

DOI: 10.32347/2786-7269.2024.8.361-372

УДК 338.465.4:338.49:620.92

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,
Київський національний університет будівництва і архітектури

ОРГАНІЗАЦІЯ ВИКОНАННЯ ПІДГОТОВЧИХ І БУДІВЕЛЬНО-МОНТАЖНИХ РОБІТ ДЛЯ ВЛАШТУВАННЯ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ

Запропоновано технічне рішення щодо влаштування джерела альтернативної енергії за рахунок використання теплоти приповерхневих шарів земної кори шляхом розміщення вертикальних геотермальних зондів, які формують кластерні теплообмінники теплонасосних установок великої потужності. Оскільки температура ґрунту на глибині позитивна і практично незмінна протягом року, це дає можливість отримати постійний сталий тепловий потік для потреб теплохолодопостачання.

За результатами виконаного аналізу існуючих методів визначення потенціальної продуктивності геотермальних теплообмінників великої потужності як найбільш достовірний на тривалу перспективу обрано спосіб влаштування та будівельному майданчику тестового геотермального зонду або їх групи з наступним «випробовуванням теплового сприйняття» («thermal response test» (TRT)). При цьому існують певні складнощі щодо трактування отриманих результатів натурних досліджень, частина яких носить стохастичний характер (наприклад, вплив підземних течій зі змінними швидкостями і напрямками руху та теплообмін), а інші фактори (наприклад, опір теплопередачі від теплоносія до стінки труби, термічний опір тампонажного матеріалу та його контакту з породами ґрунту) можуть бути з достатньою точністю враховані.

Виконані дослідження, у т.ч. і натурні дозволили уточнити конструктивні рішення геотермальних зондів, визначити послідовність виконання підготовчих і будівельно-монтажних робіт з їх влаштування. З метою отримання достовірних даних під час проведення TRT підібрано відповідні характеристики матеріалів і обладнання. Окрім того, розроблено і детально проаналізовано складові програми випробовування теплового сприйняття. Сценарій передбачає підготовчі роботи, буріння свердловини, встановлення теплообмінників з наступним тампонуванням свердловини і безпосередньо тестування. За результатами випробовувань слід виконувати

моделювання геотермальних систем. Водночас питання, які розглянуті в межах цієї роботи, потребують подальшого аналізу та багатоітераційних моделювань.

Ключові слова: альтернативні джерела енергії; приповерхневі шари земної кори; ґрунтові теплонасосні установки; геотермальний теплообмінник; геотермальний зонд; випробування теплового сприйняття.

Формулювання цілей статті. Використання альтернативних джерел енергії наразі є одним із найбільш важливих напрямів енергетичної політики як у світі, так і в Україні, спрямованої як на поліпшення стану довкілля, так і на заощадження традиційних паливно-енергетичних ресурсів [1, 2]. Метою даної статті є визначення основних кроків щодо влаштування та принципів досліджень геотермального зонду, з яким проводять випробовування теплового сприйняття – thermal response test (далі TRT).

Постановка проблеми. Одним із джерел альтернативної енергії можуть слугувати приповерхневі шари земної кори [3]. Це досягається за допомогою розміщення геотермальних зондів, які формують кластерні теплообмінники, які входять до складу теплонасосних установок (ТНУ). Оскільки температура ґрунту практично незмінна протягом року і має позитивний градієнт, це дає можливість отримати постійний сталий тепловий потік для потреб теплохолодопостачання [4]. Таким чином, може бути створена кліматично нейтральна енергетична система, яка забезпечить надійне та доступне енергопостачання та стале економічне зростання.

Державні нормативні документи [5, 6] містять вимоги щодо влаштування лише відносно малих (до 30 кВт) за продуктивністю систем. Для більш потужних систем пропонується виконувати індивідуальні розрахунки з достатньо великою кількістю різноманітних припущень. І основне – відсутній достовірний прогноз, як себе буде вести така система через 20-50 років.

Аналіз досліджень та публікацій. В роботі [7] розглянуто найбільш характерні методи прогнозування продуктивності геотермальних теплообмінників для влаштування ТНУ, а саме:

- метод табличних показників [5];
- польовий досвід експлуатації протягом тривалого періоду [8-10];
- теоретичне моделювання на основі інформації щодо геологічного складу порід [11, 12];
- натурні випробовування тестового теплообмінника із збором масиву даних, за результатами яких проводилось математичне моделювання [13, 14].

Кожний із зазначених методів має свої як переваги, так і недоліки, що не дозволяє у повній мірі відповісти на питання, які параметри слід приймати для

кожного конкретного випадку, який розташовується в регіоні, де відсутні аналогічні проекти. Слід зазначити, методи польового випробування та математичного моделювання вимагають залучення висококваліфікованого персоналу, збору чималого масиву інформації. Що в свою чергу призводить до загального здороження проектних рішень та вимагає багато часу для визначення усіх параметрів теплонасосних установок.

Основна частина. Для того, щоб отримати достовірні дані під час проведення TRT, слід попередньо визначити ключові характеристики матеріалів та обладнання, яке буде залучене до влаштування тестових зондів та випробувального стенду. Детально розглянемо всі складові програми TRT за результатами влаштування і досліджень ґрунтової теплонасосної установки в Київській області.

Підготовчі роботи. Виготовлення і випробування геотермальних зондів. Геотермальний U-подібний тепловий зонд складається з двох поліетиленових труб SDR-11 діаметром 40 мм та наконечника (див. рис. 1). Один зонд має одне циркуляційне кільце. Перед початком монтажних робіт слід провести аеродинамічні випробування герметичності теплообмінників. Тиск під час аеродинамічних випробувань має менше, чим у 1,5 рази перевищувати номінальні значення для всіх складових частин та матеріалів теплообмінників.

Буріння. Буріння свердловин для занурення геотермальних зондів виконується роторним способом буровою установкою УРБ-2а2. Процес буріння передбачає такі кроки: Підготовка ділянки для розміщення бурової установки. Розміщення бурової установки на спланованій ділянці. Риття зумпфу для розведення глинистого розчину. Облаштування жолобної системи для циркуляції глинистого розчину. Спорудження містків для бурильних труб. Розкладка бурильних труб та необхідного обладнання. Заземлення електрообладнання бурової установки. Перевірка всіх систем бурової установки. Запуск двигуна. Підйом щогли бурового станка. Підготування глинистого розчину (бентонітова глина). Проведення буріння діаметром 150 мм до глибини 100,0 м з нарощуванням необхідної кількості бурових труб. Для промивки свердловин при бурінні необхідно використовувати глинистий розчин з питомою вагою 1,5 г/см³ та в'язкістю 22–25 по СПВ-5. Підйом бурових труб. Приготування тампонажного розчину. Розчин готується на місці проведення бурових робіт. Опускання підготовленого геотермального зонду за допомогою бурових труб. Заливка свердловини тампонажним розчином. Демонтаж бурової установки. Переїзд бурової установки на нову підготовлену точку буріння. Мінімальна відстань від осі свердловини до існуючих будівельних конструкцій чи споруд повинна бути 2 м. Процес буріння не повинен вплинути на стабільність існуючих споруд.

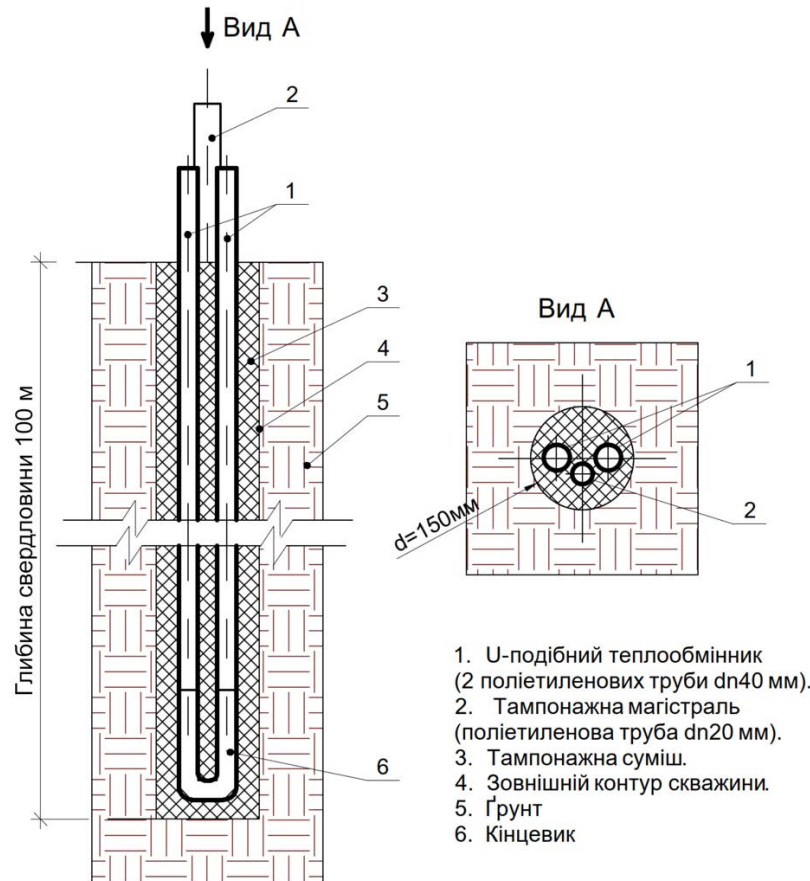


Рис. 1. Конфігурація геотермального зонду.

Встановлення теплообмінників. Тампонування свердловин. Вертикальні участки свердловин слід виконувати строго вертикально або з невеликим кутом нахилу. Під час буріння свердловин слід чітко дотримуватись одного значення відхилення від вертикалі під час всієї довжини свердловини. Правильна установка теплообмінників, а також ретельне тампонування є найбільш відповідальними роботами та слугують передумовою бездоганної роботи теплових насосів. Занурення теплообмінників в свердловини повинна виконувати організація, яка виконувала буріння. В процесі будівельно-монтажних робіт слід обережно поводитись з теплообмінниками, не допускаючи будь-яких механічних пошкоджень. Монтаж геотермальних теплообмінників складається з наступних етапів, його слід зафіксувати протоколом випробувань та здачі виконаних робіт:

1. Для полегшення занурення теплообмінника в свердловину труби слід заповнити водою. Навіть в разі встановлення зондів в зоні сухих ґрунтів труби теплообмінників слід заповнити водою до процедури тампонування. Це потрібно для того, щоб теплообмінник не видавлювався тампонажною сумішшю під час заповнення. Після встановлення першого зонду, в протоколі монтажу слід зазначити, чи є необхідність встановлювати додаткові тягарі на наконечник при подальших етапах будівництва.

2. Занурення теплообмінника в свердловину. При заповнених трубах теплообмінника водою на поверхні землі не потрібно застосовувати значних зусиль для занурення. Слід використовувати спеціальний пристрій, що дозволяє одночасно спрямовувати зусилля, які необхідні для занурення зонду, і контролювати, щоб труби зонду рухались по прямій лінії без зламів та загинів. Водозаповнений теплообмінник слід стримувати від проковзування та занадто швидкого занурення у свердловину. Лише при досягненні половини глибини свердловини слід розпочати застосовувати додаткові слабкі зусилля для його занурення.

3. Під час занурення теплообмінника в свердловину слід паралельно занурювати тампонажну магістраль. В залежності від глибини свердловин та геологічних умов на майданчику слід використовувати дві тампонажні магістралі, для більш надійного заповнення по всій довжині. Один трубопровід занурюється на повну глибину, інший – на половину загальної глибини свердловини.

4. Після процесу занурення теплообмінника та тампонажної магістралі на поверхні землі слід зафіксувати кінцівки трубопроводів, щоб уникнути можливих осьових переміщень.

5. Після процесу занурення, але до процесу тампонування рекомендується виконати гідравлічні випробування водозаповненого теплообмінника на герметичність. Тиск, на який слід випробувати систему, складає 6 бар, попереднє випробування тиску протягом 30 хв. Потім слід витримати систему під тиском протягом 60 хв. Максимальна втрата тиску за цей час не повинна перевищувати 0,2 бар.

6. В зимовий період монтажних робіт теплообмінник має бути частково спорожнений за допомогою повітряного компресору до підключення в загальну систему та її заповнення. Рівень рідини має бути на 2 м нижче позначки землі.

7. Після завершення робіт над зондом, кінці трубопроводів слід герметично закрити, а місця виходу труб із ґрунту захистити кришками із будівельних конструкцій

Процес тампонування вільного простору між трубами теплообмінника та ґрунтом. Встановлення теплообмінника на проектне місце, підключення труб до випробувальної установки слід виконувати лише після повного тампонування свердловини. Це означає, що свердловина має бути повністю заповнена від наконечника до поверхні без будь-яких пустот. Тампонування слід виконувати бездоганно з таких причин:

- забезпечення якісного трансферу теплової енергії від теплоносія до геологічних порід вздовж усієї довжини зонду;

- герметизація свердловини та отвору на поверхні землі для захисту ґрунтових вод від забруднення поверхневими речовинами, рідинами та матеріалами;

- заповнення можливих пустот в зоні встановлення теплообмінника.

Якісне заповнення свердловини тампонажною сумішшю можливе лише в процесі заповнення «знизу-вверх».

Оскільки до початку випробувань відомі діаметр і глибина свердловини, розміри геотермального зонду, то можливо розрахувати необхідну кількість тампонажної суміші. Тим не менш, наявність пустот та течій води в зоні встановлення теплообмінника може призвести до суттєвого збільшення необхідної кількості тампонажу. Це нормальне явище, яке на ранніх етапах дає змогу оцінити майбутню необхідну кількість сировини при влаштуванні кластерного теплообмінника.

Тампонажна суміш повинна повністю задовольняти всі температурні умови, які можуть виникнути в процесі роботи системи. Для систем, що працюють виключно для виробництва тепла, дана суміш повинна бути морозостійкою. На практиці, суміш із бентоніту (натуральна мінеральна глина) / НОЗ (високоєфективний теплопровідний цемент) / вода, або бентоніт / НОЗ / пісок / вода добре себе зарекомендувала. Чиста суміш із бентоніту та води має низький коефіцієнт теплопровідності ($<0,7$ Вт/мК при 10 °С) та не є морозостійкою. Наразі на ринку доступна велика кількість готових до використання сухих сумішей, які спеціально розроблені для різних геологічних умов буріння [15, 16]. На сьогоднішній день проведена велика кількість дослідження [8, 17], основною задачею яких був пошук ефективних комбінацій матеріалів, на основі яких можна виготовляти якісні тампонажні суміші, у т.ч. безпосередньо на місці будівництва. За результатами аналізу теплофізичних властивостей усіх зазначених вище матеріалів, результатами виконаних натурних досліджень апробовано наступний склад суміші (у масових співвідношеннях): сухий бентоніт – 0,4; портланд-цемент – 0,7; пісок – 1,0; вода – 0,3-0,5 (кількість визначається за фактом замісу). Коефіцієнт теплопровідності такої суміші складає від 0,8 до 2,0 Вт/мК в залежності від насиченості водою. Запропонований тампонаж представляє собою рідку пластичну суспензію, яка дуже гарно піддається перекачці насосом для бетону. Заповнення свердловин відбувається рівномірно та без утворення пустот по вертикалі. А, орієнтовно, вже через 7 діб можна розпочинати теплотехнічні випробування.

Тестування. Для проведення тестування, необхідно заздалегідь виробити випробувальну установку. Принципова схема такого агрегату наведена на рис.2.

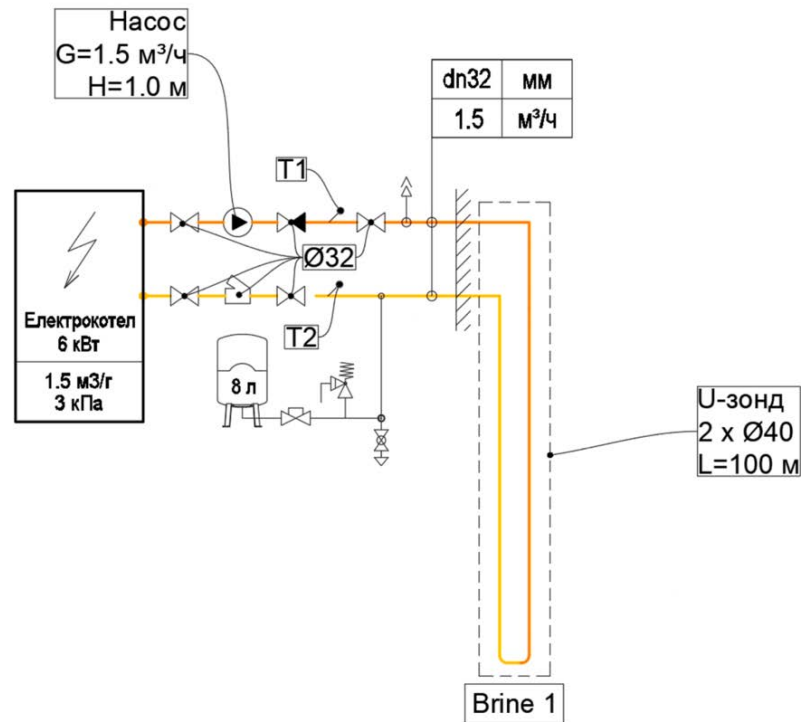


Рис. 2. Принципова схема випробувальної установки

Агрегат складається із наступних елементів. Електричний котел, потужністю 6 кВт із можливістю плавно регулювати продуктивність. Запірно-регулююча арматура, циркуляційний насос з електронним управлінням, розширювальний бак, тепловий лічильник із комплектом термодатчиків, обчислювальний модуль із двома термопарами. Перед кожним випробуванням необхідно перевірити всі складові елементи агрегату, скинути показники витрати, температури та теплової енергії на обчислювачі теплового лічильника та модуля. Порядок проведення теплових випробувань:

1. Заповнити тестові теплообмінники водою (25-% пропіленгліколем – при проведенні випробувань взимку).
2. Підключити труби теплообмінників згідно технологічної карти до випробувального стенду.
3. Встановити робочий режим циркуляції у випробувальному зонді, що передбачає роботу від нагрівальної установки, загальною потужністю 6 кВт.
4. Режим роботи насосу передбачає сталу витрату рідини.
5. Запустити циркуляційний насос та забезпечити повний випуск повітря із циркуляційного контуру.
6. Запустити електронагрівач в робочий режим. Заміри температур згідно технологічної карти проводити протягом 48-72 годин, виконуючи фіксацію показань кожного температурного датчика щогодини.
7. Після випробувань протягом 48-72 годин скласти звіт.

8. Переключити установку на наступний по плану зонд, рухаючись за годинниковою стрілкою.

9. Провести аналогічні випробування з кожним зондом кластерного теплообмінника.

10. Скласти відповідні звіти по кожному зонду.

Після успішного випробування та збору масиву даних, а саме: зміни температур в подавальному та зворотному трубопроводах, зміни витрати теплоносія та сумарної кількості сприйнятої зондом теплової енергії, слід перейти до аналізу отриманої інформації та моделювання.

В якості прикладу нижче подані результати польових випробувань. В їх основу була закладена наступна вихідна інформація:

- теплопровідність ґрунту прийнята згідно геологічної колонки, яка на 85 % складається із пісків та супісків різної щільності, насичених водою; відповідно, значення коефіцієнту теплопровідності становить 2,5 Вт/м·К;
- теплоємність ґрунту прийнята 2,5 МДж/м³·К;
- початкова, середньорічна температура ґрунту на глибині нижче 15 м – 8 °С;
- геотермальний тепловий потік – 0,06 В/м²;
- глибина свердловини – 100 м;
- схема влаштування зондів – квадрат, зі стороною 6 м; зонди (4 шт.) встановлені у вершинах квадрату;
- діаметр свердловини – 150 мм;
- зовнішній діаметр трубки теплообмінника – 40 мм;
- товщина стінки трубки теплообмінника – 3,7 мм;
- теплопровідність матеріалу труби (ПЕ, SDR-11) – 0,42 Вт/м·К;
- відстань між осями подавального та зворотного трубопроводів зонду – 60 мм;
- теплопровідність тампонажної суміші – 1,47 Вт/м·К;
- опір теплопередачі контакту труби та тампонажу – умовно прийнято 0, хоча в процесі експлуатації це значення постійно змінюється по мірі охолодження та осушення тампонажу;
- теплопровідність теплоносія (вода, 20 °С) – 0,6 Вт/м·К;
- теплоємність теплоносія – 4182 Дж/кг·К;
- густина теплоносія – 998 кг/м³;
- в'язкість теплоносія – 0,001 кг/м·с;
- витрата теплоносія через один теплообмінник – 0,42 л/с.

Висновки

Таким чином, сформовано принципи влаштування та досліджень кластерного теплообмінника теплонасосної установки, які підтвердили свою роботоздатність та ефективність за результатами натурних випробувань,

виконаних у Київській області. Надалі буде розглянуто можливість використання масиву даних за результатами польових випробувань з точки зору фактичної можливості проведення моделювань, аналогічно тим крокам, які передбачаються програмою TRT. Формування принципів роботи та конструкція установки для проведення TRT дає можливість збору саме тої інформації, яка може бути без наближень та екстраполяції використана як вихідна для комп'ютерного моделювання кластерного теплообмінника.

В основі цього методу покладено експериментальний підхід, який базується на теоретичних даних щодо віртуального теплообмінника та його реального, виконаного на будівельному майданчику та перевіреного протягом тривалого часу аналога. Передбачається проведення певної кількості моделювань за наведеним сценарієм із порівнянням отриманих результатів.

Використані джерела

1. Цілі сталого розвитку: Україна. Національна доповідь. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/natsionalna-dopovid-csr-Ukrainy.pdf> (дата звернення: 22.05.2024).
2. Стратегія низьковуглецевого розвитку України до 2050 р. URL: https://merp.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/LEDS_ua_last.pdf (дата звернення: 22.05.2024).
3. Щербань А.Н., Бабинец А.Е., Цырульников А.С., Дядькин Ю.Д. Тепло Земли и его извлечение. – К.: Наукова думка, 1974. – 230 с.
4. Кремнев О.А., Журавленко В.Я. Тепло- и массообмен в горном массиве подземных сооружений. – К.: Наукова думка, 1986. – 236 с.
5. ДСТУ Б В.2.5-44:2010. Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування систем опалення будівель з тепловими насосами (EN 154550:2007, MOD). – Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. – 48 с. – Чинний від 2010-02-02. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25972 (дата звернення 22.05.2024).
6. ДСТУ EN 378-4:2014. Холодильні установки та теплові насоси. Безпечність та екологічні вимоги. Частина 4. Експлуатація, технічне обслуговування, ремонт і поновлення (EN 378-4:2008+A1:2012, IDT). На заміну ДСТУ EN 378-4:2005; чинний від 2015-07-01. Вид. офіц.
7. Предун К.М. Аналіз методів прогнозування продуктивності геотермальних теплообмінників для влаштування теплонасосних установок / К.М.Предун, В.О.Войналович, Дж.Гулієв // *Містобудування та територіальне управління: наук.-техн. збірник*. – К.: КНУБА, 2024. – Вип.85. – с.494-504. URL: <https://doi.org/10.32347/2076-815X.2024.85.494-504> (дата звернення: 17.05.2024).
8. Allan M., Philippacopoulos A. Thermally conductive cementitious grouts for geothermal heat pumps. progress report by 1998. New York: Brookhaven National Lab. (BNL), Upton, NY (United States), 1998. 78 с. URL: <https://doi.org/10.2172/760977> (дата звернення: 17.05.2024).
9. Ashrae. 2019 ASHRAE Handbook – HVAC Applications. Ashrae, 2019. 1408 p.
10. Kavanaugh S. Ground and water source heat pumps: a manual for the design and installation of ground-coupled, groundwater, and lake water heating and cooling systems in southern climates. – Oklahoma State University. – 154 p.
11. Infinite borehole field model – a new approach to estimate the shallow geothermal potential of urban areas applied to central Budapest, Hungary / K. Korhonen та ін. – *Renewable energy*. – 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.043> (дата звернення: 17.05.2024).

12. Tarrad A. H. 3D numerical modeling to evaluate the thermal performance of single and double u-tube ground-coupled heat pump// *High Tech and innovation journal*. – 2022. – Т. 3, № 2. – с.115–129. URL: <https://doi.org/10.28991/hij-2022-03-02-01> (дата звернення: 17.05.2024).
13. Mazzotti Pallard W., Lazzarotto A. Thermal response tests: a biased parameter estimation procedure? // *Geothermics*. – 2021. – Т. 97. – с.102221. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102221> (дата звернення: 17.05.2024).
14. Seasonal changes in thermal process based on thermal response test of borehole heat exchanger / M. Yoshioka та ін. // *Geothermics*. – 2022. – Т. 102. – С. 102390. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102390> (дата звернення: 17.05.2024).
15. *LAVIOSA*. URL: https://www.laviosa.com/wp-content/uploads/2015/01/CivilEngineering_G_Grouting__Termoplast-Plus_TDS_ENG.pdf (дата звернення: 17.05.2024).
16. *Minerals Technologies Inc*. URL: <https://www.mineralstech.com/docs/default-source/performance-materials-documents/cetco/drilling-products/technical-data-sheets/tds---geothermal-grout.pdf> (дата звернення: 17.05.2024).
17. Allan M., Kavanaugh S. Thermal conductivity of cementitious grouts and impact on heat exchanger length design for ground source heat pumps// *HVAC&R research*. – 1999. – Т. 5, № 2. – с. 85–96. URL: <https://doi.org/10.1080/10789669.1999.10391226> (дата звернення: 17.05.2024).

Doctor of Economics, Professor **Kostiantyn Predun**,
PhD student **Vitalii Voinalovich**,
Kyiv national university of construction and architecture

ORGANIZATION OF EXECUTION OF PREPARATORY AND CONSTRUCTION AND INSTALLATION WORKS FOR INSTALLING GEOTHERMAL HEAT PUMPS

A technical solution is proposed for the installation of an alternative energy source by using the heat of the near-surface layers of the earth's crust by placing vertical geothermal probes that form cluster heat exchangers of high-capacity heat pump units. Since the temperature of the soil at depth is positive and practically unchanged throughout the year, it makes it possible to obtain a constant stable heat flow for the needs of heating and cooling.

According to the results of the analysis of the existing methods of determining the potential productivity of geothermal heat exchangers of large capacity, the method of installation and construction site of a test geothermal probe or their group with the subsequent "thermal response test" (TRT) was chosen as the most reliable in the long term. At the same time, there are certain difficulties regarding the interpretation of the results of field studies, some of which are stochastic in nature (for example, the influence of underground currents with variable speeds and directions of movement and heat exchange), and other factors (for example, the resistance of heat transfer from the coolant to the pipe wall, the thermal resistance of

the backfill material and its contact with soil rocks) can be taken into account with sufficient accuracy.

Conducted research, including and field tests made it possible to specify the constructive solutions of geothermal probes, to determine the sequence of preparatory and construction and installation works for their installation. In order to obtain reliable data during TRT, appropriate characteristics of materials and equipment were selected. In addition, the components of thermal perception testing programs were developed and analyzed in detail. The scenario involves preparatory work, drilling of the well, installation of heat exchangers followed by plugging of the well and direct testing. Based on the test results, modeling of geothermal systems should be performed. At the same time, the issues considered in this work require further analysis and multi-iteration simulations.

Key words: alternative energy sources; near-surface layers of the earth's crust; ground heat pump installations; geothermal heat exchanger; temperature fields; geothermal probe; thermal response test.

REFERENCES

1. Tsili staloho rozvytku: Ukrayina. Natsional'na dopovid'. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/natsionalna-dopovid-csr-Ukrainy.pdf> (data zvernennya: 22.05.2024). {in Ukrainian}.
2. Stratehiya nyz'kovuhletsevoho rozvytku Ukrayiny do 2050 r. URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/LEDS_ua_last.pdf (data zvernennya: 22.05.2024). {in Ukrainian}.
3. 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 Ukrainian}.
4. Kremnev O.A., Zhuravlenko V.YA. Teplo- y massoobmen v hornom massyve podzemnykh sooruzhenyy. – K.: Naukova dumka, 1986. – 236 s. {in Ukrainian}.
5. DSTU B V.2.5-44:2010. Proektuvannya system opalennya budivel' z teplovymy nasosamy (EN 154550:2007, MOD).. – 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: 22.05.2024). {in Ukrainian}.
6. DSTU EN 378-4:2014. Kholodyl'ni ustanovky ta teplovi nasosy. Bezpechnist' ta ekolohichni vymohy. Chastyna 4. Ekspluatatsiya, tekhnichne obsluhovuvannya, remont i ponovlennya (EN 378-4:2008+A1:2012, IDT). Na zaminu DSTU EN 378-4:2005; chynnyy vid 2015-07-01. Vyd. Ofits. {in Ukrainian}.
7. Predun K.M. Analiz metodiv prohnozuvannya produktyvnosti heotermal'nykh teploobminnykiv dlya vlashtuvannya teplonasosnykh ustanovok / K.M.Predun, V.O.Voynalovych, Dzh.Huliyev // Mistobuduvannya ta terytorial'ne upravlinnya: nauk.-tekhn. zbirnyk. – K.: KNUBA, 2024. –Vyp.85. – s.494-504. URL: <https://>

doi.org/10.32347/2076-815X.2024.85.494-504 (data zvernennya: 17.05.2024). {in Ukrainian}.

8. Allan M., Philippacopoulos A. Thermally conductive cementitious grouts for geothermal heat pumps. progress report by 1998. New York: Brookhaven National Lab. (BNL), Upton, NY (United States), 1998. 78 c. URL: <https://doi.org/10.2172/760977> (data zvernennya: 17.05.2024). {in English}.

9. Ashrae. 2019 ASHRAE Handbook. – HVAC Applications. Ashrae, 2019. 1408 p. {in English}.

10. Kavanaugh S. Ground and water source heat pumps: a manual for the design and installation of ground-coupled, groundwater, and lake water heating and cooling systems in southern climates. – Oklahoma State University. – 154 p. {in English}.

11. Infinite borehole field model – a new approach to estimate the shallow geothermal potential of urban areas applied to central Budapest, Hungary / K. Korhonen та ін. – *Renewable energy*. – 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.043> (data zvernennya: 17.05.2024). {in English}.

12. Tarrad A. H. 3D numerical modeling to evaluate the thermal performance of single and double u-tube ground-coupled heat pump// *High Tech and innovation journal*. – 2022. – Т. 3, № 2. – с.115–129. URL: <https://doi.org/10.28991/hij-2022-03-02-01> (data zvernennya: 17.05.2024). {in English}.

13. Mazzotti Pallard W., Lazzarotto A. Thermal response tests: a biased parameter estimation procedure? // *Geothermics*. – 2021. – Т. 97. – с. 102221. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102221> (data zvernennya: 17.05.2024). {in English}.

14. Seasonal changes in thermal process based on thermal response test of borehole heat exchanger / M. Yoshioka та ін. // *Geothermics*. – 2022. – Т. 102. – С. 102390. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102390> (data zvernennya: 17.05.2024). {in English}.

15. LAVIOSA. URL: https://www.laviosa.com/wp-content/uploads/2015/01/CivilEngineering_G_Grouting_Termoplast-Plus_TDS_ENG.pdf (data zvernennya: 17.05.2024). {in English}.

16. *Minerals Technologies Inc*. URL: <https://www.mineralstech.com/docs/default-source/performance-materials-documents/cetco/drilling-products/technical-data-sheets/tds---geothermal-grout.pdf> (data zvernennya: 17.05.2024). {in English}.

17. Allan M., Kavanaugh S. Thermal conductivity of cementitious grouts and impact on heat exchanger length design for ground source heat pumps// *HVAC&R research*. – 1999. – Т. 5, № 2. – с. 85–96. URL: <https://doi.org/10.1080/10789669.1999.10391226> (data zvernennya: 17.05.2024). {in English}.