УДК 624.15:620.92:697

В. В. Любич
М.С. Барбалюк

ВИКОРИСТАННЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ У ФУНДАМЕНТНИХ КОНСТРУКЦІЯХ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглянуто використання фундаментних паль та інших підземних конструкцій як елементів ґрунтового теплообмінника. Визначено необхідність спільного теплотехнічного й геотехнічного розрахунку. Запропоновано послідовність перевірки енергетичних паль з урахуванням сезонного балансу, температурних деформацій та умов експлуатації теплового насоса.

Ключові слова: енергетичні палі, термоактивні фундаменти, ґрунтовий теплообмінник, тепловий насос, температурні деформації.

Abstract

Foundation piles and other underground structures are considered as components of ground heat exchangers. The need for coupled thermal and geotechnical assessment is identified. A verification sequence for energy piles is proposed, accounting for seasonal heat balance, temperature-induced deformation and heat-pump operating conditions.

Keywords: energy piles, thermo-active foundations, ground heat exchanger, heat pump, thermal deformation.

Вступ

Фундаментні конструкції можуть виконувати не лише несучу, а й теплообмінну функцію. Розміщення замкнених трубних контурів у палях дає змогу використовувати низькопотенційну теплоту ґрунту для роботи теплового насоса. Для міської забудови це становить інтерес за обмеженої площі ділянки. Водночас додаткова функція змінює умови роботи конструкції. Мета роботи — визначити послідовність оцінювання термоактивного фундаменту без підміни геотехнічної надійності показниками енергетичної ефективності.

Результати дослідження

Під термоактивними фундаментами розуміють конструкції, в яких контури теплоносія інтегровані в палі, плити або стіни підземної частини будівлі [1]. У низькотемпературних системах джерелом є приповерхневий ґрунтовий масив, а не високотемпературний геотермальний резервуар. Тепловий насос переносить теплоту на потрібний температурний рівень і споживає електроенергію. Тому відбір теплоти з ґрунту не тотожний кількості теплоти, поданої до системи опалення.

Схема роботи охоплює ґрунт, бетон, трубний контур, теплоносій і тепловий насос. У кожній ланці виникає температурний перепад, від якого залежить загальна продуктивність. Зі збільшенням потреби у теплоті не можна довільно підвищувати відбір з одного погонного метра палі. Його межі визначаються теплопровідністю й теплоємністю середовища, взаємним впливом паль, режимом навантаження та допустимими температурами.

Дослідження теплообмінних паль показують, що температурні впливи необхідно враховувати разом із механічним навантаженням [2, 3]. Нагрівання й охолодження спричиняють деформації, які частково стримуються ґрунтом і ростверком. У результаті змінюються осьові зусилля та переміщення. Ці зміни залежать від закріплення голови й вістря палі та не можуть визначатися лише вільним температурним видовженням бетону.

Поточну теплову потужність, передану теплоносієм, можна визначати за балансом:

$$Q = \dot{m}\, c_p\, \Delta T$$

де $\dot{m}$ — масова витрата, кг/с; ср — питома теплоємність, Дж/(кг·К); ΔТ — різниця температур між подачею й поверненням, К. Результат у ватах характеризує потік у вимірюваному контурі. Ілюстративно, за витрати 0,5 кг/с, теплоємності 4000 Дж/(кг·К) та перепаду 3 К отримуємо 6000 Вт, або 6 кВт. Значення теплоємності має відповідати фактичному складу й температурі теплоносія.

Якщо тепловий насос відбирає з ґрунтового контуру 6 кВт і споживає 2 кВт електричної потужності, ідеалізований баланс дає 8 кВт теплоти на стороні споживача та COP = 4. Цей приклад не враховує окремі допоміжні споживачі й не є сезонним показником ефективності. Для оцінювання системи за рік потрібно враховувати циркуляційні насоси, змінні температури та періоди неповного навантаження.

Пропонується така послідовність проєктної перевірки: геологічні та гідрогеологічні дослідження; визначення теплових властивостей; побудова сезонного графіка навантаження; моделювання температурного поля групи паль; спільний розрахунок зусиль і переміщень; перевірка монтажної та експлуатаційної надійності контурів. Контури до бетонування потребують випробування герметичності й захисту від пошкоджень. Несучий переріз та армування мають забезпечувати конструктивну функцію незалежно від режиму теплообміну.

Для українських об'єктів варто порівнювати енергетичні палі зі звичайним фундаментом та окремим теплообмінником. Результат залежить від конструктивної потреби у палях і співвідношення опалення й охолодження. Сезонне повернення теплоти та ризик поступового охолодження масиву перевіряються багаторічним розрахунком.

Розрахункові сценарії та оцінювання ефективності

Розрахункове оцінювання термоактивного фундаменту пропонується будувати на трьох послідовних моделях: теплообміні ґрунтового поля, роботі теплового насоса та механічній реакції конструкції. Результат однієї моделі є вхідною умовою для іншої, тому їх не слід розглядати ізольовано. Задана температура теплоносія впливає на продуктивність насоса, але водночас визначає температурний вплив на палю. Допустимий режим має забезпечувати і тепловий ефект , і необхідну конструктивну надійність. Збільшення відбору теплоти без перевірки двох інших складових не утворює достатнього обґрунтування ефективності.

Для попереднього аналізу можна визначати вільне температурне подовження елемента:

$$\Delta L_{free} = \alpha \, L \, \Delta T$$

де ΔLfree — подовження за відсутності зовнішнього стримування; α — коефіцієнт температурного розширення; L — довжина елемента; ΔT — зміна температури. Формула є орієнтиром для оцінки масштабу деформації, а не готовим розрахунком переміщення робочої палі. Ґрунт, ростверк і надземна конструкція можуть обмежувати вільну зміну довжини. За такого обмеження виникають додаткові зусилля, величина яких залежить від реальних умов взаємодії. Тому результат не можна безпосередньо приймати як осідання або підйом фундаменту будівлі.

За умовних значень $\alpha = 0{,}00001\ К^{-1}$, L = 20 м і ΔT = 10 К вільна зміна довжини становить 0,002 м, або 2 мм. Для протилежного напрямку температурної зміни змінюється знак деформації. Навіть невелике переміщення окремого елемента потрібно оцінювати разом із суміжними палями та жорсткістю ростверку. Рівномірна температурна дія на всю групу й нерівномірна дія на її частину можуть мати різні наслідки. Наведені числа демонструють порядок обчислення, але не є характеристикою певного бетону, ґрунту або запроєктованої фундаментної системи.

Теплову роботу групи доцільно перевіряти за характерними періодами: максимального зимового відбору, літнього повернення теплоти та переходу між режимами. За однакової річної енергії короткий інтенсивний відбір і рівномірне навантаження можуть створювати різні температурні поля. Для порівняння потрібні часові графіки, а не тільки річний підсумок. Окремо слід дослідити випадок відключення частини контурів, оскільки решта поля може отримати інший розподіл навантаження. Це дозволяє визначити резервування системи без приписування кожній палі необмеженої здатності компенсувати відмову сусідньої.

Для сезонної оцінки теплової установки пропонується використовувати відношення корисної теплоти до повного електроспоживання:

$$SPF = \frac{Q_{heat}}{E_{comp} + E_{pump} + E_{aux}}$$

де Qheat — теплота, передана споживачу за період; Ecomp — електроенергія компресора; Epump — електроенергія циркуляційних насосів; Eaux — інші враховані допоміжні витрати. Усі енергії повинні належати до однакових часових меж. Якщо до корисної теплоти зараховано роботу додаткового електричного нагрівача, його споживання також має бути включене до знаменника.

Показник SPF за таким визначенням відрізняється від миттєвого коефіцієнта компресорної установки та потребує окремого опису вимірювальної схеми.

Наприклад, за умовної річної віддачі 40 МВт·год теплоти, споживання компресора 10 МВт·год, насосів 2 МВт·год та іншого допоміжного обладнання 0,5 МВт·год SPF становить 3,2. Відношення теплоти лише до електроенергії компресора дорівнює 4,0, але характеризує вужчу межу обліку. Різниця показує внесок допоміжних витрат. Для вибору між альтернативами потрібно застосувати однакову межу до кожної системи. Наведений розрахунковий приклад не встановлює очікуваного сезонного показника для всіх фундаментних теплообмінників або теплових насосів.

Окремої уваги потребує довгостроковий баланс ґрунтового масиву. Якщо за умовний рік із нього відібрано 30 МВт·год і повернуто 20 МВт·год, різниця становить 10 МВт·год. Це не означає автоматичного зниження температури на певну кількість градусів: температурна реакція залежить від об’єму, теплофізичних властивостей і зовнішнього теплообміну. Проте така різниця є підставою для багаторічного моделювання. Доцільно перевірити, чи не погіршуються температури теплоносія в наступних циклах і чи зберігаються допустимі умови роботи конструкції та обладнання.

Економічне зіставлення має враховувати додаткові контури, колекторний вузол, автоматику, випробування та енергію перекачування. Вартість несучої частини фундаменту розподіляється відповідно до обраної бази порівняння: конструктивно необхідні палі не можна вдруге повністю зараховувати як додаткове енергетичне обладнання. Водночас реальні витрати на інтеграцію й контроль не повинні зникати з оцінки. Рішення доцільне за сукупності підтверджених умов, а не лише за сприятливого миттєвого коефіцієнта перетворення. Такий підхід поєднує теплову, механічну та експлуатаційну оцінки в одному проєктному обґрунтуванні.

Практична реалізація та перевірка результатів

Практичне обґрунтування термоактивного фундаменту доцільно починати зі зіставлення двох самостійних потреб: конструктивної необхідності фундаментних елементів і потреби будівлі в тепловій енергії. Якщо пальовий фундамент потрібний незалежно від енергетичного рішення, можна оцінювати додаткові витрати на інтеграцію контурів. Якщо палі запроваджуються лише заради теплообміну, до порівняння має входити повна вартість такого рішення. Це розмежування дозволяє коректно визначити економічний результат суміщення функцій і не приховувати витрати на несучу конструкцію в іншому розділі проєкту.

Вихідна модель повинна включати геометрію фундаменту, властивості ґрунтових шарів, рівень підземних вод і графіки теплового навантаження. Для кожного параметра доцільно зазначити спосіб отримання та межі достовірності. У разі недостатніх даних слід порівнювати кілька сценаріїв, а не використовувати одне значення як універсальну характеристику майданчика. Окремо перевіряється взаємний вплив сусідніх елементів: потужність групи не можна без додаткового аналізу визначати простим множенням результату одиночної палі на їхню кількість. Тепловий стан ґрунту є спільним обмеженням усієї системи.

Річний режим пропонується описувати через часові ряди відбору й повернення теплоти. У моделі необхідно відобразити зимове опалення, літнє охолодження та періоди простою. За переважання одного напрямку теплообміну слід перевіряти зміну температури масиву протягом кількох років. Відновлення температури в міжсезоння не можна вважати гарантованим без відповідного розрахунку. Якщо сезонний баланс не забезпечується, доцільно розглядати обмеження відбору, допоміжне джерело або інший спосіб повернення теплоти, порівнюючи повну енергетичну й економічну картину альтернатив.

Термомеханічну перевірку необхідно пов’язувати зі схемою закріплення палі та роботою ростверку. Температурні деформації можуть частково стримуватися ґрунтом і надземною конструкцією, тому розрахунок має враховувати сумісність переміщень. Доцільно порівнювати крайні режими нагрівання й охолодження з базовим станом, а також послідовність циклів. Контрольованими величинами є додаткові зусилля, переміщення та їхній вплив на роботу будівлі. Визначення допустимого енергетичного режиму повинно спиратися на ці результати, а не лише на бажану теплову потужність установки.

Конструктивне опрацювання має передбачати розміщення труб без порушення захисних шарів, армування та можливості якісного бетонування. Перед прихованням контури випробовуються, а їхній фактичний стан документується. Колекторний вузол доцільно організувати так, щоб окремі гілки можна було перевіряти й відключати без припинення роботи всього поля. Потрібно також визначити

наслідки пошкодження контуру, який після бетонування недоступний для звичайного ремонту. Надійність такої системи залежить від можливості локалізувати відмову та зберегти працездатність решти елементів.

Під час експлуатаційної перевірки слід вимірювати витрату теплоносія, температури подачі й повернення та електроспоживання теплового насоса разом з допоміжним обладнанням. Баланс ґрунтового контуру й теплота на стороні споживача належать до різних меж обліку. Їхнє зіставлення дозволяє простежити внесок компресора, але потребує синхронних даних. Сезонний показник слід обчислювати за накопиченими енергіями, а не усередненням окремих миттєвих значень коефіцієнта перетворення. Журнал режимів допоможе пояснити відхилення, пов'язані з пуском, частковим навантаженням або зміною температури системи опалення.

Рішення щодо застосування пропонується приймати після спільного розгляду конструктивної безпеки, сезонної теплової стійкості та витрат життєвого циклу. У порівнянні мають бути звичайний фундамент із традиційним джерелом теплоти, фундамент з окремим ґрунтовим теплообмінником і інтегрований варіант. Для кожного з них слід зберігати однакову теплову послугу та розрахунковий період. Перевага термоактивного фундаменту полягає в можливості суміщення функцій, однак її практична цінність визначається умовами майданчика й будівлі. Універсальна питома потужність на метр палі не замінює проєктного обґрунтування.

Висновки

Використання ґрунтової теплоти у фундаментних конструкціях доцільно розглядати як суміщення двох розрахункових функцій. Запропонована послідовність пов'язує потребу будівлі в енергії з температурним станом ґрунту та механічною роботою фундаменту. Перевага інтегрованого рішення має підтверджуватися порівнянням альтернатив і довгостроковим балансом. Енергетична продуктивність не може бути підставою для послаблення вимог до несучої здатності й допустимих переміщень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Brandl H. Energy foundations and other thermo-active ground structures. Géotechnique. 2006. Vol. 56, no. 2. P. 81–122. DOI: 10.1680/geot.2006.56.2.81

2. Laloui L., Nuth M., Vulliet L. Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2006. Vol. 30, no. 8. P. 763–781. DOI: 10.1002/nag.499

3. Bourne-Webb P. J. et al. Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles. Géotechnique. 2009. Vol. 59, no. 3. P. 237–248. DOI: 10.1680/geot.2009.59.3.237

Любич Володимир Володимирович — аспірант, асистент кафедри промислового та цивільного будівництва, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: mr.lyubich1988@gmail.com.

Барбалюк Максим Сергійович – студент гр. 2Б-24б, факультет будівництва цивільної та екологічної інженерії, Вінницький технічний університет. Email: destroyer.maksimka@gmail.com

Liubych Volodymyr Volodymyrovych — PhD student, Assistant at the Department of Industrial and Civil Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mr.lyubich1988@gmail.com.

Barbaliuk Maksym Serhiyovych – student group 2B-24b, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: destroyer.maksimka@gmail.com