтаж внутрішньої мережі	1	50 000,00	50 000,00
	Усього монтажних робіт			560 000,00
	Разом			1 280 000,00

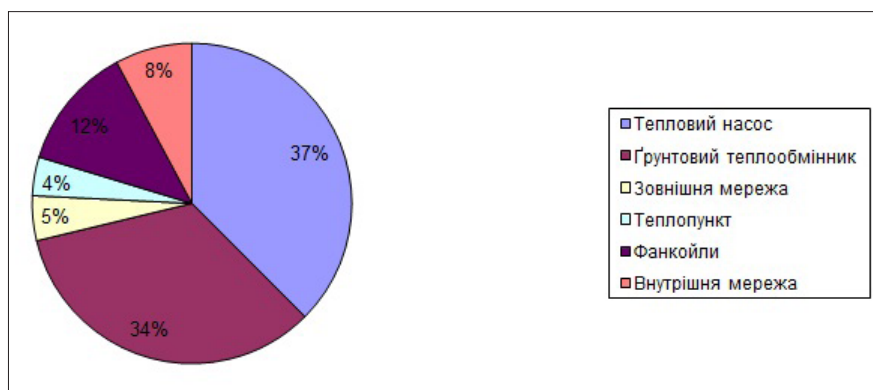


Рис. 2. Співвідношення капітальних витрат на систему GeoTNC

до уваги капітальні витрати. Точний моніторинг має вирішальне значення для забезпечення ефективної, довгострокової роботи системи GeoTNC. Референтна система відрізняється від GeoTNC за структурою витрат, як показано на рис. 3.

В обох системах, найбільша частка загальних витрат припадає на опалення будівлі. При роботі GeoTNC на охолодження теплові насоси не використовуються, так як охолодження відбувається безпосередньо теплоносієм, що подається з свердловини з потійною температурою 8–9 °С. Для референтної системи, охолодження відбувається з використан-

ням повітряних чилерів. Спільне в системах те, що теплові насоси як чилери та електричні котли працюють на електроенергії. Споживання електроенергії тепловим насосом, визначається його COP (коефіцієнтом перетворення), який є найбільш важливим параметром економічної ефективності системи GeoTNC. На рисунку 4 видно суттєву різницю між витратами електроенергії на опалення та охолодження для кожної з двох систем.

Експлуатація циркуляційних насосів насосів системи GeoTNC становить лише 2% від загальних витрат, тоді як витрати на електроенергію для

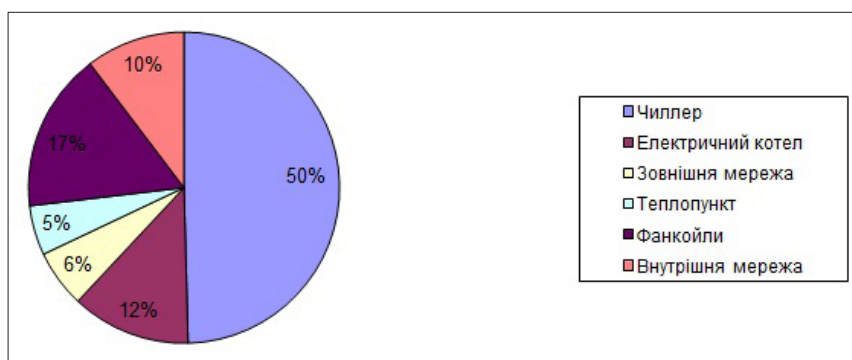


Рис. 3. Співвідношення капітальних витрат на референтну систему

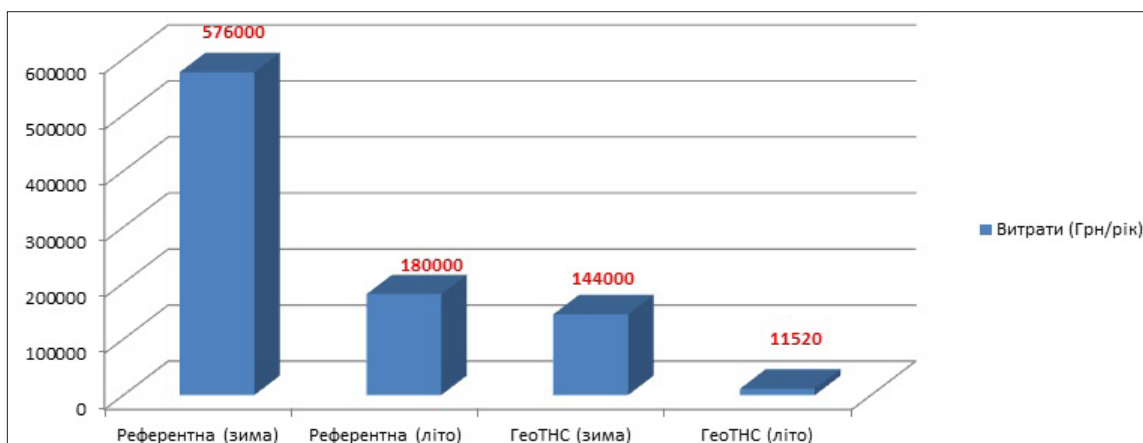


Рис. 4. Співвідношення між витратами електроенергії на опалення та охолодження для GeoTNC та референтної системи

компресійних холодильних машин становлять приблизно 25%, та є другими за величиною для ГеоТНС. Обслуговування ГеоТНС вимагає більше зусиль і сильно залежить від кількості свердловин та гідрофізичних умов розташування ґрунтового масиву де встановлені свердловини [33].

На рис. 5 наведені результати розрахунку окупності ГеоТНС в порівнні з референтною технологією. Аналітика проводиться для ГеоТНС, що працює як гібридна система, а також тільки для цілей охолодження та опалення. Початком інвестицій є нульовий рік. Орієнтовна вартість капітальних витрати на референтну технологію становлять 968 тис. грн, що приблизно на 25% нижче, ніж капітальні витрати на систему ГеоТНС.

Впровадження ГеоТНС потенційно призводить до середньої економії при використанні на опалення взимку та охолодження влітку 754 тис. грн. порівняно з базовою технологією. Середній показник COP для підземної установки ГеоТНС становить 4. Незважаючи на вищі капітальні витрати, очікувана NPV гібридної ГеоТНС становить 6,7 млн. грн через 10 років (рис. 4). Таким чином, інвестиції в систему АТЭС оцінюються досить позитивно порівняно з базовою технологією. Завдяки меншому споживанню енергії, потенційний середній термін окупності досягає 2,2 років. Основною причиною економічної ефективності системи ГеоТНС є пряме охолодження влітку, яке є найдешевшим варіантом постачання. Таким чином, система ГеоТНС є найбільш придатною для будівель з великим попитом на охолодження, таких як лабораторії, лікарні або центри обробки даних.

Архітектура системи ГеоТНС може сильно відрізнятися від підходу, запропонованого в цьому дослідженні, залежно від місцевих умов. На відміну від цього дослідження, можливий значний дисбаланс між потребою в опаленні взимку та охолодженні влітку може бути серйозною проблемою на практиці. Набагато більша потреба будівлі в охолодженні може

призвести до послідовного підвищення температури водоносного горизонту через певні періоди. Це може призвести до значної втрати ефективності, головним чином з точки зору прямого охолодження. Якщо температура водоносного горизонту стає недостатньою для прямого охолодження, необхідно активувати додаткові охолоджувальні машини, що значно збільшує споживання електроенергії та витрати на систему, пов'язані з попитом. Для компенсації більшої кількості теплової енергії внаслідок більшої потреби в охолодженні використовуються додаткові установки, такі як градирні, рекуператори, теплові насоси або установки для обробки повітря. Однак більшість цих заходів пов'язані з додатковими витратами, які не розглядаються в цьому дослідженні. На відміну від цього дослідження, температура навколишнього середовища та потреби в опаленні та охолодженні можуть змінюватися протягом короткого періоду часу. Для повного розуміння впливу коливань попиту на енергію або гідрогеологічних змін у надрах на економічні показники ГеоТНС, слід використовувати більше інструментів моделювання. Оскільки ГеоТНС є досить повільно діючою системою, необхідні додаткові технології енергопостачання також і для пікових навантажень. Майбутні проекти ГеоТНС можуть бути успішно реалізовані лише за умови тісної співпраці забудовника та також державних і місцевих органів влади на ранніх стадіях процесу планування. Крім того, важливим фактором забезпечення довготривалої та сталої роботи систем ГеоТНС є розгалужена та постійно діюча система моніторингу підземної частини системи.

Заміна базової технології на систему ГеоТНС для опалення та охолодження призводить до очікуваного середнього скорочення викидів CO₂ на 30 т/рік (80%) (рис. 6).

Розрахунок було виконано з урахуванням потреби в опаленні на рік 72000 кВт•год, потреба в охолодженні 45000 кВт•год, та значенні коефіцієнти викидів CO₂ для та електроенергії 0, 417 т/МВт•год.

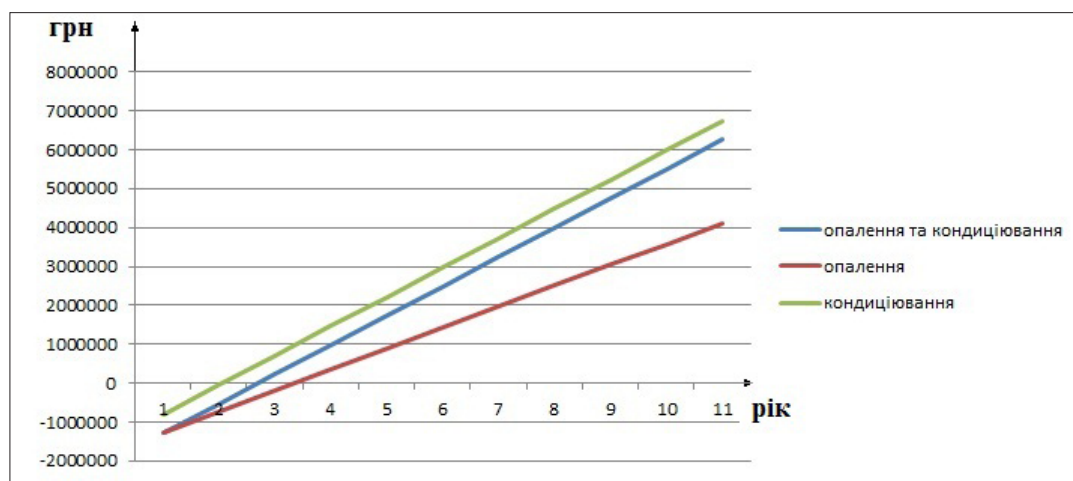


Рис. 5. Графік окупності ГеоТНС при роботі в різних режимах



Рис. 6. Прогнозні показники викидів CO₂ за різних технологій опалення та охолодження адміністративної будівлі площею 500 м² (Потреба в опаленні на рік 72 000 кВт•год, потреба в охолодженні 45 000 кВт•год)

За рохрахунковий період забруднення атмосфери викидами CO₂ від рефернтної технології буде складати: 300,24 т. при роботі на опалення та 93,83 т на охолодження, в той час коли викиди від ГеоТНС складуть 75,06 та 1,87 відповідно. Таким чином за час спостереження 10 років, потенційно може бути зменшено викидів за рахунок використання ГеоТНС на 317,13 т CO₂ (рис. 7).

Доведено, що можливими ще більші обсяги скорочення CO₂. Наприклад система АТЭС- (water thermal energy storage) для опалення та охолодження Технологічного університету в Ейндховені потужністю 20 МВт забезпечує скорочення викидів CO₂ на 13 000 т/рік [34]. Що має перспективу

для проведення подальших техніко-економічних та екологічних досліджень систем, які в якості низькопотенційного джерела енергії використовують воду з розкритого свердловинами водоносного горизонту як природного акумулятора теплової енергії.

Висновки:

1. Доведено, що ГеоТНС є енергетично та екологічно ефективною енергетичною системою для теплозабезпечення та кондиціонування приміщень та споруд. Незважаючи на вищі капітальні витрати, очікувана NPV запропонованої гібридної ГеоТНС становить 6,7 млн. грн за період 10 років, строк окупності в комбінованому режимі дорівнює 2,2 роки,

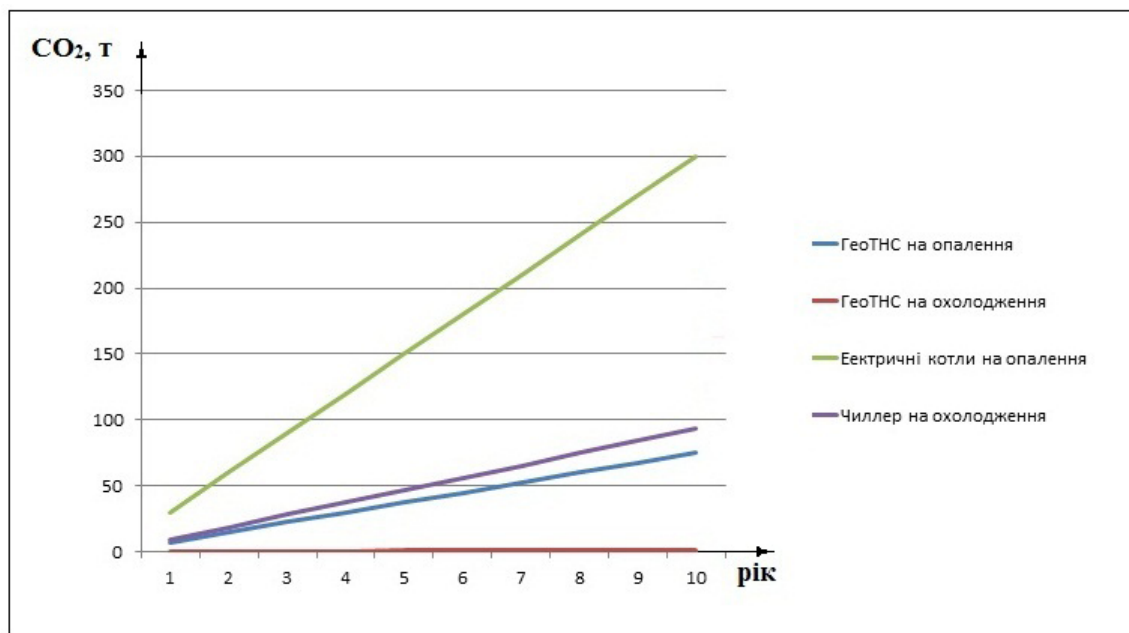


Рис. 7. Прогнозні показники викидів CO₂ за різних технологій опалення та охолодження за час спостереження 10 років

а викиди CO₂ зменшуються на 80% в співвідношенні до референтної системи.

2. Найбільш ефективним є використання ГеоТНС як для опалення, так і для охолодження будівлі. Суттєва економія досягається при роботі системи на охолодження без залучення до роботи теплового насосу (пряме кондиціювання за рахунок подачі теплоносія безпосередньо з свердловин до фанкойлів розташованих в будівлі.

3. Потребують проведення подальших досліджень щодо обґрунтування переваги ГеоТНС по відношенню до відкритих геотермальних систем.

4. Для ефективного використання при поверхневих шарів Землі як природного акумулятора теплової енергії необхідно проведення попередніх гідрогеологічних досліджень та якісне вивчення як існуючого антропогенного навантаження так і геоморфологічних, геологічних та гідрогеологічних параметрів ділянки проведення бурових робіт

5. Результати роботи можуть бути використані при виконанні робіт з проектування, та прийняття рішення інвесторами щодо запровадження даних систем для опалення та кондиціювання житлових та виробничих приміщень.

Література

1. Безродний М.К., Пуховий І.І., Кутра Д.С. Теплові насоси та їх використання : навч. посіб. Київ, 2013. 312 с.
2. Долінський А.А., Драганов Б.Х. Теплові насоси у системі теплопостачання будівель. *Промислова теплотехніка*. 2008. № 6. С. 71–83.
3. Кудря С.О. Відновлювані джерела енергії : монографія. Київ : ІВЕ НАН України, 2020. 354 с.
4. Eggen G., Vangsnes G. Heat pump for district cooling and heating at Oslo Airport Gardermoen : monograph. Las Vegas, 2005. 98 p.
5. Dincer I., Rosen M. Thermal energy storage: systems and applications : 2nd ed. London : Wiley, 2011. 315 p.
6. Kalaiselvam S., Parameshwaran R. Thermal energy storage technologies for sustainability: systems design, assessment, and applications : 1st ed. Amsterdam : Elsevier AP, 2014. 233 p.
7. Rosen M., Koohi-Fayegh S. Geothermal energy: Sustainable heating and cooling using the ground : monograph. Chichester : Wiley, 2017. 347 p.
8. Andersson O., Ekkestubbe J., Ekdahl A. UTES (underground thermal energy storage) – applications and market development in Sweden. *Energy Power Eng*. 2013. № 7. P. 669–678.
9. Bayer P., Saner D., Bolay S., Rybach L., Blum P. Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. № 16: 1256–1267. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.027>
10. 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)
11. 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>
12. Басок Б.І., Недбайло О.М., Ткаченко М.В., Божко І.К., Новіцька М.П. Схемні рішення оснащення енергоефективного будинку системою теплозабезпечення. *Промислова теплотехніка*. 2013. № 1. С. 42–48.
13. Гершкович В. Ф. Особливості проектування систем теплопостачання будівель із тепловими насосами : монографія. Київ : Українська Академія Архітектури, 2009. 160 с.
14. Кулик М.М., Дубовський С.В. Основні напрями та пріоритетні заходи зі зменшення обсягів використання природного газу в економіці і соціальній сфері України. *Системні дослідження в енергетиці*. 2009. № 1(19). С. 7–15.
15. Степанов Д. В., Обуховський М. В. Ефективні режими роботи теплових насосів з ґрунтовими теплообмінниками. *Інноваційні технології в будівництві*. 2018. № 3. С. 394–397.
16. Zurian O.V., Barilo A.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. № 3. P. 575–584. <https://doi.org/10.15421/112254>
17. Bloemendal M., Hartog N. Analysis of the impact of storage conditions on the thermal recovery efficiency of low-temperature ATES systems. *Geothermics*. 2018. № 71. P. 306–319. <https://doi.org/10.1016/j.geothermic>
18. Fleuchaus P., Godschalk B., Stober I., Blum P. Worldwide application of aquifer thermal energy storage – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. № 94. P. 861–876. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.057>
19. Bonte M., Breukelen B., Stuyfzand P. Environmental impacts of Aquifer Thermal Energy Storage investigated by field and laboratory experiments. *Clim Change*. 2013. № 4. P. 77–89. <https://doi.org/10.2166/wcc.2013.061>
20. Sommer W., Valstar J., van Gaans P., Grotenhuis T., Rijnaarts H. The impact of aquifer heterogeneity on the performance of aquifer thermal energy storage. *Water Resour Res*. 2013. № 49. P. 28–38. <https://doi.org/10.1002/2013WR013677>
21. Wigstrand I. The ATES project – a sustainable solution for Stockholm-Arlanda airport : Collection of materials 11th international conference on thermal energy storage for energy efficiency and sustainability. Stockholm : Sweden, 2009. P. 1356–1367
22. Blohm H., Lüder K., Schaefer C. Investition: Schwachstellenanalyse des Investitionsbereichs und Investitionsrechnung : 9th ed. München : Vahlen. 1995. 254 p.
23. International Energy Agency Renewables for heating and cooling: untapped potential. Renewable energy technology deployment. 2023. Website. URL: <https://www.witteveenbos.com/news/geothermal-energys-untapped-potential/> (date of application 21.09.2023).
24. Sommer W., Valstar J., Leusbrock I., Grotenhuis T., Rijnaarts H. Optimization and spatial pattern of large-scale aquifer thermal energy storage. *Appl Energy*. 2015. № 137. P. 322–337. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.019>
25. Goshovskii S.V., Zurian O.V. Human-induced load on the environment when using geothermal heat pump wells. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2020. № 1. P. 57–68. <https://doi.org/10.15421/112006>

26. Institut für Energie- und Umwelttechnik Preisatlas Ableitung von Kostenfunktionen für Komponenten der rationellen Energienutzung. 2002. Website. URL: <https://docplayer.org/33002259-Preisatlas-ableitung-von-kostenfunktionen-fuer-komponenten-der-rationellen-energienutzung.html> (date of application 21.09.2023).
27. Schäfer V, Negele B Absorptionskältemaschinen – Anwendungsbeispiele. *Kälte Luft Klimatechnik*. 2009. № 4. P. 26–31.
28. VDI 2067 Economic efficiency of building installations: Fundamentals and economic calculations. 2012. Website. URL: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-2067-blatt-1-economic-efficiency-of-building-installations-fundamentals-and-economic-calculation> (date of application 21.09.2023).
29. Konstantin P. Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, – ransport und -beschaffung, Übertragungsnetzausbau und Kernenergieausstieg : 4th edn. Springer : Vieweg, 2017. 223 p.
30. EnBW CO₂-Fußabdruck und Energieeffizienz: Spezifische CO₂-Emissionen: Spezifische CO₂-Emissionen der Eigenerzeugung Strom. Website. URL: <https://www.enbw.com/unternehmen/nachhaltigkeit/environment/umweltschutz/co-fussabdruck.html> (date of application 21.09.2023).
31. Fair Energy TÜV Zertifikat CO₂ Emissionsfaktor. Website. URL: <https://www.fairenergie.de/inhalt/privatkunden/fernwaerme.html> (date of application 21.09.2023).
32. Ukraine 2023 National Inventory Report (NIR). Website. URL: <https://unfccc.int/documents/628276> (date of application 21.09.2023).
33. 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)
34. Worthington M.A. Aquifer thermal energy storage: an enabling green technology for campus district energy systems : Proceedings of 24th annual campus energy conference. Miami : US. 2011. P. 103–116.
35. Umweltbundesamt. Hohe Kosten durch unterlassenen Umweltschutz. 2018. Website. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/hohe-kosten-durch-unterlassenen-umweltschutz> (date of application 21.09.2023).