

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"**

**ПРОЦЕНКО Павло Олександрович**



УДК624.131.537:622.271.33

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ВЗАЄМОДІЇ ВИСЯЧОЇ ПАЛІ, ЩО МІС-  
ТИТЬ КОЛЕКТОР ТЕПЛООВОГО НАСОСУ З ГРУНТОВОЮ  
ОСНОВОЮ**

**Спеціальність 05.15.09 – “Геотехнічна і гірничча механіка”**

**Автореферат дисертації  
на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

**Дніпро – 2021**

**Дисертація є рукописом.**

Робота виконана на кафедрі «Опір матеріалів та будівельна механіка» Національного університету «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, доцент  
**МОРКЛЯНИК Богдан Васильович,**  
професор кафедри «Опір матеріалів та будівельна механіка»  
Національного університету  
«Львівська політехніка»  
Міністерства освіти і науки України.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**ПЕТРЕНКО Володимир Дмитрович,**  
професор кафедри «Транспортна інфраструктура»  
Дніпровського національного університету залізничного  
транспорту імені академіка В. Лазаряна  
Міністерства освіти і науки України;

кандидат технічних наук  
**КРИСАН Володимир Іванович,**  
директор ТОВ «Геопротект» (м. Дніпро).

Захист дисертації відбудеться “13” травня 2021 р. о 12<sup>00</sup> годині в аудиторії 1/102 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.04 при Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України (49005, м. Дніпро, просп. Дмитра Яворницького, 19, т. 47-24-11).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України (49005, м. Дніпро, просп. Дмитра Яворницького, 19).

Автореферат розіслано “9” квітня 2021 р.

Учений секретар  
спеціалізованої  
вченої ради



О.В. Солодянкін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Теплові насоси мають широке застосування у наш час, що зумовлено використанням «зайвого» низькопотенційного тепла із відновлюваних джерел, таких як повітря, вода, земля та відходи життєдіяльності людини. Вони використовуються для житлових та нежитлових приміщень, а також для підігріву або охолодження промислових процесів, що дозволяє зменшити викиди вуглекислого газу до 8% і дає можливість забезпечити виконання Україною умов Кіотського протоколу.

Практика використання теплових насосів свідчить, що для них не існує обмеження потужності. Джерела тепла для теплового насосу, таких як навколишнє повітря, земля, водойми є завжди доступними та відновлювальними. Викиди вуглекислого газу побічно викликає тільки рушійна сила теплового насосу.

Тепловий насос споживає електричну енергію значно ефективніше, ніж будь-які котли, які спалюють паливо. Коефіцієнт ефективності теплових насосів (коефіцієнт перетворення тепла) значно більший від одиниці. Його значення перебуває у діапазоні від 2,5 до 4,5 одиниць.

У випадку використання геотермальної енергії обов'язковим є обстеження земельної ділянки для визначення типу ґрунту, його теплоємності, геологічних особливостей та можливості розташування ґрунтових зондів чи колекторів.

У світовій практиці будівництва поширеним є отримання низькопотенційного тепла ґрунту із приповерхневої зони шляхом використання горизонтальних колекторів та із глибини ґрунтових шарів, використовуючи вертикальні колектори теплових насосів. Ефективним способом є застосування суміщених фундаментів (у випадку розташування колектора теплового насосу у тілі фундаменту), особливо це актуально при використанні глибинних колекторів. Палі, які при цьому встановлюються, називають енергетичними.

В окремих випадках, при роботі теплового насосу, є можливим заморожування основи, що може призвести до зміни фізико-механічних властивостей ґрунтів, а також температурних деформацій та напружень у фундаментах.

Тому дослідження роботи теплового насосу і встановлення закономірностей взаємодії енергетичних паль з ґрунтовою основою є актуальним науково-технічним завданням для забезпечення надійності експлуатації будівель та споруд.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконувалася в межах наукових програм, а саме: «Енергоощадні технології у будівництві» (№ держреєстрації 0114U005248), «Розробка та вдосконалення методів розрахунку конструкцій, мостів, будівель та споруд» (№ держреєстрації 0114U005249) кафедри «Опір матеріалів та будівельна механіка» Національного університету «Львівська політехніка».

**Мета роботи** – визначення закономірностей взаємодії висячої палі, що містить колектор теплового насосу з ґрунтовою основою при знакозмінних температурних режимах у ґрунті внаслідок роботи теплового насосу.

**Основна ідея роботи** полягає у врахуванні при визначенні несучої здатності енергетичних паль по ґрунту нелінійності діаграми «руйнівне дотичне

напруження – вертикальний тиск на ґрунт» та обумовлених температурним впливом на ґрунт змін його міцнісних властивостей.

**Об'єктом досліджень** є теплофізичні та механічні процеси, що відбуваються у системі «ґрунтова основа - фундамент з висячих паль, у який вмонтовано колектор теплового насосу» внаслідок циклічного заморожування - відтаювання.

**Предметом досліджень** є закономірності зміни несучої здатності фундаменту з висячих паль, у який вмонтовано колектор теплового насосу, від кількості циклів заморожування - відтаювання ґрунту основи.

Відповідно до поставленої мети, сформульовані для вирішення такі **задачі досліджень**:

- виконати аналіз сучасного стану питань застосування ґрунтових теплових насосів і їх методів розрахунку;
- експериментальним шляхом дослідити вплив знакозмінного температурного режиму на фізико-механічні властивості ґрунтів;
- провести експериментальні дослідження впливу кількості циклів заморожування - відтаювання основи на несучу здатність висячих паль, у які вмонтовано колектор теплового насосу;
- дослідити вплив змінного температурного поля у системі «ґрунтова основа - фундамент з висячих паль, у який вмонтовано колектор теплового насосу»;
- розробити методику визначення несучої здатності висячої палі, у яку вмонтовано колектор теплового насосу з врахуванням кількості циклів заморожування - відтаювання основи.

**Методи дослідження.** Методичну основу досліджень складає комплексний підхід, що включає в себе аналіз і узагальнення літературних даних за темою роботи, аналітичні та експериментальні дослідження, виконані з метою обґрунтування зміни несучої здатності фундаменту з висячих паль, у який вмонтовано колектор теплового насосу, від кількості циклів заморожування – відтаювання ґрунту основи.

**Основні наукові положення, що захищаються в роботі:**

1. Міцність ґрунту основи знижується від кількості циклів заморожування – відтаювання, що обумовлено фазовими переходами порової рідини, внаслідок знакозмінного температурного впливу.
2. Несуча здатність паль, у які вмонтовано колектор теплового насосу, знижується при збільшенні кількості циклів заморожування - відтаювання, що обумовлено взаємодією з прилеглим до них ґрунтом, міцність якого від вертикального тиску може бути описана поліномом другого ступеню.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Вперше отримано аналітичний розв'язок задачі щодо температурного розподілу тепла в основі палі, у яку вмонтовано колектор теплового насосу.
2. Вперше встановлено залежності для визначення критичного часу промерзання палі та ґрунтової основи з урахуванням зниження несучої здатності ґрунту, внаслідок циклічного заморожування – відтаювання, температури теплоносія у колекторі теплового насосу, геометричних параметрів пальового поля та теплофізичних властивостей ґрунту і матеріалу палі.

3. Запропоновано новий алгоритм проведення натурних випробувань енергетичних паль при циклічному замерзанні – відтаюванні основи внаслідок роботи теплового насосу.

4. Вперше отримано залежності несучої здатності паль, у які вмонтовано колектор теплового насосу, від кількості циклів замерзання – відтаювання. Показано, що міцність суглинистого ґрунту від вертикального тиску, може бути описана поліномом другого ступеню.

**Наукове значення роботи** полягає у встановленні закономірностей зміни несучої здатності енергетичних паль по ґрунту від кількості циклів заморожування – відтаювання ґрунту і вдосконаленні на цій основі методики визначення несучої здатності енергетичних паль.

**Практичне значення роботи** полягає у створенні необхідної методики визначення несучої здатності висячих паль, у які вмонтовано колектор теплового насосу, при знакозмінному температурному впливі з врахуванням коефіцієнтів зниження несучої здатності ґрунту, обумовлених циклічним заморожуванням – відтаюванням.

**Обґрунтованість і достовірність** наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується відповідністю розроблених розрахункових залежностей діючим державним будівельним нормам щодо проектування основ та фундаментів, механіки ґрунтів, проведеними експериментальними дослідженнями, а також високим коефіцієнтом кореляції даних при апроксимації отриманих експериментальних величин. Відносна похибка між натурною та розрахунковою несучою здатністю палі не перевищує 10%

**Впровадження результатів роботи.** Результати досліджень використано при виконанні програм розвитку альтернативної енергетики й енергозбереження у Львівській області (ТзОВ «ЛЬВІВКОМПЛЕКСБУД», ТзОВ «ЗАВОД ЕЛЕКТРОНПОБУТПРИЛАД»).

**Особистий внесок здобувача.** Автор самостійно сформулював мету, ідею, завдання досліджень, розробив програму досліджень, проаналізував результати експериментальних і теоретичних досліджень, запропонував розрахункові залежності для визначення несучої здатності ґрунтів основи фундаменту з висячих паль при їх циклічному замерзанні-розмерзанні, а також рекомендації з проектування фундаментів глибокого закладання з колекторами теплових насосів для різних видів ґрунтів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи викладено в доповідях і обговорено на: 5-th International Conference of Young Scientists GAC- 2013 (Lviv, 2013); Міжнародній студентській науково-технічній конференції «Совершенствование технологи строительства шахт и подземных сооружений» (Донецьк, 2015); 9-й всеукраїнській науково-технічній конференції «Механіка ґрунтів, геотехніка та фундаментобудування» (Дніпропетровськ, 2016); XII INTERNATIONAL RESEARCH AND PRACTICE CONFERENCE Westwood, (Canada, 2016); Міжнародній конференції «Український гірничий форум – 2020» (Дніпро, 2020).

**Публікації.** За результатами виконаних досліджень опубліковано 11 наукових праць, з яких 6 статей у спеціалізованих фахових виданнях (з них 2 - у

наукових періодичних виданнях іншої держави, які включено до міжнародних наукометричних баз), 5 тез та доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 126 найменувань на 9 сторінках і 3 додатків на 6 сторінках. Містить 130 сторінок машинописного тексту, 47 рисунків і 21 таблицю. Загальний обсяг дисертації становить 168 сторінок.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі досліджень, сформульовані наукові положення, які виносяться на захист, висвітлено наукове і практичне значення отриманих результатів досліджень, показано особистий внесок автора та наведена інформація стосовно апробації та публікацій результатів досліджень.

**У першому розділі** наведено аналіз літературних джерел, присвячених проблемі досліджень та розглянуті питання актуальності поставлених задач, сучасного стану розробок у сфері застосування ґрунтових теплових насосів у світі та Україні.

Аналіз матеріалів наукових праць таких дослідників, як Н. Brandl, О. Johansen, R. Katzenbach, В. Sanner, В. Usowicz, Ху Вей дозволив зробити такі висновки:

1. З'явилася вискоелективна технологія опалення, кондиціонування приміщень і підігріву води з використанням ґрунтових теплових насосів.

2. Ця технологія має два основних недоліки – досить велику вартість та трудомісткість робіт щодо влаштування та розміщення у ґрунті колекторів теплових насосів.

3. Одним із варіантів усунення цих недоліків є суміщення колекторів теплових насосів із підземними конструкціями будинків та споруд (зокрема, палевими фундаментами). Такі конструкції прийнято називати суміщеними палевими фундаментами, енергетичними палевими фундаментами чи енергетичними палями.

Серед питань, що потребують вирішення, важливим є визначення додаткового температурного впливу енергетичних паль на прилеглий до них ґрунт. Крім того у роботах М.Н. Гольдштейна, Н.А. Цитовича, С.С. Вялова, В.В. Лушнікова, А.Л. Невзорова, С.В. Нерпіна, В.А. Корольова, Б.В. Моркляника та В.Г. Шаповала встановлено, що при замерзанні - відтаванні ґрунту відбувається зниження їх міцності і модуля загальної деформації. Це призводить до зниження несучої здатності паль по ґрунту та підвищення їх деформативності.

У цьому сенсі дуже показовими є виконані Б.В. Моркляником лоткові випробування паль при циклічному заморожуванні - відтаюванні ґрунту. Було встановлено, що має місце чітка тенденція зниження несучої здатності моделей енергетичних паль при зростанні кількості циклів заморожування – відтаювання основи. Однак, цих даних недостатньо для кількісної оцінки впливу циклічного заморожування – відтаювання ґрунту на несучу здатність

паль, оскільки моделі паль мали розміри 250x25 мм (тобто не було враховано масштабний фактор), а заморожування основи здійснювалося ззовні до паль (насправді джерелом заморожування є енергетичні палі і температура розповсюджується з боку паль).

Тому було зроблено висновок про те, що для верифікації отриманих Б.В.Моркляником даних доцільно виконати випробування паль у натурних умовах, до того ж температурний вплив на основу слід враховувати з боку паль.

Подальший аналіз Українських державних норм та робіт таких дослідників, як П.А. Аббасов, А.О. Бартоломей, Б.В. Бахолдін, В.Г. Березанцев, І.П. Бойко, Ю.Л. Винников, М.М. Герсеванов, В.М. Голубков, М.Н. Гольдштейн, Б.В. Гончаров, Б.І. Далматов, А.І. Догадайло, Н.М. Дорошкевич, М.Ф. Друкований, М.П. Дубровський, М.Л. Зоценко, В.О. Іллічов, С.М. Клепиков, М.В. Корнієнко, В. І. Крисан, В.І. Крутов, Ф.К. Лапшин, І.Я. Лучковський, М.О. Метс, Г.Ф. Новожилов, О.В. Новський, О.О. Петраков, В.Д. Петренко, Г.М. Петренко, О.В. Савінов, Є.О. Сорочан, С.М. Сотников, Ю.Ф. Тугаєнко, В.М. Уліцький, В.Г. Федоровський, М.О. Цитович, Д.М. Шапіро, В.Г. Шаповал, В.Б. Швець, О. Н. Шашенко, Н. Brandl, J. Burland, R. Chelis, R. Frank, R. Katzenbach, I. Kerisel, A. Kezdi, H. Kishidar, G. Meyergof, R. Peck, M. Randolph, L. Rees, H. Seed, P. SecoePinto, D. Tejlor, K. Terzaghi та інших дослідників не дав відповідей на такі питання:

1. Яким чином слід враховувати зниження несучої здатності паль при циклічному заморожуванні – відтаюванні прилеглого до них ґрунту за даними їх натурних випробувань?

2. Як слід враховувати зниження несучої здатності паль при циклічному заморожуванні – відтаюванні прилеглого до них ґрунту за даними розрахунку?

Тому при виконанні дисертаційної роботи також було метою розробити способи визначення несучої здатності енергетичних паль за даними натурних випробувань та за розрахунком.

Із літературних джерел (дані М.Н. Гольдштейна, С. С. Вялова, Ю.К.Зарецького, О. М. Шашенка) також відомо, що залежність руйнівного зусилля від нормального тиску у глинистому ґрунті (тобто огинаюча Кулона – Мора) на відміну від прийнятого в українських державних нормах лінійного критерію міцності Кулона має вигляд нелінійної функції.

Було зроблено висновок про те, що при визначенні несучої здатності паль слід окрім перерахованих вище факторів також враховувати фізичну нелінійність міцнісних властивостей ґрунту від нормального тиску на ґрунт.

Нарешті, у літературних джерелах наведено дані щодо зміни міцнісних та деформаційних властивостей ґрунту при його циклічному заморожуванні – відтаюванні. При цьому невідомо, яким чином впливає на властивості ґрунту циклічна зміна його температури в діапазоні позитивних значень від 1 до 20 градусів за Цельсієм.

У цьому випадку також важливо розуміти, який час потрібен для охолодження основи, що прилягає до палі, від деякої позитивної температури до температури замерзання порової рідини (тобто початку замерзання основи).

У цілому, в ході аналізу наукових літературних джерел було визначено такі шляхи досягнення поставленої при написанні дисертаційної роботи мети:

1. Встановлення залежностей та розробка методики визначення несучої здатності паль, у які вмонтовано колектори теплових насосів, за даними натурних випробувань.

2. Встановлення залежностей та розробка методики визначення несучої здатності паль, у які вмонтовано колектори теплових насосів, за даними розрахунку. Для розв'язання цієї частини завдання необхідно знайти відповіді на такі питання:

- за який час з початку охолодження енергетичної палі температура прилеглого до неї ґрунту стане від'ємною?

- чи змінюються міцнісні та деформаційні властивості ґрунту при циклічній зміні його температури в діапазоні позитивних значень від 1 до 20 градусів за Цельсієм?

- яким чином слід враховувати фізичну нелінійність міцнісних властивостей ґрунту від нормального тиску при розрахунку несучої здатності енергетичних паль?

- яким чином слід враховувати фізичну нелінійність міцнісних властивостей ґрунту від нормального тиску на ґрунт при циклічному заморожуванні – відтаюванні основи (ці дані необхідні для визначення несучої здатності енергетичних паль)?

Відповіді на ці питання наведено нижче.

У другому розділі наведено матеріали таких досліджень:

- визначення нелінійних міцнісних властивостей суглинистого ґрунту;
- визначення впливу циклічного нагріву-охолодження на міцнісні та деформативні властивості ґрунту при зміні температури у діапазоні 0-20 °С;
- визначення впливу циклічного заморожування-відтаювання на міцнісні та деформативні властивості суглинистого водо – та неводонасиченого ґрунту.

У ході визначення нелінійних властивостей було розглянуто три критерії міцності: Кулона – Мора (1), О. Шашенка (2) та поліноміальний (3):

$$\tau_k = \sigma \cdot \operatorname{tg}(\varphi_k) + c_k, \quad (1)$$

$$\tau_{ш} = \sqrt{\sigma \cdot \operatorname{tg}(\varphi_{ш}) \cdot c_{ш} + c_{ш}^2}, \quad (2)$$

$$\tau_n = a_0 + a_1 \cdot \sigma + a_2 \cdot \sigma^2, \quad (3)$$

де  $\tau_k, \tau_{ш}$  та  $\tau_n$  - руйнівне дотичне напруження, розраховане відповідно у рамках критеріїв міцності Кулона-Мора, О. Шашенка та поліноміального;  $\varphi_k$  і  $\varphi_{ш}$  - кут внутрішнього тертя, розрахований відповідно у рамках критеріїв міцності Кулона-Мора та О. Шашенка;  $c_k$  та  $c_{ш}$  - те ж саме, питоме зчеплення;  $a_0, a_1$  та  $a_2$  - матеріальні константи поліноміального критерію міцності;  $\sigma$  - вертикальне навантаження на ґрунтовий зразок.

Ці критерії було застосовано для визначення міцності суглинистого ґрунту, властивості якого наведено у табл. 1.



Таблиця 1

## Фізичні властивості зразків суглинистого ґрунту

Назва характеристики	Значення характеристики				
	5	6	7	9	13
Лабораторний номер	5	6	7	9	13
Виробкатаїї номер	20	20	20	20	20
Глибинавідбору проби, м	10,60	12,0	16,0	18,0	27,0
Вологість на гр.текуч., ч.од.	0,22	0,21	0,21	0,21	0,20
Вологість на гр.розкоч., ч.од.	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13
Число пластичності, ч.од.	0,08	0,07	0,07	0,08	0,07
Вологість природна, ч.од.	0,07	0,07	0,07	0,06	0,12
Вологість водонасичення, ч.од.	0,23	0,27	0,25	0,18	0,23
Показник текучості, ч.од.	-0,88	-1	-1,33	-0,50	-0,14
Щільність часток ґрунту, г/см <sup>3</sup>	2,68	2,67	2,67	2,68	2,67
Щільність ґрунту, г/см <sup>3</sup>	1,75	1,62	1,67	1,92	1,81
Щільність сухого ґрунту, г/см <sup>3</sup>	1,64	1,51	1,56	1,76	1,62
Пористість, ч.од.	0,39	0,43	0,42	0,34	0,39
Коеф. порист. прир. складн., ч.од.	0,64	0,76	0,71	0,52	0,65
Ступінь вологості, ч.од.	0,39	0,24	0,26	0,46	0,49
	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99
Нестача водонасиченості, ч.од.	0,16	0,20	0,18	0,09	0,11
	-0,00	-0,00	-0,00	-0,01	-0,01

Примітка: у двох останніх рядках даної таблиці в чисельнику наведено дані, які відповідають природньому, а в знаменнику – заданному стану ґрунту.

У ході співставлення міцності ґрунту, розрахованої за формулами (1), (2) та (3) з даними експерименту співставлялись значення відносного середнього квадратичного відхилення теоретичних кривих від експериментальних даних (табл. 2).

Таблиця 2

## Розбіжності між розрахованими та експериментальними даними

№ зп	Назва критерію міцності	Средньоквадратичне відхилення $\varepsilon$ , % при стані ґрунту	
		Природний	Заданий (повністю водонасичений)
1	Кулона-Мора	9,4	7,6
2	О. Шашенка	16,8	24,1
3	Поліноміальний	8,4	6,8

Було зроблено висновок про те, що у даному конкретному випадку найбільш приданими для визначення несучої властивості паль є критерій міцності Кулона – Мора та поліноміальний.

Далі було встановлено, що при циклічній зміні температури ґрунту в діапазоні позитивних значень від 1 до 20 градусів за Цельсієм їх міцність практично не змінюється. Цей факт має важливе значення для проектування фундаментів з паль, у яких розташовано колектори теплових насосів, оскільки якщо температура основи весь час є позитивною, проектування та визначення несучої здатності може здійснюватися згідно з діючими на території України будівельними нормами.

У ході визначення впливу циклічного заморожування-відтаювання на міцнісні властивості суглинистого водо – та неводонасиченого ґрунту розглядалися відношення  $k_i$  міцності ґрунту після впливу на нього проектної кількості циклів заморожування – відтаювання  $\tau_{n,i}$  до міцності у первісному стані (тобто без впливу заморожування – відтаювання)  $\tau_{0,i}$ :

$$k_i = \frac{\tau_{n,i}}{\tau_{0,i}}. \quad (4)$$

Виявилось, що має місце чітка тенденція зменшення міцності ґрунту від кількості циклів заморожування – відтаювання, причому для повністю водонасиченого ґрунту є наявним більш різке зниження міцності (майже у 2 рази; рис. 1 та 2).

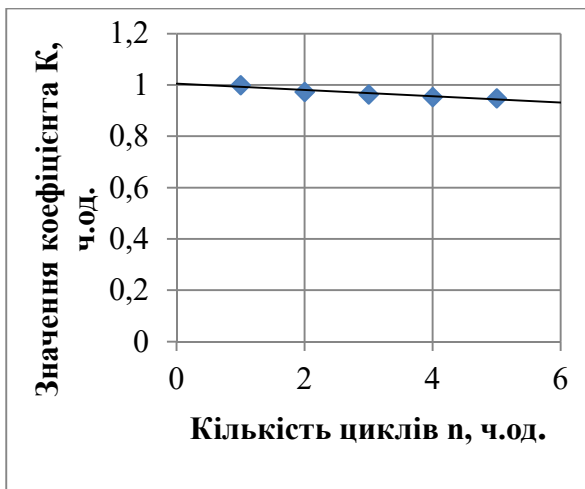


Рис. 1. Залежність коефіцієнту K від кількості циклів заморожування – відтаювання (ґрунт у природному стані;  $K = -0.0122n + 1.0048$ )

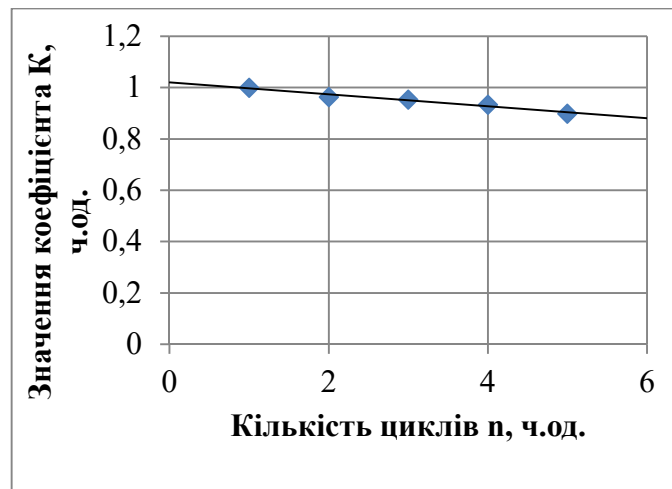


Рис. 2. Залежність коефіцієнту K від кількості циклів заморожування – відтаювання (повністю водонасичений ґрунт;  $K = -0.0232n + 1.0201$ )

Було зроблено такі висновки:

1. Якщо температура основи змінюється у діапазоні позитивних значень, міцнісні властивості ґрунту не змінюються. Тому у даному випадку несучу здатність паль доцільно визначати за діючими на території України будівельними нормами.

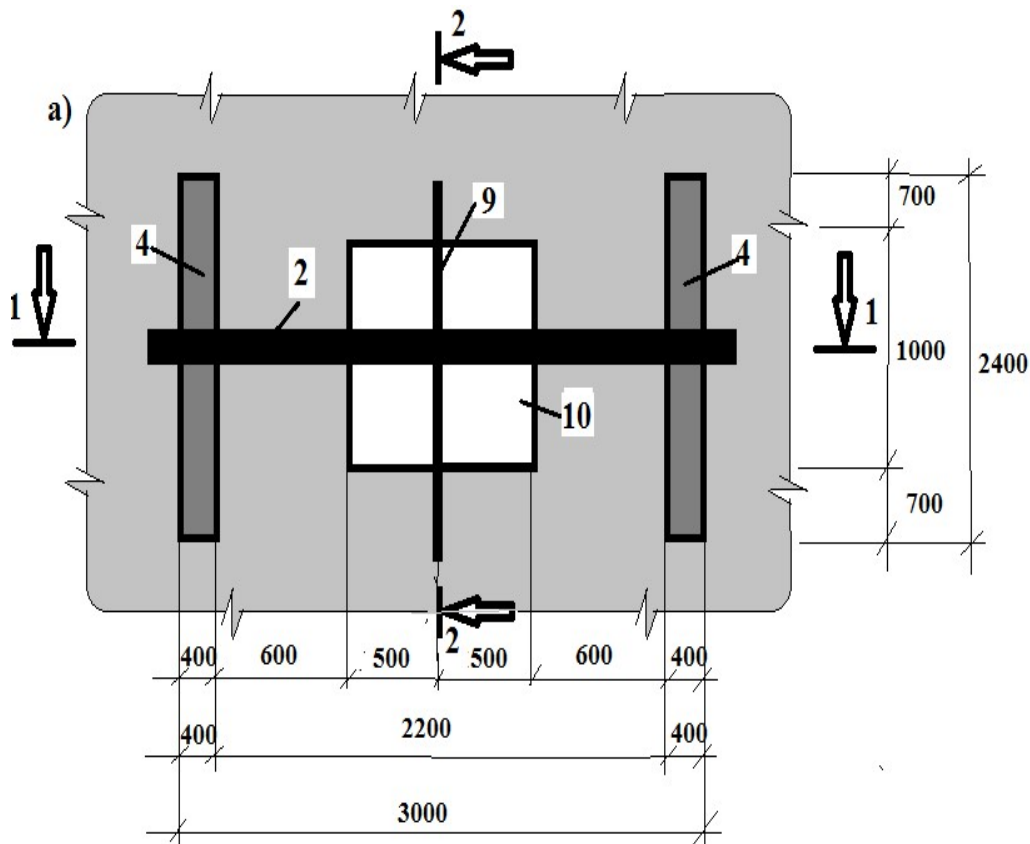
2. Якщо має місце циклічне замерзання – відтаювання прилеглого до палі ґрунту, його міцнісні властивості можуть суттєво змінюватися. Тому у даному випадку для визначення несучої здатності паль доцільно коригувати діючі на території України будівельні норми.

У третьому розділі наведено матеріали таких досліджень:

- аналіз сучасних методів визначення несучої здатності паль по ґрунту;
- матеріали щодо розробки устаткування та методики випробування паль при циклічному заморожуванні – відтаюванні основи;
- результати визначення несучої здатності паль та їх аналіз.

У ході аналізу сучасних методів визначення несучої здатності паль по ґрунту було порівняно динамічний спосіб визначення несучої здатності та спосіб визначення несучої здатності статичними навантаженнями. Зроблено висновок про те, що для досягнення поставленої при написанні дисертації мети найбільш придатним є статичний метод визначення несучої здатності паль.

Для проведення випробувань паль при циклічному замерзанні-відтаюванні ґрунту було використано устаткування, схему якого наведено на рис. 3.



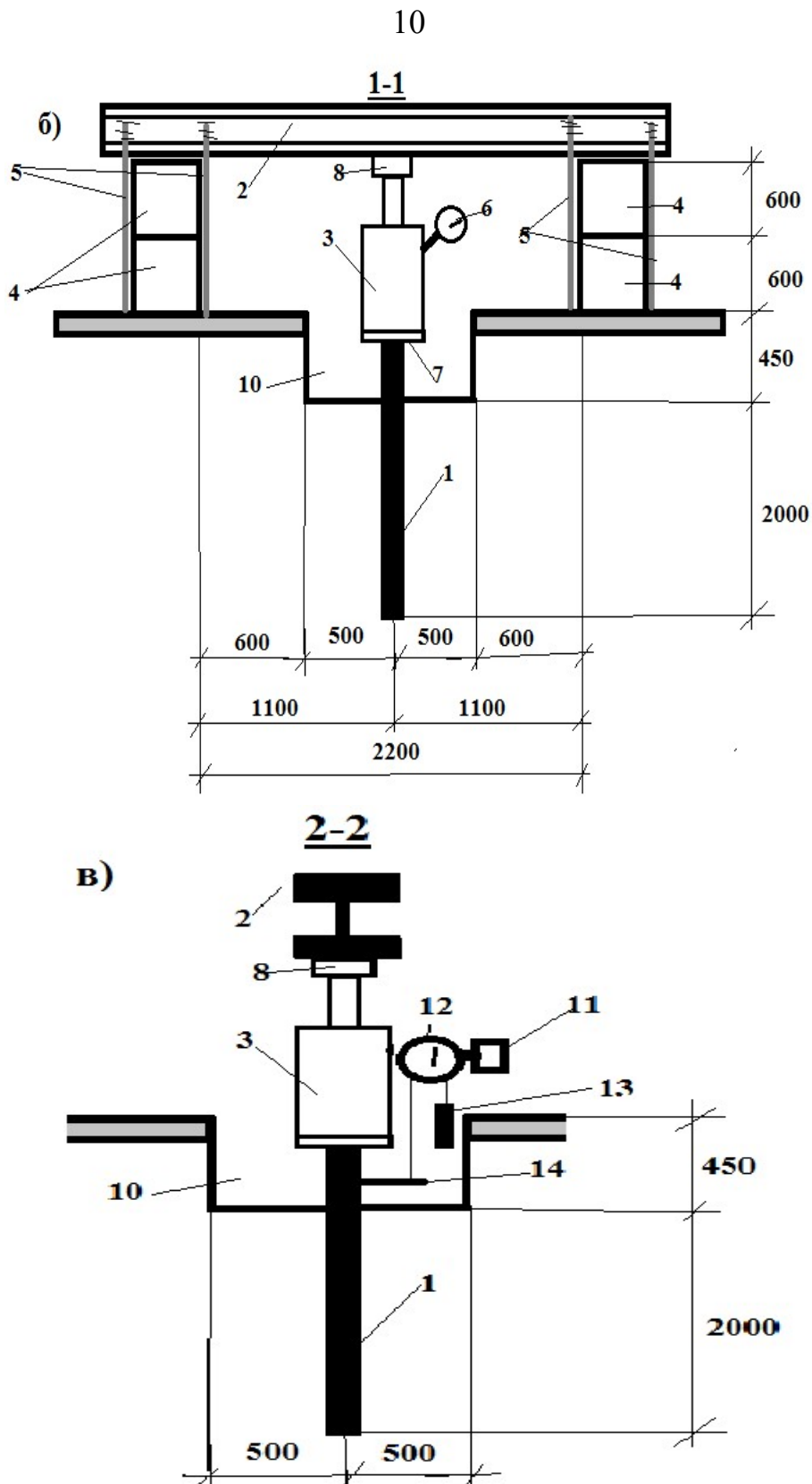


Рис. 3. Схема устаткування, з використанням якого виконувалось випробування палі: а - план; б - розріз по 1-1; в - розріз по 2-2. 1-палля; 2 - упорна балка - двотавр №16 Б1; 3 - гідравлічний домкрат; 4 - вантажі (блоки ФСБ 400х600х2400); 5 - обв'язка для кріплення упорної балки; 6-манометр; 7 та 8 - металеві прокладки; 9 - реперна система; 10 - шурф; 11 - балка реперної системи; 12 - прогиномір БПАО; 13 - контрвантаж; 14 - кронштейн для кріплення струни

Методика випробування палі полягала у наступному:

1. З палі знімався домкрат (позиція 3 на рис. 3) та пластини (позиції 6 та 7 на рис. 3).

2. У внутрішній отвір палі на інтервалі глибин 0...2 метри насипався сухий лід.

3. Для забезпечення теплоізоляції з боку оточуючого середовища у квадратну трубу зверху розміщувався корок із газопроникного пористого матеріалу (зібганої шерстяної тканини).

4. Далі, після повної сублімації льоду, процес охолодження повторювався ще два рази.

5. Ступінь сублімації оцінювався шляхом занурення в порожнину палі металевго щупа.

6. Ступінь промерзання основи контролювався металевим щупом на відстані, що дорівнювала 50 та 100 мм від стінки труби на глибинах 0,5 м та 1,5 м.

7. Далі, після досягнення проектного промерзання основи, відбувалося її повне розмерзання. Зазвичай, для повного завершення розмерзання було достатньо три доби.

8. Ступінь відтаювання основи контролювався металевим щупом на відстані, що дорівнювала 50 та 100 мм від стінки труби на глибинах 0,5 м та 1,5 м.

9. Після проведення проектної кількості циклів заморожування – відтаювання відбувався монтаж домкрата (позиція 3 на рис. 3) та пластини (позиції 6 та 7 на рис. 3).

10. Далі виконувалось налаштування реперної системи (позиція 9 на рис. 3) і починались випробування палі.

11. Випробування палі виконувалось у такій послідовності:

11.1. Навантаження до голови палі прикладалися ступенями по 500 кг.

11.2. За умову стабілізації було прийнято осідання, що дорівнювало 0,1 мм за 60 хвилин (оскільки консистенція ґрунту є тугопластичною).

12. За результатами випробувань було визначено несучу здатність палі.

Отримані таким чином залежності несучої здатності палі від кількості циклів заморожування – відтаювання наведено на рис. 4 та у таблиці 3.

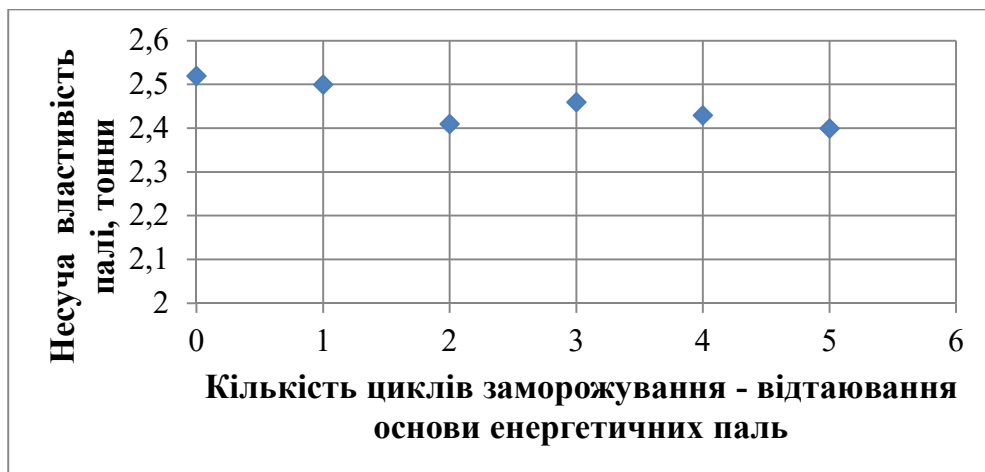


Рис. 4. Залежність несучої здатності палі від кількості циклів заморожування – відтаювання.

Несуча здатність палі в залежності від кількості циклів заморожування - відтаювання

Кількість циклів заморожування-відтаювання, одиниць	0	1	2	3	4	5
Несуча здатність палі, тони	2,52	2,5	2,41	2,46	2,43	2,4

У цілому було зроблено висновок про те, що циклічне замерзання – відтаювання основи енергетичних палей призводить до суттєвого зниження їх несучої здатності.

У четвертому розділі наведено матеріали таких досліджень:

- теоретичні дослідження температурних полів в основі фундаментів із енергетичних палей;
- методики розрахунку несучої здатності енергетичних палей;
- перевірка результатів досліджень на адекватність експерименту;
- результати впровадження матеріалів досліджень в інженерну практику будівництва.

У ході теоретичних досліджень температурних полів в основі фундаментів із енергетичних палей було використано наведену на рис. 5 розрахункову схему.

Було розглянуто питання про розподіл температури в умовах плоскої задачі в циліндричній системі координат при осьовій симетрії. Також приймалося, що колектор з теплоносієм розміщено по спіралі близько до зовнішньої поверхні палі, причому труби з охолодженим та підігрітим теплоносієм чергуються.

У цьому випадку температура на контакті палі з ґрунтом (див. схему на рис. 5, в) може бути визначена за формулою:

$$T_w(t) = 0,5 \cdot [T_{ex}(t) + T_{eux}(t)], \quad (5)$$

де  $T_w(t)$  - температура в точці контакту палі із ґрунтом;  $T_{ex}(t)$  - температура теплоносія на вході в колектор енергетичної палі;  $T_{eux}(t)$  - те ж, на виході із колектора енергетичної палі.

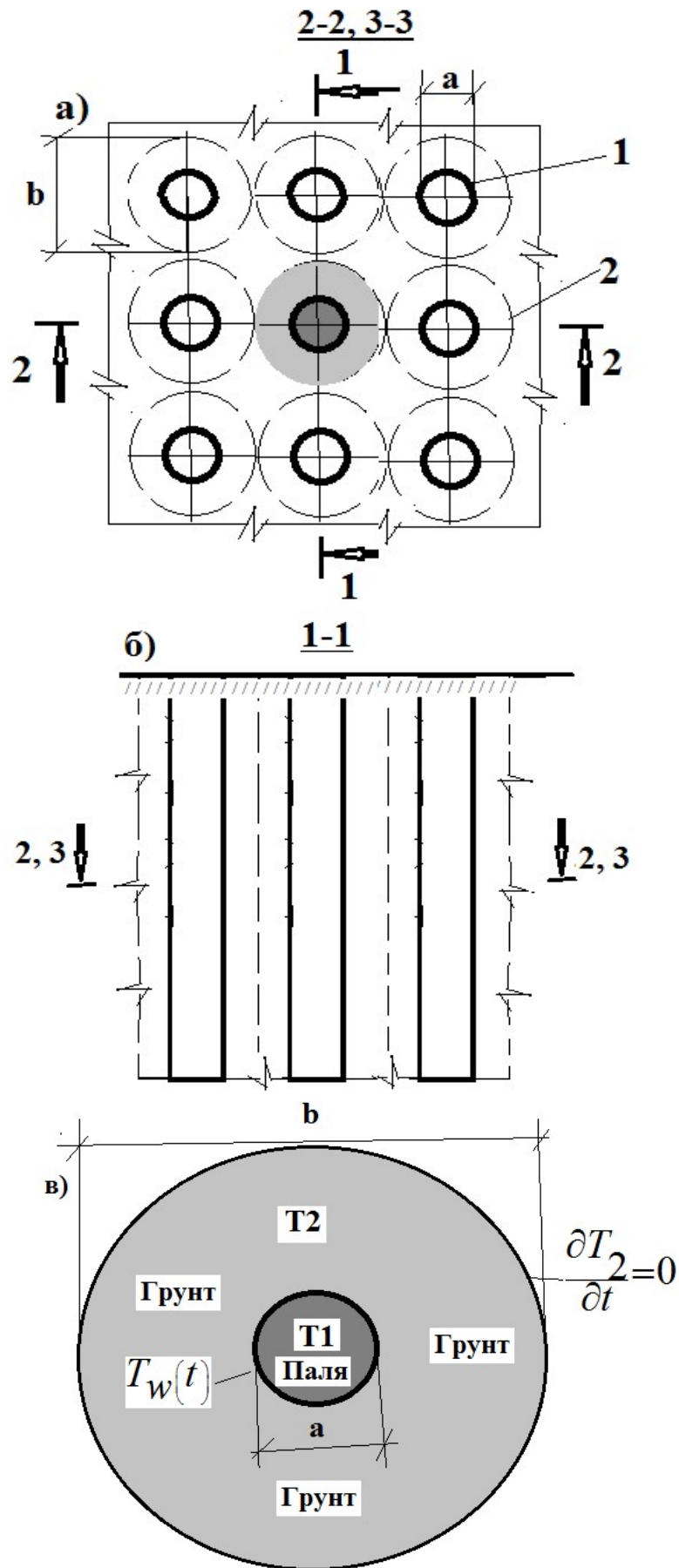


Рис. 5. Схеми до розрахунку температурного поля у прилеглому до палі ґрунту: а та б – фрагмент креслень палевого фундаменту; в – розрахункова схема, прийнята при розрахунку температури.

Отримані на цьому етапі досліджень результати дозволяють, зокрема, визначити критичний час  $t_{крит}$ , при якому починається промерзання основи. Протягом цього часу можлива від'ємна температура теплоносія в колекторі теплового насосу.

$$t_{крит} = -\frac{1}{k_1 \cdot \mu_1^2} \cdot \ln\left(\frac{T_w}{T_w - T_0}\right). \quad (6)$$

Тут  $T_w$  - середня температура теплоносія;  $T_0$  - те ж саме, основи;  $\mu_1$  - перший (тобто найменший за модулем) корінь рівняння  $-x \cdot J_1(x \cdot b) \cdot Y_0(x \cdot a) + x \cdot Y_1(x \cdot b) \cdot J_0(x \cdot a) = 0$ ;  $J_0(x)$  та  $J_1(x)$  - функції Бесселя першого роду відповідно з нульовим та одиничним індексом;  $Y_0(x)$  та  $Y_1(x)$  - функції Неймана першого роду відповідно з нульовим та одиничним індексом.

Далі було викладено розроблені нами методики розрахунку несучої здатності енергетичних паль.

Тут слід розрізнити такі випадки: коли у процесі експлуатації теплового насосу температура основи не опускається до від'ємної та випадок, коли можливе промерзання основи на контакті палі з ґрунтом. Для цього слід використовувати формулу (5).

У першому випадку для визначення несучої здатності паль слід використовувати діючі на території України нормативні будівельні норми.

У другому випадку для визначення несучої здатності паль слід враховувати можливе зниження несучої здатності. Для цього необхідно використовувати формулу:

$$F_{d,t}(n) = k_{зн} \cdot F_d, \quad (7)$$

де  $k_{зн}$  - коефіцієнт зниження несучої здатності енергетичної палі;  $F_{d,t}(n)$  - функціональна залежність несучої здатності палі від кількості циклів заморожування – відтаювання основи  $n$ ;  $F_d$  - несуча здатність палі в основі природного стану (цей параметр слід визначати за рекомендаціями діючих на території України будівельних норм).

Розглядаються методи визначення несучої властивості паль за даними натурних випробувань та за розрахунком.

У першому випадку при проведенні випробувань слід забезпечити можливість замерзання – відтаювання прилеглого до палі ґрунту у польових умовах. Це дозволяє визначити коефіцієнт зниження несучої здатності енергетичної палі  $k_{зн}$  і далі – несучу здатність палі.

Якщо несуча здатність визначається за розрахунком, то - коефіцієнт зниження несучої здатності енергетичної палі  $k_{зн}$  слід визначати за даними випробувань ґрунтових зразків при їх циклічному замерзанні – розмерзанні так, як це вказано у розділі 2. Крім того, для врахування нелінійності міцнісних властивостей ґрунту для визначення сил опору по боковій поверхні паль слід використовувати формулу (3), де приймається  $\sigma_i = \nu_i / (1 - \nu_i) \cdot \sigma_{z,i}$ , де  $\sigma_{z,i}$  - вертикальний



тиск від власної ваги ґрунту та навантаження на даній поверхні  $i$  - того шару ґрунту;  $\nu_i$  - коефіцієнт Пуассона  $i$  - того шару ґрунту.

У ході перевірки запропонованих методик визначення несучої здатності паль на адекватність експерименту було встановлено, що відносна похибка між натурною та розрахунковою несучою здатністю палі не перевищує 10%. Тому було зроблено висновок, що запропоновані нами методики визначення несучої здатності паль, в яких розташовано колектори теплових насосів, можуть бути використані при проектуванні фундаментів з енергетичних паль.

Отримані в результаті досліджень результати впроваджені у виробничу практику будівництва на таких підприємствах: «Завод Електронпобутприлад» та ТЗОВ «Львівкомплексбуд» у м. Львові.

## ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною кваліфікаційною науково-дослідною роботою, в якій на основі вперше встановлених закономірностей між кількістю циклів заморожування – відтаювання основи та несучою здатністю паль, у яких розміщено колектори теплових насосів, розроблено методики визначення несучої здатності за даними натурних випробувань та за розрахунком, що має важливе значення для підвищення надійності експлуатації будівель та споруд.

Основні наукові і прикладні результати, висновки та рекомендації роботи полягають у наступному.

1. Показано, що застосування енергетичних паль як несучих конструкцій і елементів опалювальних приладів одночасно є досить перспективним.

2. Під час випробування ґрунту встановлено наступне:

- для врахування фізичної нелінійності міцнісних властивостей ґрунту найбільш доцільним є поліноміальний критерій міцності;

- при циклічному заморожуванні – відтаюванні ґрунту відбувається погіршення його будівельних властивостей, зокрема, зменшення міцності;

При цьому циклічна зміна температури ґрунту в діапазоні від плюс одного до плюс двадцяти градусів практично не впливає на міцність ґрунту.

- чим вищою є вологість ґрунту, тим більший вплив на його властивості здійснює циклічне заморожування – відтаювання.

3. Під час випробувань одиночних паль при циклічному заморожуванні – відтаюванні основи було визначено, що їх несуча здатність знижується при збільшенні кількості циклів заморожування – відтаювання.

4. Знайдено аналітичний розв'язок задачі про розподіл тепла в основі енергетичної палі. Отримано формули, необхідні для визначення критичного часу (тобто початку) промерзання ґрунту. Вихідними даними в цьому випадку є температура теплоносія на вході та виході із енергетичної палі, геометричні параметри пального поля, а також теплофізичні властивості ґрунту та матеріалу палі.

5. Розроблені методики визначення несучої здатності енергетичних паль в польових умовах та розрахунковим шляхом. Їх відмінністю від прийнятих в нормативних документах методів є можливість врахування впливу на несучу здатність енергетичних паль залежності властивості ґрунту від температури та кількості циклів заморожування-відтаювання.

6. Показано, що визначені із використанням запропонованих нами методик значення несучої здатності паль мають високу відповідність із результатами натурних випробувань.

7. Результати досліджень впроваджені у виробничу практику будівництва на таких підприємствах: «Завод Електронпобутприлад» та ТЗОВ «Львів-комплексбуд» у м. Львові.

### **Основні положення й результати дисертації опубліковані в роботах:**

1. Моркляник Б.В., Проценко П.О. Вплив аварійного замерзання/розморожування колектора теплового насосу на несучу здатність паль по бічній поверхні// Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво).- Вип. 83: В2-х кн.: Книга 2.- Київ, ДП НДІ-БК, 2016 С. 567-570.

2. Моркляник Б. В., Проценко П. О., Іваськевич О. М. Розрахунок несучої здатності одиночної висячої палі при циклічному замерзанні-розмерзанні ґрунту основи при роботі теплового насоса // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. - 2017. - Вип. 8. - С. 172-183.

3. Моркляник Б., Проценко П. Вплив морозного здимання ґрунтів на фундаменти споруд за експлуатації теплових насосів // Вісник Львівського національного аграрного університету. Серія : Архітектура і сільськогосподарське будівництво. - 2018. - № 19. - С. 74-78.

4. Моркляник Б. В., Брездень Б. Є., Проценко П. О. Техніко-економічні принципи проектування теплових насосів з горизонтальними та вертикальними колекторами // Науковий вісник НЛТУ України. - 2016. - Вип. 26.7. - С. 272-277.

5. Protsenko P., Ivaskevych O., Lavreniuk V. Features of heat pumps in accordance with soil conditions// Art and Science Multilingual scientific journal. Vol. 3 - 2020 - P. 90-97.

6. Shapoval V., Protsenko P., Golovko S., Ponomarenko I. Anentthenonlineardependenceofthestrengthoffoamsoilonnormalpressure// ArtandScienceMultilingualscientificjournal. Vol. 1 - 2021 - P. 16-25.

7. Protsenko P., Morklyanyk B. Identification of additional strain of foundations during the work of the heating pumps// 5-th International Conference of Young Scientists GAC- 2013 Lviv, 2013. С. 156-157.

8. Protsenko P., Morklyanyk B. The impact of heating pumps on soil foundation. 5-th International Conference of Young Scientists GAC-2013. Lviv, 2013. С. 154-155

9. Проценко П.О. Визначення несучої здатності пального фундаменту при циклічному заморожуванні-розмерзанні ґрунту// Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений: матер. Междунар. студ. науч.-техн. конф. 9-10 апреля 2015г. – Донецк : Норд-Пресс, 2015. – С. 235-237.

10. Morklyanyk B.V., Brezden B.Ye., Protsenko P.O. Features of designing heat pumps depending on the type of soil for horizontal and vertical collectors//Science, Technology and Higher Education, Westwood, Canada - 2016, P.124-132.

11. Шаповал В., Пащенко О., Терещук Р., Жилінська С., Проценко П., Пономаренко І. До питання застосування критерію о.шашенко для прогнозу міцності супіщаних ґрунтів// Матеріали міжнар. конф.«Український гірничий фо-

рум – 2020», 4-5 листопада 2020 р. – Дніпро: Журфонд, 2020. С. 169-174.

**Особистий внесок автора у роботи, що надруковані у співавторстві:**  
[1, 2] – постановка задачі, формулювання висновків; [3] – розробка методики досліджень, аналіз результатів; [4] – постановка задачі, аналіз даних, формулювання висновків [7, 8] – виконання аналітичних досліджень, розрахунків, аналіз результатів; [9] – формулювання основних задач та висновки; [10, 11] – проведення аналітичних досліджень, аналіз результатів.

## АНОТАЦІЯ

**Проценко П. О. Закономірності взаємодії висячої палі, що містить колектор теплового насосу з ґрунтовою основою. - На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.09 - «Геотехнічна і гірнична механіка». Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, 2021.

У дисертації вирішене актуальне науково-технічне завдання визначення несучої здатності паль, у яких розміщено колектори теплових насосів з врахуванням циклічного замерзання – відтаювання прилеглого до паль ґрунту.

Запропоновані і обґрунтовані методики визначення несучої здатності паль, у яких розміщено колектори теплових насосів за даними натурних досліджень та за розрахунком.

Методика визначення несучої здатності енергетичних паль за даними натурних випробувань відрізняється від загальновідомої тим, що перед початком випробувань за викладеною в українських нормативних документах методикою, слід провести обумовлену програмою випробувань кількість циклів заморожування – відтаювання прилеглої до паль основи.

Методика визначення несучої здатності енергетичних паль за розрахунком включає у себе: визначення можливості промерзання основи, визначення впливу на міцність прилеглого до палі ґрунту його циклічного заморожування - відтаювання та підрахунок несучої здатності палі.

Результати проведених досліджень використані у методиках визначення несучої здатності енергетичних паль та впроваджені у практику виробництва на таких підприємствах: «Завод Електронпобутприлад» та ТзОВ «Львівкомплексбуд» у м. Львові.

*Ключові слова:* ґрунтовий тепловий насос, енергетичні палі, несуча здатність енергетичної палі за даними натурних випробувань, несуча здатність енергетичної палі за розрахунком, схил, огинаюча Мора, міцнісні розрахункові характеристики ґрунту, циклічне заморожування – відтаювання, критерій міцності Кулона - Мора, критерій міцності О. Шашенка, поліноміальний критерій міцності.

## АННОТАЦИЯ

**Проценко П. А. Закономерности взаимодействия висячей сваи, содержащий коллектор теплового насоса с грунтовым основанием. - На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.09 - «Геотехническая и горная механика». Национальный технический университет «Днепровская политехника», Днепр, 2021.

В диссертации решена актуальная научно-техническая задача определения несущей способности свай, в которых размещены коллекторы тепловых насосов с учетом циклического замораживания - оттаивания прилегающего к ним грунта.

Предложены и обоснованы методики определения несущей способности свай, в которых размещены коллекторы тепловых насосов с использованием данных натурных испытаний статической нагрузкой и расчетным путем.

Рекомендуемая методика определения несущей способности свай, в которых размещены коллекторы тепловых насосов по данным натурных испытаний в общем случае включает в себя:

- погружение свай на проектную отметку;
- циклическое замораживание - оттаивание грунта в соответствии с техническим заданием;
- определение несущей способности свай в соответствии с изложенной в украинских нормативных документах методикой.

Рекомендуемая методика определения несущей способности свай, в которых размещены коллекторы тепловых насосов, расчетным путем в общем случае включает в себя:

- определение возможности промерзания основания (на этом этапе следует вычислить критическое время промерзания грунта);
- определение влияния на прочность прилегающего к свае грунта при его циклическом замораживании – оттаивании для указанного в техническом задании количества циклов замораживания - оттаивания (в том числе при учете физической нелинейности прочности грунта);
- подсчет несущей способности свай.

Также показано, что если в результате работы теплового насоса не происходит промерзания грунта, то его свойства практически не изменяются. В этом случае определение несущей способности свай, в которых расположены коллекторы тепловых насосов, следует осуществлять с учетом требований украинских строительных норм. В этом случае не следует учитывать характер изменения температуры грунта.

Результаты проведенных исследований, использованы в методиках определения несущей способности энергетических свай и внедрены в практику производства на таких предприятиях: «Завод Электронбытприбор» и ООО «Львовкомплексстрой» в г. Львове.

Ключевые слова: грунтовой тепловой насос, энергетическая свая, установленная по данным натурных испытаний несущая способность энергетической сваи, расчетная несущая способность энергетической сваи, огибающая Мора, прочностные расчетные характеристики грунта, циклическое изменение температуры в области положительных температур, циклическое замораживание – оттаивание грунта, критерий прочности Кулона – Мора, критерий прочности А. Шашенко, полиномиальный критерий прочности.

## ABSTRACT

**Protsenko P. O. Regularities of interaction of a hanging pile containing a collector of the heat pump with the ground basis. - On the rights of the manuscript.**

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.15.09 - "Geotechnical and mining mechanics". State Higher Educational Institution National Technical University "Dnipro Polytechnic", Dnipro, 2021.

In the dissertation the actual scientific and technical problem of definition of bearing property of piles in which collectors of heat pumps taking into account cyclic freezing - thawing of the soil adjoining to piles is placed is solved.

The methods of determination of bearing capacity of piles in which collectors of heat pumps are placed according to field research and by calculation are offered and proved.

The method of determining the load-bearing properties of energy piles according to field tests differs from the well-known one in that before testing according to the method described in Ukrainian regulations, the number of freezing cycles stipulated by the test program should be carried out.

The method of determining the bearing properties of energy piles by calculation includes: determining the possibility of freezing of the base, determining the effect on the strength of the soil adjacent to the pile of its cyclic freezing and thawing and calculating the bearing properties of the pile.

Regularities obtained as a result of research, used in the methods of determining the bearing properties of energy piles and implemented in the practice of production at the following enterprises: "Plant Electronpobutprilad" and LLC "Lvivkompleksbud" in Lviv.

Keywords: ground heat pump, energy piles, bearing property of energy pile according to field tests, bearing property of energy pile by calculation, slope, envelope Mora, strength design characteristics of soil, cyclic freezing - thawing, criterion, criterion - strength criterion strength O. Shashenko, polynomial criterion of strength.

**ПРОЦЕНКО Павло Олександрович**

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ВЗАЄМОДІЇ ВИСЯЧОЇ ПАЛІ, ЩО МІСТИТЬ  
КОЛЕКТОР ТЕПЛООВОГО НАСОСУ З ГРУНТОВОЮ ОСНОВОЮ**

**(Автореферат)**

**Підп. до друку**

**Формат 60x90/19.**

**Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 0,9.**

**Обл.-вид.арк.0,9. Тираж 120 пр. Зам. №.**

**Державний вищий навчальний заклад  
НТУ «Дніпровська політехніка»  
49005, м. Дніпро, просп. Дмитра Яворницького, 19.**