

DOI: 10.32347/2076-815x.2023.84.263-275

УДК 504.06:552.11:697.7

д.екон.н., професор **Предун К.М.**,

31172@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2634-9310,

Войналович В.О., mail@voinalovych.com , ORCID: 0009-0009-1932-5204,**Гулієв Дж.**, semil@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3442-0906,

Київський національний університет будівництва і архітектури

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА БІОСФЕРОСУМІСНОСТІ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД В УКРАЇНІ

Використання альтернативних джерел енергії є одним із найбільш важливих напрямів сучасної енергетичної політики, спрямованої як на поліпшення стану довкілля, так і на заощадження традиційних паливно-енергетичних ресурсів. Прийняті законодавчі, нормативно-правові акти сприяли стрімкому зростанню «зеленої» енергетики в Україні. Сенс процесу еколого-енергетичної оптимізації – не заміна одного джерела енергії іншим, а економічна та індустріальна трансформація, декарбонізація та децентралізація.

Запропоновано технічне вирішення проблеми стосовно джерела альтернативної енергії за рахунок використання теплоти при поверхневих шарів земної кори. На глибині розміщення зондів-теплообмінників, які структурно входять до складу теплонасосних установок, температура ґрунту практично незмінна протягом року і позитивна. Для підвищення експлуатаційної надійності установок застосовано незамерзаючі розчини гліколю.

Для вивчення процесі теплової взаємодії в зоні розміщення зондів-теплообмінників застосовано математичне моделювання з використанням методу кінцевих елементів. В результаті отримано значний масив даних, який відображає динаміку температурних полів при різних режимах експлуатації ґрунтових теплонасосних установок з вертикальними зондами.

Отримані результати аналітичних досліджень була використана при проектуванні ґрунтової теплонасосної установки для потреб енергопостачання громадської будівлі з розрахунковою тепловою потужністю 200 кВт.

Ключові слова: енергетична ефективність, біосферна сумісність, відновлювані джерела енергії, приповерхневі шари земної кори, ґрунтові теплонасосні установки, температурні поля, геотермальний зонд.

Формулювання цілей статті. На шляху змін в економіці України актуальності набуває активізація зусиль з реалізації проектів в енергетичній галузі, що ґрунтуються на принципах біосферосумісності. Метою даної статті є дослідження шляхів трансформації інфраструктури житлово-комунального господарства в частині теплопостачання будівель і споруд для підвищення їх енергетичної ефективності шляхом впровадження альтернативних джерел енергії.

Постановка проблеми. Після підписання Угоди про асоціацію з Європейським Союзом [1], приєднанням нашої держави до Договору про заснування Енергетичного Співтовариства [2] пріоритетом державної політики стають підвищення енергоефективності та використання енергії з альтернативних джерел для потреб економіки країни та захисту довкілля. У 2035 р. частка відновлюваної енергетики повинна становити не менше 25 % у первинному енергопостачанні держави [3].

На сьогоднішній день основними інструментами державної політики стимулювання розвитку вітчизняного сектору відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є: встановлення «зеленого» тарифу на електричну енергію, вироблену з альтернативних джерел та встановлення стимулюючого тарифу на теплову енергію з відновлюваних джерел [4]. Тобто, пріоритетом державної політики має стати спрямування систем енергопостачання до засад біосферної сумісності. Сенс процесу еколого-енергетичної оптимізації – не заміна одного джерела енергії іншим, а економічна та індустріальна трансформація, декарбонізація та децентралізація.

Одним із практично невичерпних джерел енергії служить теплота, акумульована земною корою, що знаходиться в твердій, рідкій та пароподібній фазах, яка називається геотермальною енергією. У той же час геотермальна енергія, носієм якої є тверді породи земних надр, називається петротермальною енергією. Її використання в різних технічних пристроях є найбільш доступним, економічно та екологічно доцільним.

Аналіз досліджень та публікацій. Відомі різні способи отримання теплоти твердих порід земної кори, що знаходяться на великій глибині, де під дією геотермального градієнта їх температура досягає значної величини. У той самий час термальна енергія приповерхневих шарів земної товщі наразі практично не використовується. Йдеться про теплоті масиву ґрунту, розташованого на достатній відстані від земної поверхні, а саме нижче шару, в якому температура порід схильна до сезонних коливань, викликаних річною зміною сонячної радіації. Цей шар ще називають в геофізиці геліотермозоною.

Виконані дослідження свідчать, що зі збільшенням відстані від поверхні ґрунту коливання температури масиву порід, викликані сезонними, а тим

більше добовими змінами сонячної радіації, швидко згасають. Водночас роль геотермального інгредієнта на певній відстані поки що незначна. Існує глибина, нижче якої зазначена температура ґрунту стає менше наперед заданої величини. Нижче зазначеної глибини температуру можна прийняти позитивно сталою величиною. На території України, за винятком гірської місцевості, температура масиву порід нижче геліотермозони змінюється від $+12\text{ }^{\circ}\text{C}$ у північних регіонах до $+16\text{ }^{\circ}\text{C}$ у південних.

Відомості про температурне поле надр Землі у конкретній місцевості можуть бути отримані безпосередньо шляхом вимірювання температури порід інструментальними методами при бурінні свердловин на відповідну глибину. Це достатньо дорогий спосіб і економічно виправданий лише при плануванні та розробці родовищ корисних копалин. У той же час досить надійні відомості про температурне поле земних надр можуть бути отримані аналітичними методами, які ґрунтуються на сучасних уявленнях про найважливіші джерела формування температурного поля на різних глибинах та механізмах перенесення теплоти у відповідних породах. Розгляду зазначених уявлень та вирішенню на їх основі завдань про структуру температурного поля земної кори присвячені роботи багатьох дослідників [5, 6, 7]. Одна з них, [8] наприклад, містить результати досліджень про температурний режим верхніх шарів ґрунту, що виконувались в інтересах сільського господарства, і обмежуються глибиною до 3,2 м. Інші роботи присвячені вивченню температурного поля глибоких надр Землі, починаючи з глибин 200-300 м і більше [5, 6, 7].

Таким чином, аналіз літературних джерел дозволяє зробити висновок про недостатнє наукове опрацювання питань щодо формування температурного поля в приповерхневих шарах земної кори, зокрема, на глибинах, де сезонні коливання температур на поверхні ґрунту згасають, а впливом геотермального градієнта можна знехтувати. Тут встановлюється квазістаціонарний температурний режим з практично постійною по глибині і позитивною температурою. Для забезпечення ефективного та цілорічного використання ґрунтових теплонасосних установок саме тут (на глибинах до 100 м) доцільно розташовувати їхню активну теплообмінну поверхню.

Основна частина. У загальному випадку теплота в пластах реальних порід може переноситися як теплопровідністю, так і конвекцією в залежності від їх структури, вмісту вологи, наявності або відсутності водоносних шарів, швидкості і напрямку фільтрації води, інших факторів тощо [6].

Приповерхневі шари реального ґрунту, зазвичай, складаються з різних порід, тобто, є неоднорідними за своїми теплофізичними властивостями. Крім того, значення цих величин залежать від температури та напрямку вектора перенесення теплоти (масив порід у загальному випадку є неізотропним). Отже,

точні аналітичні розв'язки задач про температурне поле масиву порід в таких умовах отримати дуже важко, навіть якщо перенесення теплоти в ньому обмежується лише однією теплопровідністю.

Ще більші проблеми виникають при знаходженні температурних полів у капілярно пористих тілах, якими переважно є масиви порід осадового походження, що становлять приповерхневі шари земної кори в Україні. На механізм теплопереносу в таких породах істотно впливає їх вологовміст. Відповідно, перенесення теплоти здійснюється одночасно теплопровідністю і конвекцією. Крім того, тут можуть відбуватися процеси, пов'язані з фазовими перетвореннями рідини (промерзання і відтавання, випаровування і конденсація).

Особливий випадок теплопереносу має місце у ґрунті, що складається з водоносних шарів, розділених водотривкими проміжками. При фільтрації – спрямованому напірному русі ґрунтових вод вздовж водоносних шарів – у визначенні температурного поля основну роль відіграє конвективна складова перенесення теплоти. Аналітичні вирішення таких задач пов'язані зі значними математичними труднощами. Такі завдання зазвичай вирішують чисельними методами чи методами фізичного моделювання.

При визначенні доцільності використання ґрунтових теплонасосних установок (ТНУ) для потреб теплохолодопостачання будівель і споруд різного призначення у першу чергу слід виконати геологічні дослідження земельних ділянок, де планується розміщення свердловин-зондів. Глибина буріння залежить від особливостей будівельного майданчика, структури геологічних порід земної кори тощо.

До речі, у відповідності з вимогами Закону України «Про енергетичну ефективність будівель» [9] влаштування альтернативних джерел енергії при реконструкції/термомодернізації існуючих будівель рекомендовано лише після виконання таких пріоритетних задач:

- 1) підвищення теплотехнічних показників огороджувальних конструкцій будівель;
- 2) встановлення засобів обліку та регулювання споживання енергетичних ресурсів;
- 3) впровадження автоматизованих систем моніторингу і управління;
- 4) модернізації систем опалення, охолодження, кондиціонування повітря, вентиляції, гарячого водопостачання та освітлення.

Таким чином, первинний аналіз ґрунту з визначенням його теплофізичних характеристик, розрахункові значення потреби у тепловій енергії для систем опалення, гарячого водопостачання тощо є вихідними

даними для проектування теплонасосної установки та знаходження необхідної кількості свердловин-зондів та їх глибини.

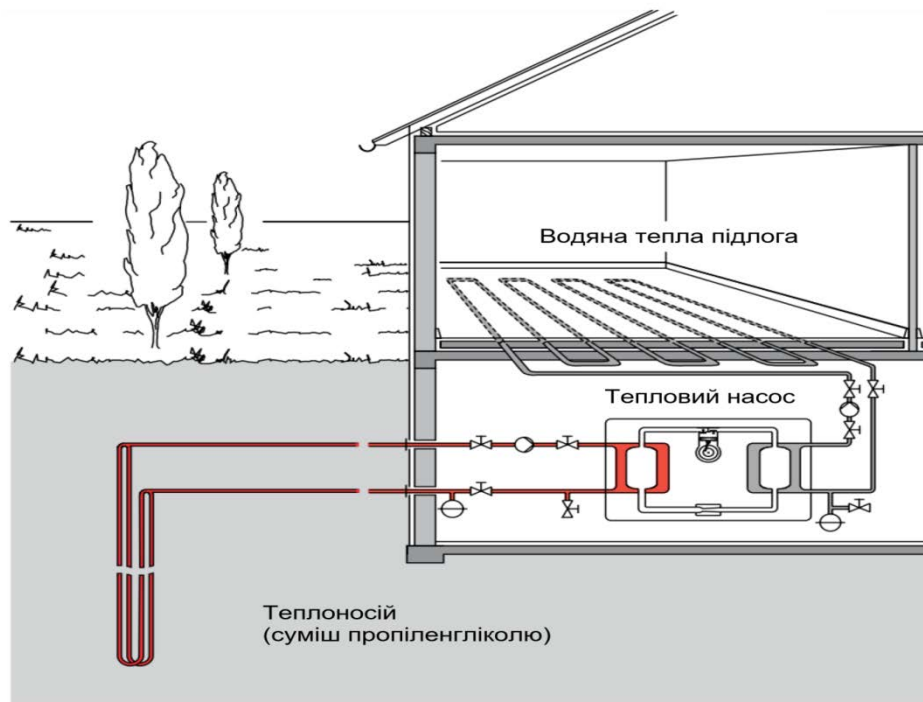


Рис.1. Принципова схема системи тепlopостачання з ґрунтовими тепловими насосами

Таблиця 1

Залежність температури гірських порід від глибини залягання [10]

Станція спостережень	Географічна широта, град. пн.ш.	Радіаційний баланс, Дж/(см ² ·рік)	Температура порід, °C на глибині, м			
			25	125	250	500
Кривий Ріг	45,6	150,62	11,1	12,0	13,3	16,0
Донецьк	51,0	138,07	10,1	13,4	17,2	23,8

Таблиця 2

Питомі значення величини відібраної теплової енергії для різних типів ґрунту з використанням вертикального теплообмінника [11]

Тип ґрунту	Питоме значення відібраної теплової енергії, Вт/м за експлуатаційний період в 1 рік при роботі ТНУ, год./рік	
	1800	2400
1	2	3
Загальні характеристики ґрунту		
Виснажений ґрунт (із сухими частинками і $\lambda < 1,5 \text{ Вт/(м}\times\text{К)}$)	25	20
Звичайний ґрунт із частинками,		

Продовження табл.2

1	2	3
просякнутими вологою $1,5 < \lambda < 3$ Вт/(м×К)	60	50
Зцементована порода з високою теплопровідністю $\lambda > 3$ Вт/(м×К)	84	70
Характеристики окремих видів ґрунту:		
Сухий гравій або пісок	< 25	< 20
Гравій або пісок вологий	65-80	55-65
Потужний потік ґрунтових вод у гравію або піску	80-100	80-100
Крем'янистий магматит (наприклад, граніт)	65-85	55-70
Базовий магматит (наприклад, базальт)	40-65	35-55

Примітки. 1. Вказані значення відібраної теплової енергії з різних ґрунтів тільки для системи опалення при роботі теплового насоса від 1800 до 2400 годин на рік. Додаткове виробництво теплової енергії для потреб гарячого водопостачання передбачає збільшення часового періоду роботи теплового насоса.

2. Наведені значення відібраної теплової енергії при середньорічній зовнішній температурі в діапазоні від 9 до 11 °С.

Згідно з вимогами нормативних документів [11] мінімальне значення середнього за сезон коефіцієнта перетворення теплового насоса типу «земля/вода», встановленого для потреб опалення і гарячого водопостачання, для умов нового будівництва повинно бути не меншим $COP \geq 3,5$, а для реконструйованих (після капітального ремонту) будівель – $COP \geq 3,3$. Якщо порівнювати з ТНУ типу «повітря/вода», то аналогічні коефіцієнти є меншими приблизно на 30 % за вказані вище величини.

Коли йдеться про системи невеликої потужності – до 30 кВт, зазвичай використовують вертикальні геотермальні зонди з поліетиленових труб DN32-DN40. Для проектів такого рівня зонди розташовують на одній лінії вздовж меж ділянки. Але що робити, коли розрахункова потужність системи значно більша, наприклад 1000 і більше кВт? Стандартна схема – технічно здійсненна. Але якою буде підсумкова продуктивність з розрахунку на 1 м довжини зонда? Яким буде результуючий ефект такої площі теплообмінників, яку потужність можна отримати для обігріву та охолодження? І який вплив суміжних зондів один на одного? Як це вплине на ґрунтові води, екологічну обстановку?

Відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.5-44:2010 «Проектування систем опалення будівель з тепловими насосами» [11], для систем, потужність яких перевищує 30 кВт, слід виконувати індивідуальні розрахунки. У свою чергу, згідно з матеріалами VDI 4640, part 2 [12] для визначення потенційної потужності геотермального поля для систем потужністю понад 100 кВт слід

використовувати тривимірне комп'ютерне моделювання – CFD-моделювання методом кінцевих елементів.

Розрахунки у вигляді функцій за часом для CFD-моделювання первинного контуру необхідні для пошуку точки балансу річного циклу охолодження та підігріву ґрунту. Розрахункова модель являє собою об'ємну зону ґрунту, з урахуванням теплофізичних характеристик кожного шару, а також вертикальних зондів, з розстановкою в плані згідно з запропонованою схемою.

Вихідними даними для розрахунку є:

1) профіль геологічних порід по всій глибині установки зонда (теплообмінника), напрямком течії підземних вод (наприклад, див. рис. 2);

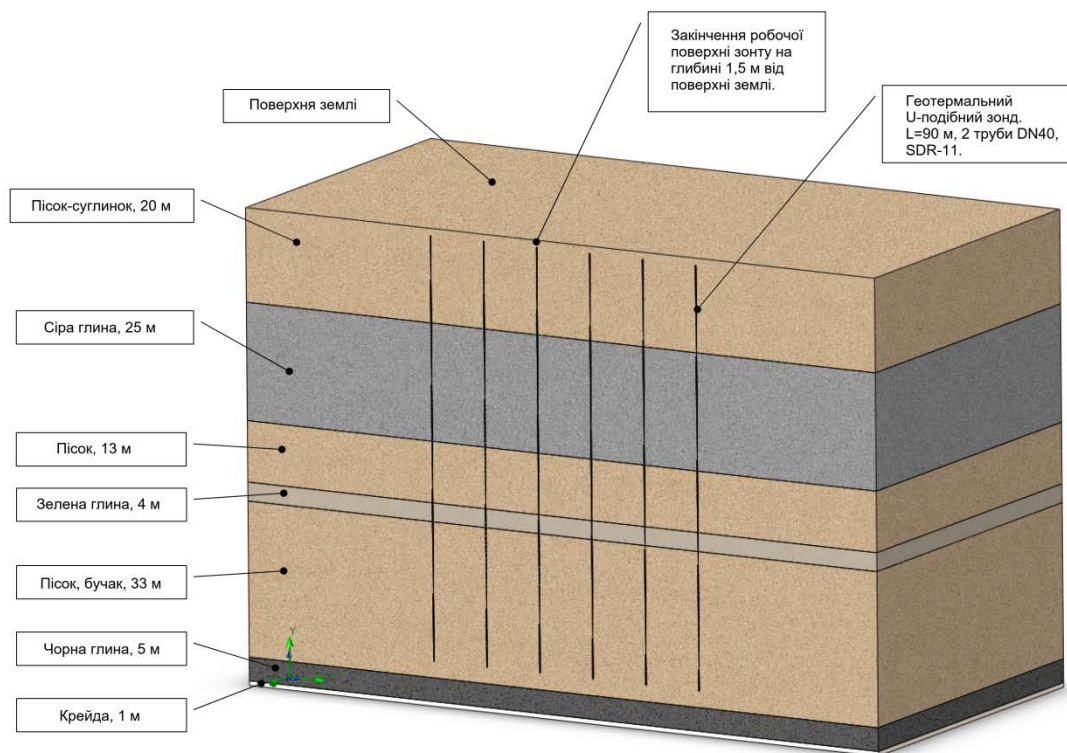


Рис. 2. Вертикальний розріз ґрунтів

- 2) показники теплопровідності, теплоємності та об'ємної щільності ґрунтів;
- 3) рекомендації VDI 4640 [12] щодо влаштування потужних систем геотермальних полів з можливістю використання в ролі акумулятора тепла та холоду;
- 4) середні температури порід на всій глибині свердловини-зонду, °C;
- 5) середня розрахункова температура повітря під час опалювального періоду, °C;
- 6) середня розрахункова температура повітря під час теплого періоду, °C;

7) тривалість опалювального періоду, градусо-днів.

Компонування взаємного розташування зондів приймають з урахуванням напряму течії підземних вод. Гексагональне розташування зондів дозволяє зменшити взаємний вплив зондів.

За результатами розрахунків виконують оцінку потенціалів теплової й холодої продуктивностей, які можна отримати, утилізуючи енергію порід земної кори.

Моделювання процесу охолодження та нагріву землі проводять з урахуванням річного циклу будівлі (роботи систем теплохолодопостачання): поступове охолодження взимку (з піковим показником у січні) та нагрівання влітку (робота систем кондиціювання). У розрахунках застосовані реальні теплохолодопотреби будівлі з урахуванням реального графіка роботи вказаних систем забезпечення параметрів мікроклімату.

Мета розрахунку полягає у визначенні наступних параметрів, а саме:

- 1) профілю температур шарів ґрунту в зоні встановлення свердловин на кінець опалювального періоду;
- 2) теж саме, на початок опалювального періоду, після періоду регенерації;
- 3) фактичної продуктивності первинного контуру в еквіваленті потужності, Вт/м довжини геотермального зонда;
- 4) річної кількості згенерованої петротермальної енергії в еквіваленті потужності довжини геотермального зонду, кВтгод./(місяць).

Даний графік (рис.3) демонструє термічний стан земляних порід після закінчення опалювального періоду в зоні встановлення геотермальних зондів. Після сезонного циклу відбору тепла мінімальна температура ґрунту становить близько 0 °С у прилежній зоні геотермального зонда, а допустима температура в даній зоні може складати до мінус 7 °С.

Середня швидкість просочування води в товщині ґрунтів (піску, глини) змінюється в діапазоні від 0,001 до 1 м/добу. У зимовий період у зв'язку з охолодженням порід процес руху підземних вод уповільнюється, а його вплив на загальну продуктивність мінімізується. Ключовий фактор у роботі геотермального поля, що впливає на постійну циклічну роботу нагрівання/охолодження – наявність процесу заморожування ґрунтових порід у зоні розташування зондів. Зазвичай це явище не становить небезпеки ні для ґрунтів, ні для теплообмінників, так як в останніх циркулює незамерзаючий розсіл (30-% розчин гліколю морозостійкістю до мінус 15 °С). Тим не менш, у разі замерзання ґрунтових порід в опалювальний період термін регенерації ґрунтів влітку суттєво уповільнюється. Все це позначається на сезонному ККД всієї системи.

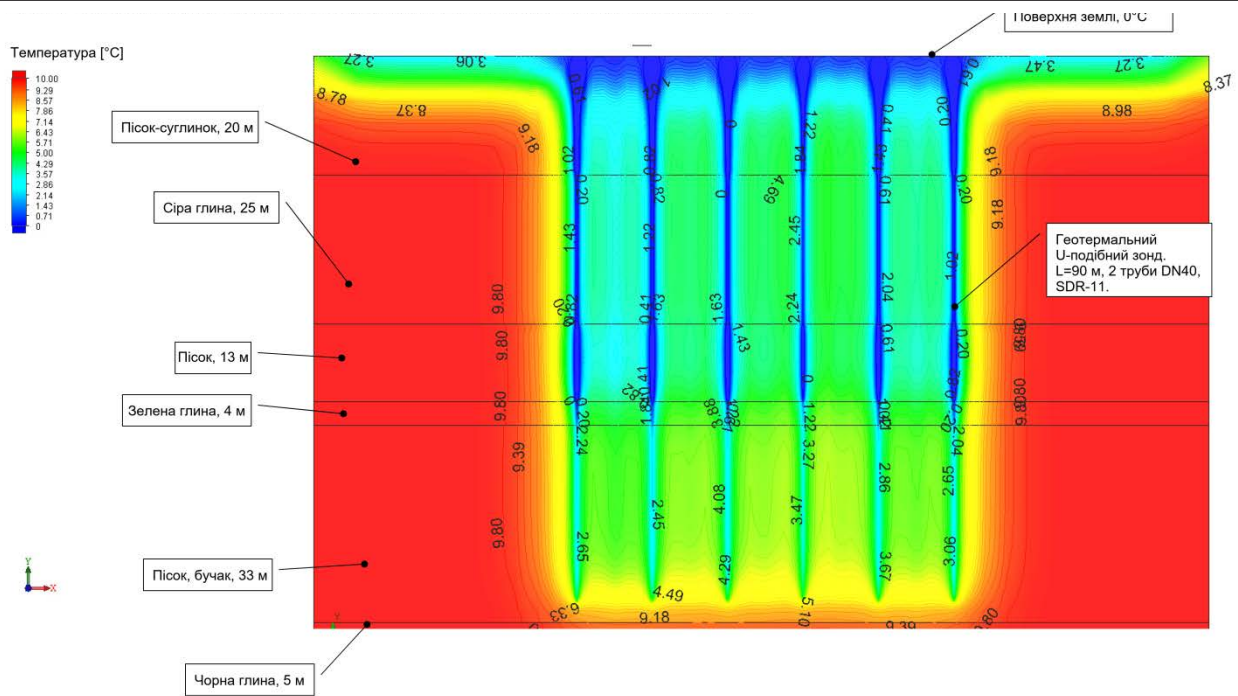


Рис. 3. Тепловий профіль ґрунту в зоні розташування зондів

Гексагональне розташування зондів дозволяє отримати в центральній частині поля сприятливішу картину. Розрахунок демонструє, що після сезонного циклу відбору тепла мінімальна температура ґрунту становить близько 0°C в примежовій зоні геотермального зонда. Замерзання ґрунтових порід не спостерігається. Даний вертикальний зріз демонструє розподіл температур по глибині та щільність теплового потоку. Останній показник повною мірою дає розуміння, звідки саме система теплових насосів «качає» теплову енергію. Жовті та зелені ділянки – головний колекторний вузол. У цьому місці відбувається найінтенсивніше закачування енергії з надр землі або маси води, що рухається.

У зв'язку з циклічністю роботи системи на нагрівання та охолодження в примежових шарах відбуваються найінтенсивніші теплові процеси. Вони можуть впливати на життєвий цикл зелених насаджень, які ростуть у зоні розміщення геотермального поля теплового насоса.

Аналогічним чином були виконані розрахунки для теплового періоду року. За їх результатами були побудовані теплові профілі, вертикальні та горизонтальні зрізи в зонах влаштування геотермального поля.

У цей період регенерація первинного контуру відбувалась за рахунок працюючої системи кондиціонування будівлі, системи сонячних колекторів, а також природного процесу підігріву за рахунок тепла надр землі та маси води, що рухається. Середня температура порід між зондами на початок серпня становила $6,5^{\circ}\text{C}$.

Загалом розрахунки річних циклів необхідно виконувати багаторазово, підбираючи оптимальні питомі значення з відбору «тепла» з погонного метра зонда. Річний цикл обов'язково слід завершувати з температурною регенерацією ґрунту до величин не менше 80 % від початкових умов.

Запропонована методика була використана при проектуванні ґрунтової теплонасосної установки для потреб енергопостачання громадської будівлі з розрахунковою тепловою потужністю 200 кВт.

До складу геотермального поля входило 38 зондів глибиною 90 м, кожний з яких складався з 4 труб DN32, SDR-11. Розташування зондів на майданчику виконувалось гексагонально, з кроком 6 та 7 м, відповідно.

В результаті було досягнуто (з розрахунку на 1 м довжини геотермального зонду):

- 1) фактична питома теплопродуктивність первинного контуру (на стороні випарника) – 41 Вт/м;
- 2) річне питоме споживання енергії із надр Землі – 83 кВт/м·рік, яке не перевищує граничне значення – 150 кВт/м·рік – згідно вимог нормативного документу [11].

Висновки

Визначення температурних полів у приповерхневих шарах земної кори є ключовим елементом при обґрунтуванні доцільності використання теплонасосних установок з вертикальними зондами для потреб енергопостачання будівель і споруд.

Запропонований метод кінцевих елементів дозволяє отримати розподіл температур ґрунту по глибині, вздовж свердловини при сезонному коливанні температур на поверхні.

Виконані дослідження показали, що циклічність роботи системи протягом року на нагрівання та охолодження в приміжових шарах ґрунту, а це найінтенсивніші теплові процеси, не впливає на життєвий цикл зелених насаджень, які ростуть у зоні розміщення геотермального поля теплового насоса.

Використані джерела

1. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони. – URL: http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011 (дата звернення: 12.09.2023).
2. Про ратифікацію Протоколу про приєднання України до договору про заснування Енергетичного Співтовариства: закон України: станом 1.01.2019 р. – № 2787-VI (2787-17) від 15.12.2010. – К.: ВВР, 2011, №24, ст.170.

3. Енергетична стратегія України на період до 2035 р. «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». – Схвал. розпорядженням КМУ від 18.08.2017 р. №605-р. – URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245234085 (дата звернення: 12.09.2023).
4. Про внесення змін до Закону України «Про теплопостачання» щодо стимулювання виробництва теплової енергії з альтернативних джерел енергії»: закон України, № 1959-VIII від 21.03.2017 р. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1959-19#Text> (дата звернення: 12.09.2023).
5. Дядькин Ю.Д. Основы горной теплофизики. – М.: Недра, 1968. – 147 с.
6. Кремнев О.А., Журавленко В.Я. Тепло- и массообмен в горном массиве подземных сооружений. – К.: Наукова думка, 1986. – 236 с.
7. Щербань А.Н., Бабинец А.Е., Цырульников А.С., Дядькин Ю.Д. Тепло Земли и его извлечение. – К.: Наукова думка, 1974. – 230 с.
8. Чудновский А.Ф. Теплофизика почвы. – М.: Наука, 1976. – 76 с.
9. Про енергетичну ефективність будівель: закон України. – 2118-VII. – К.: ВВР, 2017, №3, с.5, стаття 359.
10. Енин П.М. Использование геотермальной энергии для испарения сжижения углеводородных газов в целях газоснабжения потребителей; монография / П.М. Енин. – К.: Кондор, 2012. – 206 с.
11. ДСТУ Б В.2.5-44:2010. Проектування систем опалення будівель з тепловими насосами. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. – 48 с. – Чинний з 01.09.2010 р. – URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25972 (дата звернення 12.09.2023).
12. VDI 4640. Part 2. Thermal use of the underground-Ground source heat pump systems (Частина 2. Використовування підземного тепла. – Ґрунтові джерела системи теплових насосів). – URL: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4640-blatt-2-thermal-use-of-the-underground-ground-source-heat-pump-systems> (дата звернення 12.09.2023).

Doctor of Economics, Professor **Predun Kostiantyn**,
PhD student **Voinalovich Vitalii**,
PhD student **Guliyev Jamil**,
Kyiv National University of Construction and Architecture

ENHANCEMENT OF ENERGY EFFICIENCY AND BIOSPHERE COMPATIBILITY OF BUILDINGS AND STRUCTURES IN UKRAINE

The use of alternative energy sources is one of the most important areas of modern energy policy, aimed both at improving the environment and saving

traditional fuel and energy resources. Adopted legislative and regulatory acts contributed to the rapid growth of "green" energy in Ukraine. The meaning of the ecological and energy optimization process is not to replace one energy source with another, but economic and industrial transformation, decarbonization and decentralization.

A technical solution to the problem regarding the source of alternative energy due to the use of heat in the surface layers of the earth's crust is proposed. At the depth of placement of probes-heat exchangers, which are structurally part of heat pump installations, the soil temperature is practically unchanged throughout the year and is positive. Non-freezing glycol solutions are used to increase the operational reliability of the installations.

To study the process of thermal interaction in the zone of placement of heat exchanger probes, mathematical modeling using the finite element method was applied. As a result, a significant array of data was obtained, which reflects the dynamics of temperature fields in different modes of operation of ground-source heat pump installations with vertical probes.

Of particular interest is the analysis of temperature fields along the depth of the well. After the seasonal selection of heat - the end of the heating period - the minimum temperature of the soil in the boundary zone of the geothermal probe is not lower than 0 °C. That is, freezing of soil rocks does not occur.

In the warm period of the year, due to, for example, the working air conditioning system of the building, the energy source of which is the heat pump installation, regeneration of the primary circuit takes place. The average temperature of the rocks between the probes at the beginning of August is, according to calculations, 6.5 °C.

The obtained results of analytical studies were used in the design of a ground heat pump installation for the energy supply needs of a public building with an estimated thermal capacity of 200 kW.

Key words: energy efficiency; biosphere compatibility; renewable energy sources; near-surface layers of the earth's crust; ground heat pump installations; temperature fields; geothermal probe.

REFERENCES

1. Uhoda pro asotsiatsiyu mizh Ukrayinoyu, z odniyeyi storony, ta Yevropeys'kym Soyuzom, Yevropeys'kym spivtovarystvom z atomnoyi enerhiyi i yikhnimy derzhavamy-chlenamy, z inshoyi storony. – URL: http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011 (data zvernennya: 12.09.2023). {in Ukrainian}
2. Pro ratyfikatsiyu Protokolu pro pryednannya Ukrayiny do dohovoru pro zasnovannya Enerhetychnoho Spivtovarystva: zakon Ukrayiny: stanom 1.01.2019 r. –

№ 2787-VI (2787-17) vid 15.12.2010. – K.: VVR, 2011, №24, st.170. {in Ukrainian}

3. Enerhetychna stratehiya Ukrayiny na period do 2035 r. «Bezpeka, enerhoefektyvnist', konkurentospromozhnist'». – Skhval. rozporядzhennyam KМУ vid 18.08.2017 r. №605-r. – URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245234085 (data zvernennya: 12.09.2023). {in Ukrainian}

4. Pro vnesennya zmin do Zakonu Ukrayiny «Pro teplopostachannya» shchodo stymulyuvannya vyrobnytstva teplovoyi enerhiyi z al'ternatyvnykh dzherel enerhiyi»: zakon Ukrayiny, № 1959-VIII vid 21.03.2017 r. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1959-19#Text> (data zvernennya: 12.09.2023). {in Ukrainian}

5. Dyad'kyn YU.D. Osnovy hornoy teplofyziky. – M.: Nedra, 1968. – 147 s. {in Russian}

6. Kremnev O.A., Zhuravlenko V.YA. Teplo- y massoobmen v hornom massyve podzemnykh sooruzhenyy. – K.: Naukova dumka, 1986. – 236 s. {in Russian}

7. Shcherban' A.N., Babynets A.E., TSyrul'nykov A.S., Dyad'kyn YU.D. Teplo Zemly y eho yzvlachenye. – K.: Naukova dumka, 1974. – 230 s. {in Russian}

8. Chudnovskyy A.F. Teplofyzyka pochvy. – M.: Nauka, 1976. – 76 s. {in Russian}

9. Pro enerhetychnu efektyvnist' budivel': zakon Ukrayiny. – 2118-VII. – K.: VVR, 2017, №3, s.5, statta 359. {in Ukrainian}

10. Enyn P.M. Yspol'zovanye heotermal'noy énerhiyi dlya ysparenyya szhyzhenyya uhlevodorodnykh hazov v tselyakh hazosnazhennyya potrebyteley; monohrafiya / P.M. Enyn. – K.: Kondor, 2012. – 206 s. {in Russian}

11. DSTU B V.2.5-44:2010. Proektuvannya system opalennya budivel' z teplovymy nasosamy. – Kyiv: Minrehionbud Ukrayiny, 2010. – 48 s. – Chynnyy z 01.09.2010 r. – URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25972 (data zvernennya 12.09.2023). {in Ukrainian}

12. VDI 4640. Part 2. Thermal use of the underground-Ground source heat pump systems (Chastyna 2. Vykorystovuvannya pidzemnoho tepla. – Gruntovi dzherela systemy teplovykh nasosiv). – URL: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4640-blatt-2-thermal-use-of-the-underground-ground-source-heat-pump-systems> (data zvernennya 12.09.2023). {in English}