

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

Кваліфікаційна наукова робота
на правах рукопису

ПРОЦЕНКО ПАВЛО ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 624.131.537:622.271.33

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.15.09 – «Геотехнічна і гірнича механіка»

Подається на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Науковий керівник:
Моркляник Богдан Васильович
доктор технічних наук, доцент

Львів - 2021

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні наукові результати дисертації опубліковано в наступних працях.

Фахові видання

1. Моркляник Б. В., Проценко П. О. Вплив аварійного замерзання/розморожування колектора теплового насосу на несучу здатність палі по бічній поверхні// Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво).- Вип. 83: В2-х кн.: Книга 2.- Київ, ДП НДІБК, 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. Anent the nonlinear dependence of the strength of loamy soil on normal pressure// Art and Science Multilingual scientific journal. Vol. 1 - 2021 - P. 16-25.

Збірники доповідей та тез, що засвідчують апробацію

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. шащенко для прогнозу міцності супіщаних ґрунтів// Матеріали міжнар. конф. «Український гірничий форум – 2020», 4-5 листопада 2020 р. – Дніпро: Журфонд, 2020. С. 169-174.

АНОТАЦІЯ

Проценко П.О. Закономірності взаємодії висячої палі, що містить колектор теплового насосу з ґрунтовою основою. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

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

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

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

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.

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 0-20 °С.

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 палів, у які вмонтовано колектори теплових насосів, за даними натурних випробувань.

2. Встановлення залежностей та розробка методики визначення несучої здатності палів, у які вмонтовано колектори теплових насосів, за даними розрахунку.

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.

Було отримано такі результати:

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

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

У третьому розділі наведено матеріали таких досліджень:

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

У ході аналізу сучасних методів визначення несучої здатності палів 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 палі.

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

У четвертому розділі наведено матеріали таких досліджень:

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

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.

Методика визначення несучої здатності енергетичних палі 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 палі основи.

Методика визначення несучої здатності енергетичних палі 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.

У ході перевірки запропонованих методик визначення несучої здатності палі 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.

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 положення, що виносяться на захист:

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 пального 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.

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

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

Ключові слова: ґрунтовий тепловий насос, енергетична палля, 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.

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

The purpose of the work is to determine the patterns of interaction of the hanging pile, which contains the collector of the heat pump with the soil base at alternating temperatures in the soil due to the operation of the heat pump.

The object of research - thermophysical and mechanical processes occurring in the system "soil base - foundation of hanging piles, in which the heat pump collector is installed" due to cyclic freezing - thawing.

The subject of research is the regularities of change of bearing capacity of the foundation from hanging piles, in which the heat pump collector is installed, from the number of freezing cycles - thawing of the base soil.

The first section presents an analysis of literature sources on the problem of research and discusses the relevance of the tasks, the current state of development in the field of ground heat pumps in the world and Ukraine.

The literature provides data on the change in strength and deformation properties of the soil during its cyclic freezing - thawing. It is not known how the cyclic change of its temperature in the range of positive values from 1 to 20 degrees Celsius affects the properties of the soil.

In this case, it is also important to understand how long it takes to cool the substrate adjacent to the pile, from some positive temperature to the freezing point of the pore liquid (the beginning of freezing of the substrate).

In general, during the analysis of scientific literature sources the following ways of achievement of the purpose set at writing of the dissertation work were defined:

1. Establishment of dependencies and development of a method for determining the bearing capacity of piles in which heat pump collectors are installed, according to field tests.

2. Establishment of dependencies and development of a method for determining the bearing capacity of piles in which heat pump collectors are installed, according to the calculation.

The second section presents the materials of the following studies:

- determination of nonlinear strength properties of loamy soil;
- determination of the influence of cyclic heating-cooling on the strength and deformation properties of the soil when the temperature changes in the range 0-20 0C;

- determination of the influence of cyclic freezing-thawing on the strength and deformation properties of loamy water - and non-saturated soil.

The following results were obtained:

1. If the temperature of the base changes in the range of positive values, the strength properties of the soil do not change. Therefore, in this case, the load-bearing capacity of piles should be determined by current building codes in Ukraine.

2. If there is a cyclic freezing - thawing of the soil adjacent to the pile, its strength properties can change significantly. Therefore, in this case, to determine the bearing capacity of piles, it is advisable to adjust the building codes in force in Ukraine.

Section 3 contains the materials of the following studies:

- analysis of modern methods for determining the bearing capacity of piles on the ground;

- materials on the development of equipment and methods of testing piles during cyclic freezing - thawing of the base;

- results of determining the bearing capacity of piles and their analysis.

In the course of the analysis of modern methods of determining the bearing capacity of piles on the ground, the dynamic method of determining the bearing capacity and the method of determining the bearing capacity by static loads were

compared. It is concluded that the static method of determining the bearing capacity of piles is the most suitable for achieving the goal set when writing the dissertation.

In general, it was concluded that cyclic freezing - thawing of the base of energy piles leads to a significant reduction in their bearing capacity.

The fourth section presents the materials of the following studies:

- theoretical studies of temperature fields at the base of foundations from energy piles;
- methods of calculating the bearing capacity of energy piles;
- checking the results of research on the adequacy of the experiment;
- results of introduction of research materials into engineering practice of construction.

The question of temperature distribution under the conditions of a plane problem in a cylindrical coordinate system at axial symmetry was considered. It was also assumed that the collector with the coolant is placed in a spiral close to the outer surface of the pile, and the pipes with cooled and heated coolant alternate.

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

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

The dissertation is a completed qualification research work, in which on the basis of the first established regularities between the number of freezing cycles - thawing of the base and bearing capacity of piles, which accommodate heat pump collectors, developed methods for determining bearing capacity according to field tests and calculation. important for improving the reliability of operation of buildings and structures.

The main scientific provisions submitted for defense:

1. The strength of the base soil decreases from the number of cycles of freezing - thawing, which is due to the phase transitions of the pore fluid, due to alternating temperature effects.

2. The bearing capacity of piles in which the heat pump collector is installed decreases with increasing number of freezing-thawing cycles, which is due to the interaction with the adjacent soil, the strength of which from vertical pressure can be described by a polynomial of the second degree.

Scientific novelty of the obtained results:

1. For the first time, an analytical solution of the problem of temperature distribution of heat at the base of the pile, in which the heat pump collector is installed, is obtained.

2. For the first time the dependences for determining the critical freezing time of the pile and soil base taking into account the decrease in soil bearing capacity due to cyclic freezing - thawing, coolant temperature in the heat pump collector, geometric parameters of the pile field and thermophysical properties of soil and pile material.

3. A new algorithm for field tests of energy piles during cyclic freezing - thawing of the base due to the operation of the heat pump is proposed.

4. For the first time, the dependences of the bearing capacity of piles in which the heat pump collector is installed on the number of freezing-thawing cycles were obtained. It is shown that the strength of loamy soil from vertical pressure can be described by a polynomial of the second degree.

The practical significance of the work is to create the necessary method for determining the bearing capacity of hanging piles, in which the heat pump collector is installed, with alternating temperature exposure, taking into account the coefficients of soil bearing capacity due to cyclic freezing - thawing.

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.

ЗМІСТ

ВСТУП	17
 РОЗДІЛ 1	
 АКТУАЛЬНІСТЬ ПИТАНЬ ВИКОРИСТАННЯ ҐРУНТОВИХ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ. МЕТА, ІДЕЯ РОБОТИ, ОСНОВНІ ЗАДАЧІ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	
	22
1.1. Конструкції паливних фундаментів, суміщених із колекторами теплових насосів. Загальні дані.....	23
1.2. Експериментальні дослідження основ та фундаментів теплових насосів. Особливі впливи на систему «надфундаментна будівля - паливий фундамент – основа», обумовлені роботою теплового насосу.....	32
1.3. Сучасні методи проектування фундаментів (у тому числі паливих) у загальному випадку, а також основ та фундаментів теплових насосів (загальні принципи).....	43
1.4. Ціль та задачі досліджень.....	53
1.5. Висновки по розділу	54
 РОЗДІЛ 2	
 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИКЛІЧНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ВПЛИВУ ТА ЗНАКОЗМІННОГО ЗАМОРОЖУВАННЯ - РОЗМОРОЖУВАННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ СУГЛИНИСТОГО ҐРУНТУ.....	
	56
2.1. Визначення нелінійних міцнісних властивостей суглинистого ґрунту.....	57
2.2. Вплив циклічного охолодження - нагрівання на міцнісні властивості ґрунту.....	66
2.2.1. Якісний експеримент.....	66
2.2.2. Міцнісні властивості.....	68
2.3. Вплив циклічного заморожування-відтаювання на міцнісні властивості суглинистого ґрунту.....	75

2.3.1. Визначення міцнісних властивостей ґрунту з природною вологістю.....	77
2.3.2. Визначення міцнісних властивостей повністю водонасиченого ґрунту.....	80
2.4. Висновки за розділом 2.....	84

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИКЛІЧНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ВПЛИВУ ТА ЗНАКОЗМІННОГО ЗАМОРОЖУВАННЯ-РОЗМОРОЖУВАННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ СУГЛИНИСТОГО ҐРУНТУ.....	86
3.1. Сучасні методи визначення несучої здатності паль.....	87
3.2. Властивості ґрунту, на якому розміщений майданчик для випробувань. Устаткування та методика проведення експериментів щодо визначення несучої здатності паль при циклічному заморожуванні – відтаюванні основи.....	95
3.2.1. Властивості ґрунту майданчика, на якому виконувались випробування.....	95
3.2.2. Обладнання, яке використовувалося при проведенні експериментів..	98
3.2.3. Методика проведення експериментів.....	101
3.3. Результати випробувань паль при циклічному замерзанні - відтаюванні основи.....	103
3.4. Висновки за розділом 3.....	109

РОЗДІЛ 4

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ В ОСНОВІ ФУНДАМЕНТІВ ІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАЛЬ, МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАЛЬ ТА АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	111
4.1. Розподіл температурного поля в основі фундаментів із енергетичних паль.....	112

4.1.1. Розподіл температури в матеріалі енергетичної палі.....	120
4.1.2. Розподіл температури в прилеглому до енергетичної палі ґрунті. Критичний час охолодження основи.....	124
4.2. Методика визначення несучої здатності енергетичних паль.....	130
4.3. Результати перевірки результатів досліджень на адекватність експерименту.....	137
4.4. Висновки за розділом 4.....	142
ВИСНОВКИ ЗА РОБОТОЮ.....	143
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	146
ДОДАТКИ.....	158
Додаток А. Акт впровадження у практику будівництва на ТзОВ Львівкомплексбуд».....	159
Додаток Б. Акт впровадження у практику будівництва ТзОВ «Завод Електронпобутприлад».....	161
Додаток В. Список публікацій за темою дисертації.....	163

ВСТУП

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 в ґрунті внаслідок роботи теплового насосу.

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 «грунтова 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 пального 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.

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.

РОЗДІЛ 1

АКТУАЛЬНІСТЬ ПИТАНЬ ВИКОРИСТАННЯ ҐРУНТОВИХ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ. МЕТА, ІДЕЯ РОБОТИ, ОСНОВНІ ЗАДАЧІ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Представлені у цьому розділі матеріали досліджень полягають у аналізі літературних джерел, що стосуються завдань, які вирішуються у дисертаційній роботі.

1. Спочатку проаналізовано основні принципи роботи теплових насосів і варіанти розміщення їх колекторів, призначених для здійснення теплообміну з навколишнім середовищем у різних середовищах. При цьому основний акцент було зроблено на аналізі варіанту розміщення колекторів в пальових фундаментах.

Було зроблено висновок про те, що розміщення в тілі пальових фундаментів колекторів теплових насосів пов'язане з появою додаткових навантажень, що не враховуються діючими нормативними документами. Вплив на ґрунтову основу виникає внаслідок:

- підвищених температур при роботі теплового насоса в режимі кондиціонування і знижених при роботі теплового насоса в режимі опалення;
- фазових переходів вологи при замерзанні і відтаванні ґрунту навколо палі.

2. Далі були проаналізовані сучасні методи розрахунку пальових фундаментів за несучою здатністю і деформацій та виявлено додаткові чинники, які необхідно враховувати при проектуванні суміщених з колекторами теплових насосів пальових фундаментів.

Був зроблений висновок про те, що при зміні температури основи і, особливо при циклічному замерзанні - відтаванні поровою рідини можуть змінюватися властивості прилеглого до палі ґрунту. Також було встановлено, що цей факт не відображений у сучасних нормах. У зв'язку з цим було зроблено висновок про те, що необхідно розглянути сучасні методи визначення

залежності міцності і деформаційних властивостей різних матеріалів від температури.

3. Після цього були проаналізовані сучасні методи розрахунку в ґрунтових основах з теплових полів. На основі проведеного нами аналізу було зроблено висновок про те, що для вирішення даного завдання найбільш прийнятним є наближений спосіб Ритца.

4. Наостанок були проаналізовані сучасні методи визначення залежності міцності і деформаційних властивостей різних матеріалів від температури при їх циклічному замерзанні - відтаванні.

1.1. Конструкції паливних фундаментів, суміщених із колекторами теплових насосів. Загальні дані

Відомо, що на сьогоднішній день українська економіка у цілому і комунальне господарство зокрема залежить від імпортних енергоресурсів, тому становить значний інтерес інноваційна технологія опалення та підігріву води, яка заснована на використанні так званих теплових насосів.

Перевагою цієї технології є те, що для вироблення однієї і тієї ж кількості тепла в режимі опалення або кондиціонування тепловий насос споживає в 2,5 - 4,5 менше електричної енергії, ніж будь-який інший електричний нагрівальний прилад.

Якщо тепловий насос використовується в реверсному режимі (тобто для опалення взимку та кондиціонування влітку), то економія енергії істотно зростає в порівнянні з наведеними цифрами.

При роботі теплового насосу в реверсному режимі в опалювальний період на обігрів будівель і споруд витрачається низькопотенційне природне тепло ґрунтової основи, а при кондиціонуванні надлишок тепла не розсіюється в атмосфері, а відводиться в ґрунтову основу (якщо система працює в реверсному режимі, то має місце накопичення теплової енергії).

Крім того, є можливість подальшого зниження вартості опалення та кондиціонування приміщень з використанням теплових насосів при використанні з цією метою «нічного» тарифу[26, 27, 33, 34].

Такий підхід до використання електричної енергії також дозволяє згладити нічні «ями» її споживання з цією метою в даний час будують різноманітні акумулюючі станції, що мають високу вартість, в тому числі гідравлічні [7, 24, 25, 28, 68].

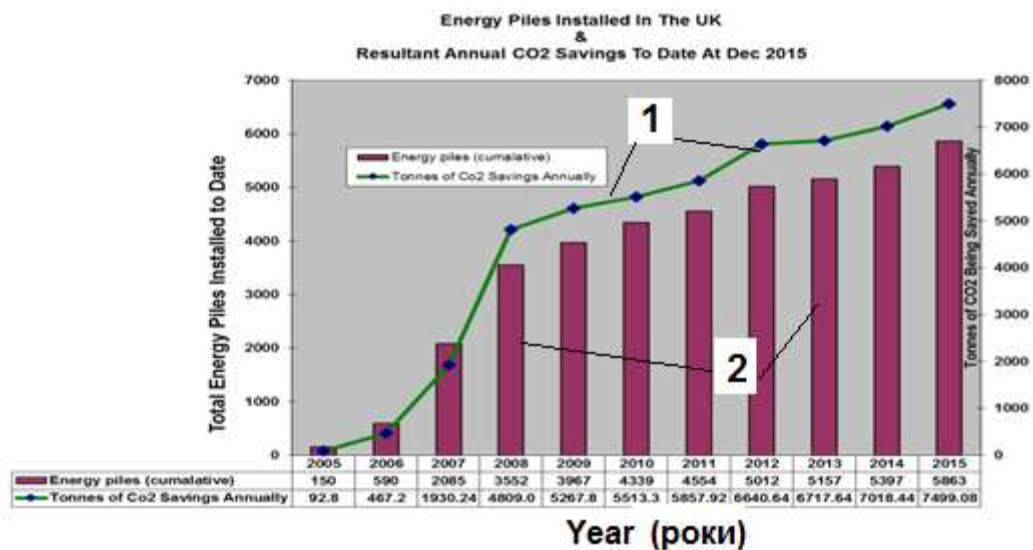


Рис 1.1. Кількість теплової енергії, відібраної із використанням енергетичних палів (крива 1) і кількість викидів вуглекислого газу CO₂ в атмосферу (крива 2)

Говорячи про використання у світі теплових насосів, слід відзначити що вони набули значного поширення у промислово високорозвинених країнах, які бідні на природні ресурси, таких як Австрія, Швеція, Японія.

На наш погляд, значний інтерес мають представлені у роботі [116] дані, які свідчать про те, що збільшення кількості теплових насосів призвело до значного скорочення викидів в атмосферу діоксиду вуглецю (рис. 1.1).

Далі проаналізуємо особливості конструкцій теплових насосів. Згідно M15 їх основою є тепла машина (рис. 1.2).

Принцип дії теплової машини заснований на теплових ефектах фазових переходів [74].

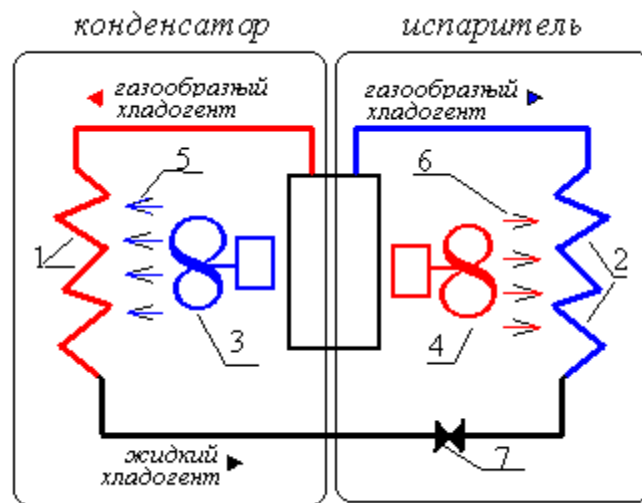


Рис. 1.2. Схема теплової машини, принцип дії якої базується на використанні ефекту фазових переходів.

1- конденсатор; 2 - випарник; 3 - вентилятор, що охолоджує випарник; 4 - вентилятор, що працює на нагрів конденсатора; 5 - потік повітря (рідини), що нагрівається; 6 - потік охолодженого повітря (рідини); 7 - дросель

Суть цих ефектів полягає у здатності рідини поглинати тепло при її випаровуванні і здатності газу виділяти тепло при його конденсації. Це дозволяє використовувати теплові машини або в якості холодильника (у цьому випадку надлишкове тепло відводиться в навколишнє середовище), або в якості опалювального приладу (у цьому випадку тепла енергія поглинається з навколишнього середовища).

Теплова машина є лише частиною теплового насоса, принцип дії якого полягає в тому, що для обігріву деякого об'єму будівлі з набагато більшого обсягу навколишнього середовища забирається низькопотенційне тепло. Дуже важливою її частиною є колектор теплового насоса - пристрій, за допомогою якого здійснюється теплообмін з навколишнім середовищем. Основними середовищами, в яких розташовують колектори теплових насосів є:

- ґрунт;

- вода;
- повітря.

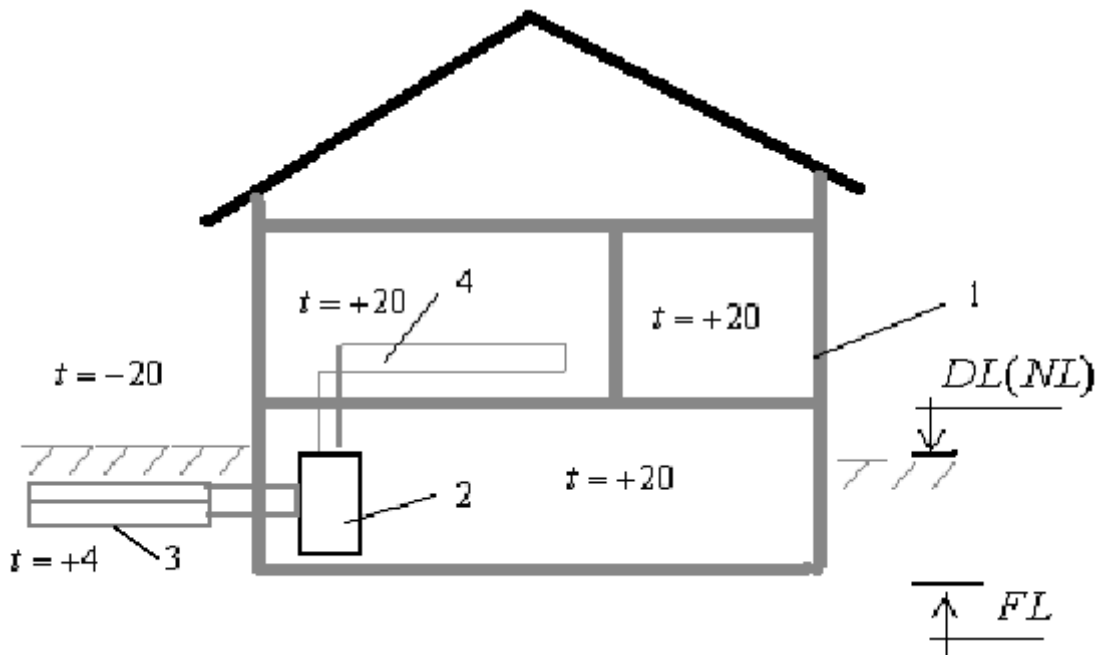


Рис. 1.3. Схема обігріву житлового будинку з використанням теплового насосу з плоским колектором.

- 1- обігривається будівля; 2 - теплова машина; 3 - горизонтальний колектор; 4 - обігривальний прилад (випарник)

Залежно від середовища, у якому розташований колектор, і теплоносія, який використовують в тепловій машині, розрізняють такі типи теплових насосів:

- вода-вода;
- повітря-повітря;
- ґрунт-вода;
- повітря-вода;
- вода-повітря;
- ґрунт-повітря.

Найбільш перспективним є використання ґрунтових теплових насосів типу «ґрунт - вода», оскільки в даному випадку починаючи з глибини 1,1 - 1,3 метра температура навколишнього середовища є вищою від температури

замерзання води цілий рік. Тому дослідимо цей тип теплових насосів детальніше.

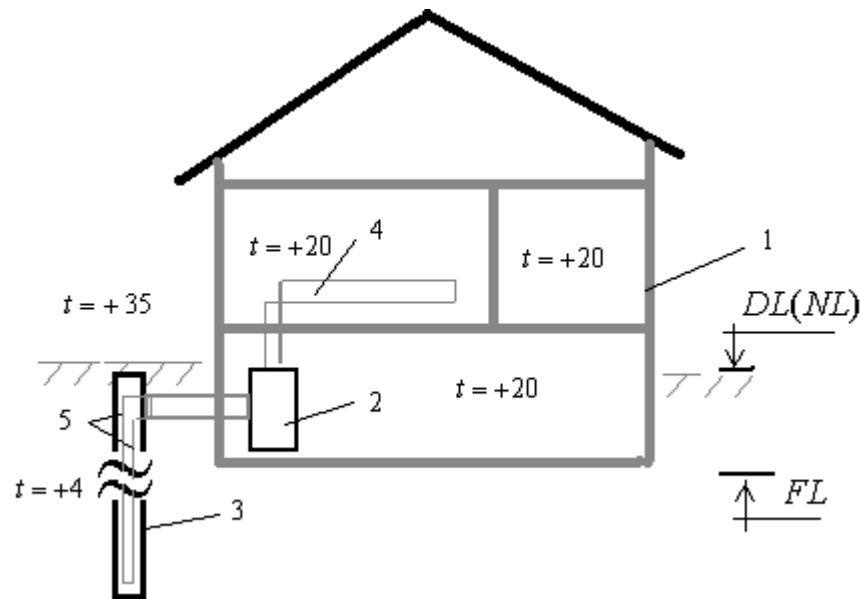


Рис. 1.4 Схема обігріву житлового будинку з використанням теплового насоса з U - подібним колектором.

1- обігриваєма будівля; 2 - теплова машина; 3 U - подібний зонд (випарник); 4-обігривальний прилад (конденсатор); 5-трубки теплообмінника

Залежно від способу розташування колектора в ґрунтовій основі, розрізняють теплові насоси з плоским (рис. 1.3) і U - подібним (рис. 1.4) колекторами.

З рисунків 1.3 і 1.4 випливає, що прокладка ґрунтових колекторів пов'язана зі значним обсягом земляних робіт, що вимагає значних витрат. Крім того, виконання земляних робіт пов'язане з високою трудомісткістю.

У зв'язку з цим значний інтерес представляє використання колекторів теплових насосів, суміщених з підземними частинами будівель і споруд, зокрема, палями [90, 91, 60, 61, 100, 103, 86, 96,97]. Палі, у яких розміщені колектори теплових насосів, прийнято називати енергетичними [91, 96, 97].

Схема розташування енергетичних паль під будівлею представлена на рисунку 1.5.

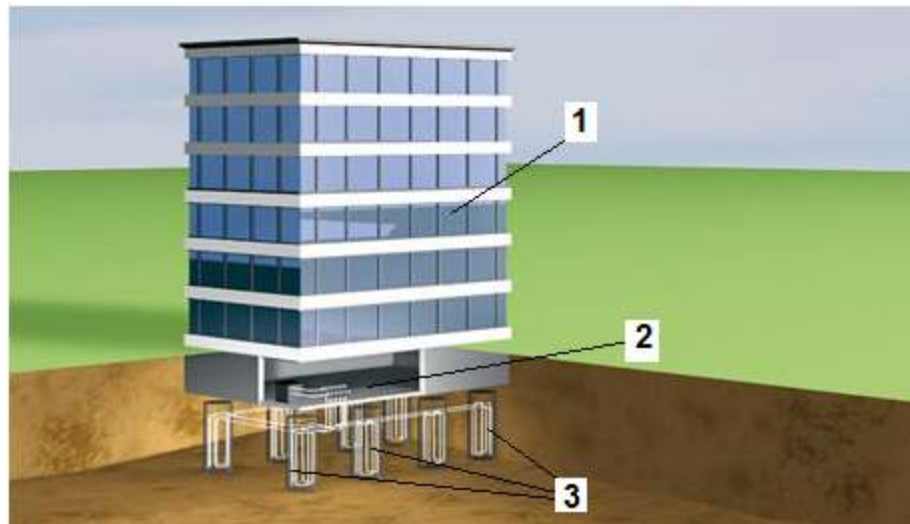


Рис. 1.5. Загальна компоновка елементів будівлі, опалюваної з використанням енергетичних паль.

1 - опалювана будівля; 2 - техпідвал, у якому розміщені теплові насоси; 3 - енергетичні палі, в яких розміщені колектори теплових насосів.

Згідно [90], основними перевагами енергетичних паль є:

1. Низькі додаткові інвестиційні витрати.
2. Можливість одночасного використання енергетичних паль не тільки для передачі навантаження від ваги розташованих на них будівель і споруд на підставу, але і для опалення.

Для розуміння процесів розподілу температурних полів в тілі палі становлять інтерес прийняті в даний час схеми розводки пластикових колекторів теплових насосів в голові енергетичних паль і розташування теплових колекторів в тілі палі (рис. 1.6 і рис. 1.7).

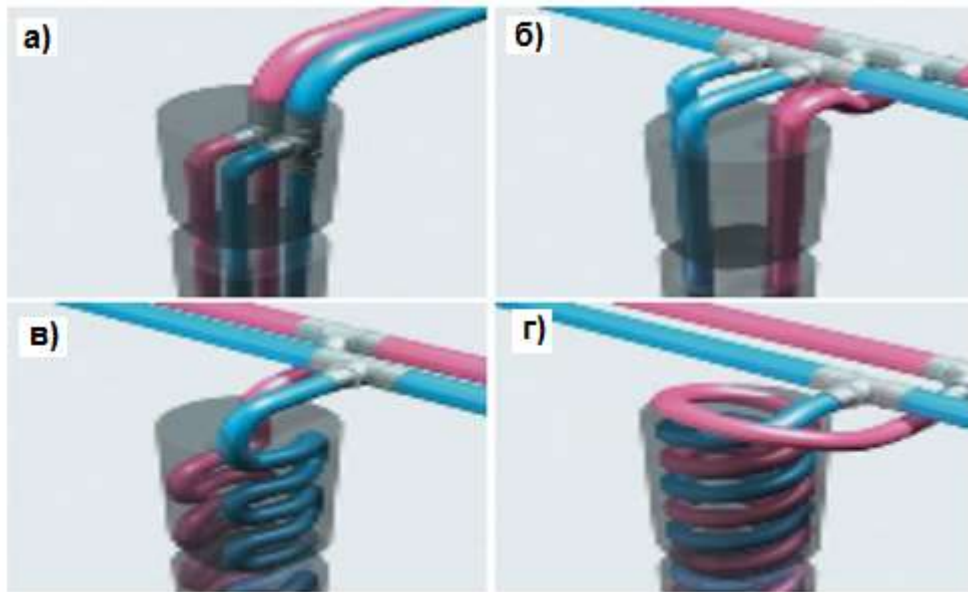


Рис. 1.6. Схеми розводки і розташування в тілі енергетичних палів пластикових колекторів теплових насосів. Схеми розводки колекторів теплових насосів в голові палі.

а), б) паралельне розташування колекторів з холодною і підігрітою водою; в), г) те ж, спіралевидне.

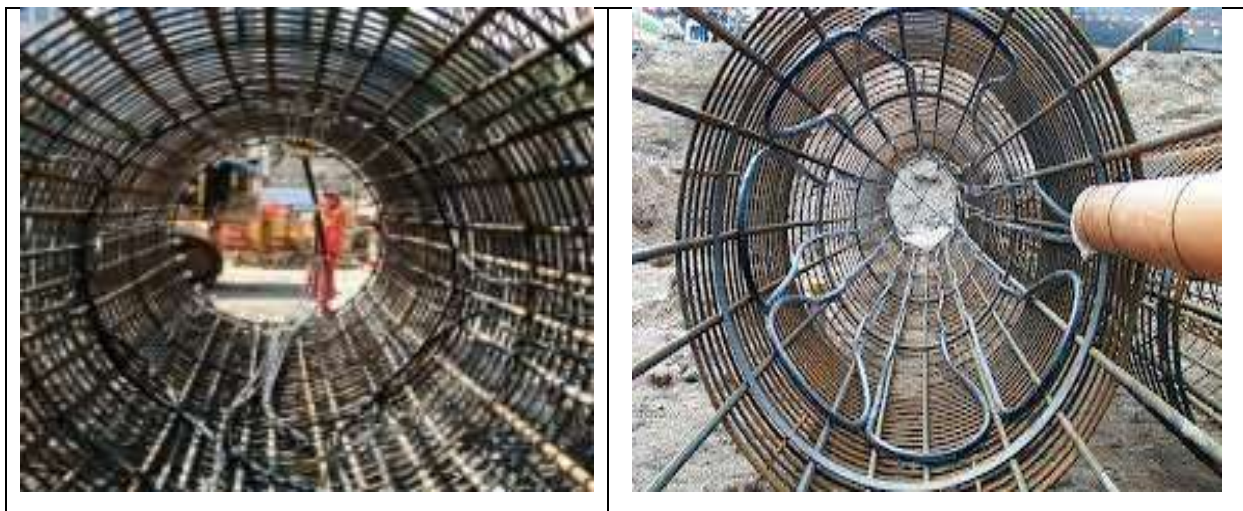


Рис. 1.7. Кріплення пластикової труби колектора теплового насосу до арматурного каркасу бурової палі.

З малюнків випливає, що найбільш рівномірний розподіл температури в тілі палі досягається при розведенні, представленою на рисунку 1.6 – г.

При цьому представлені на рисунку 1.7 фото свідчать про те, що для забезпечення міцності палі пластикові трубки колектора теплового насосу слід розміщувати всередині арматурного каркасу. Це дозволяє сприймати осьові і радіальні напруження, обумовлені температурними деформаціями пластикового колектора.

Також представляє інтерес організація розводки пластикових труб колекторів теплових насосів при їх виведенні з тіла палі (рис. 1.8). З малюнка випливає, що для забезпечення нормальних умов експлуатації теплового насосу і нормальної передачі навантаження на голову палі впуски колекторів – теплообмінників у тіло палі слід здійснювати нижче голови палі. При цьому також необхідно виконати комутацію пластикових колекторів в пучки і їх прокладку в спеціальних каналах.



Рис. 1.8. Організація сполучення колекторів теплових насосів з енергетичними палями.

Досвід застосування енергетичних палей свідчить про те, що вони були використані для опалення таких об'єктів [48-52, 56-59, 90, 91, 60, 61, 62, 63, 116, 100, 103, 96, 97]:

- житлових будинків;

- виробничих будівель;
- адміністративних будівель і споруд;
- виробничих будівель і споруд.

Також є цікавою організація циклів використання та накопичення теплової енергії у основі з енергетичними палями (рис. 1.9).

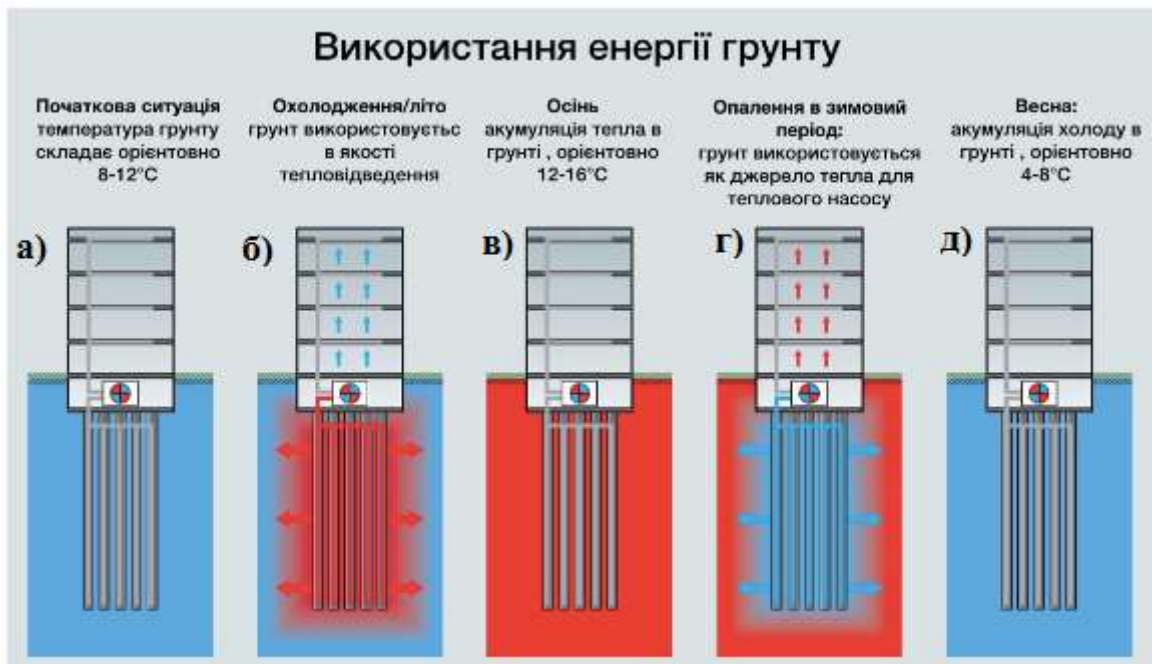


Рис. 1.9. Чергування циклів накопичення та використання теплової енергії в основі з енергетичними палями: а) початок експлуатації енергетичних палей; б) робота теплового насосу у режимі кондиціонування; в) накопичення тепла в основі та палях; г) робота теплового насосу у режимі опалювання; д) накопичення холоду в основі та палях.

Зі схеми на рис. 1.9 витікає: якщо початок експлуатації фундаменту з енергетичних палей припадає на весну, то є наявними такі цикли розігріву – охолодження основи:

1. На момент завершення будівництва основа та палі мають температуру навколишнього середовища (рис. 1.9-а).

2. Далі тепловий насос функціонує у режимі кондиціонування. У цьому випадку відбувається охолодження будинку та розігрів основи (рис. 1.9-б).

3. Після цього тепловий насос функціонує у режимі накопичення теплової енергії. У цьому випадку немає впливу на температуру приміщень будинку, однак відбувається розігрів основи (рис. 1.9-в).

4. Даліше тепловий насос функціонує у режимі опалення. У цьому випадку відбувається розігрів приміщень будинку та охолодження основи (рис. 1.9-г).

5. Даліше тепловий насос функціонує у режимі охолодження основи. У цьому випадку немає впливу на температуру приміщень будинку, однак відбувається розігрів основи (рис. 1.9-д).

1.2. Експериментальні дослідження основ та фундаментів теплових насосів. Особливі впливи на систему «надфундаментна будівля - паливий фундамент – основа», обумовлені роботою теплового насосу.

Аналіз літературних джерел також дозволив нам зробити висновки про те, що при взаємодії енергетичних палів з ґрунтовою основою виникають такі додаткові дії та впливи на ґрунт [90, 67, 47, 78, 79, 80]:

1. В основі виникають не враховані ДБН температурні деформації і напруження в тілі палі і прилеглому до неї ґрунту;

2. При зниженні температури основи, нижчої від 0⁰С відбувається циклічне замерзання і відтавання основи. У цьому випадку має місце явище морозного здимання та осідання ґрунту, а також погіршення його деформаційних і міцнісних властивостей.

3. Ці впливи на палі та ґрунт не враховуються діючими українськими будівельними нормами.

У подальшому нами наведено аналіз літературних джерел, у яких висвітлено вплив теплових насосів на властивості ґрунту та матеріалу палів, а також додаткові напруження та деформації системи «основа – фундамент (або фундаменти) – надфундаментна будівля»[1].

У зв'язку з цим дуже цікавим є виконаний Б. М. Моркляником якісний експеримент, суть якого полягала у тому, що зразки суглинистого ґрунту циліндричної форми піддавались циклічному заморожуванню – відтаюванню [47, 79, 81, 83].

Основною відмінністю цих випробувань від звичайних випробувань на морозостійкість є той факт, що зразки ґрунту, на відміну від прийнятих в українських нормативних документах (таблиця 1.1) при визначенні морозостійкості бетону, постійно знаходились у воді.

Таблиця 1.1

Умови випробувань бетону для визначення його морозостійкості

Номер методу	Умови випробувань			Вид бетону
	Середовище насичення	Середовище, температура заморожування, °С	Середовище відтавання	
Базові				
Перший	Вода	Повітряне, мінус 18±2	Вода	Всі види бетонів, крім бетонів дорожніх і аеродромних покриттів
Другий	5%-ий водний розчин хлористого натрію	Те ж	5%-ий водний розчин хлористого натрію	Бетони дорожніх і аеродромних покриттів

Це обумовлено тим, що на відміну від зовнішніх стінових конструкцій будинків та споруд фундаменти (у тому числі палеві) постійно знаходяться нижче від рівня підземних вод. Деякі результати випробувань наведено на рис. 1.10.

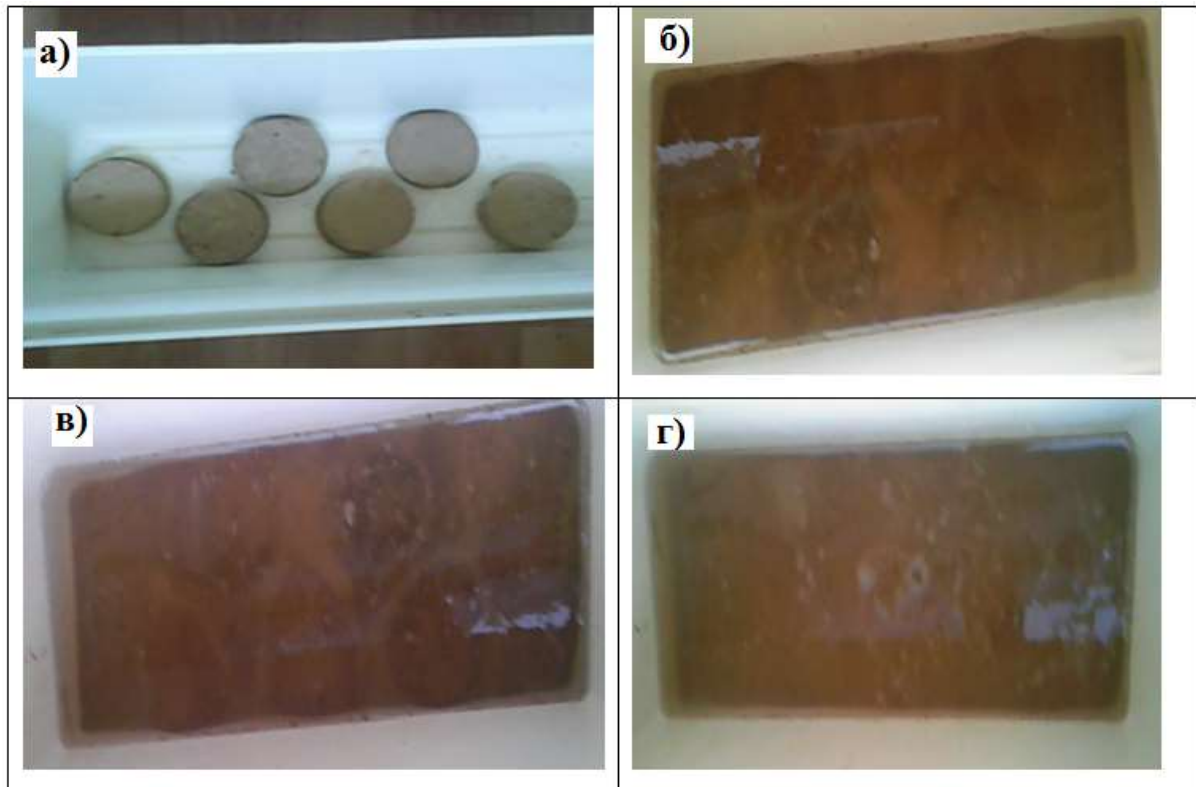


Рис. 1.10. Результати випробувань ґрунтових зразків на циклічне «заморожування – відтаювання».

Примітки:

рис. а) вихідні зразки (до початку випробувань); б) загальний вигляд зразків після першого циклу «заморожування – відтаювання»; в) загальний вигляд зразків після третього циклу «заморожування – відтаювання»; г) загальний вигляд зразків після п'ятого циклу «заморожування – відтаювання».

Аналіз даних наведених на рис. 1.10, дозволив зробити такі висновки:

1. Вже після першого циклу «заморожування – відтаювання» ґрунтові зразки втратили свій первісний вигляд, зокрема у них затупилися їх верхні грані (рис. 1.10-а та рис. 1.10-б).

2. Після третього циклу «заморожування – відтаювання» ґрунтові зразки ще більше втратили свій первісний вигляд, зокрема вони перетворилися у структури у вигляді усіченого конуса (рис. 1.10-б та рис. 1.10-в).

3. Після п'ятого циклу «розморожування – відтаювання» ґрунтові зразки остаточно зруйнувались (рис. 1.10-в та рис. 1.10-г).



Рис. 1.11. Залежність питомого зчеплення піску від кількості циклів «заморожування – розморожування»

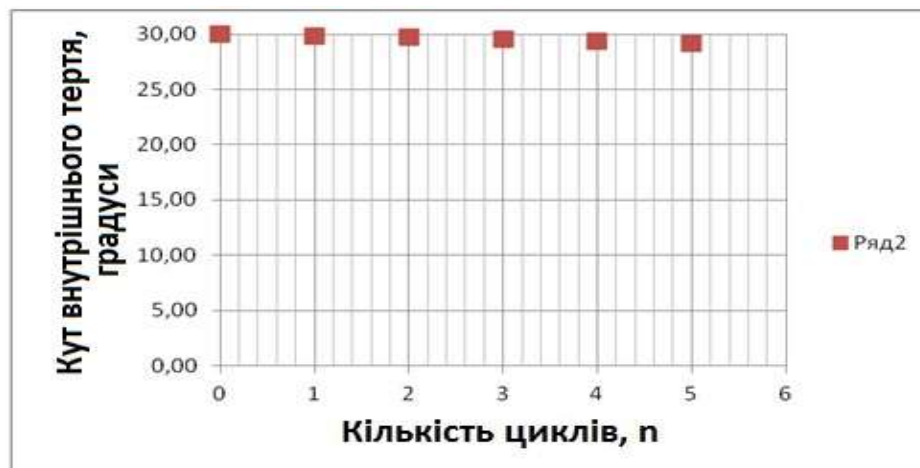


Рис. 1.12. Залежність кута внутрішнього тертя піску від кількості циклів «заморожування-розморожування»

Ці факти свідчать про те, що у ході циклічного «заморожування – відтаювання» є наявною деструкція ґрунтової структури, що, у свою чергу, призводить до зниження ґрунтом його первісної міцності та погіршення його деформаційних властивостей.

Про справедливості цих висновків свідчать результати визначення властивостей ґрунту при циклічному заморожуванні – відтаюванні [47, 82]. Найбільш характерні дані щодо трансформації наведено на рис. 1.11-1.16.

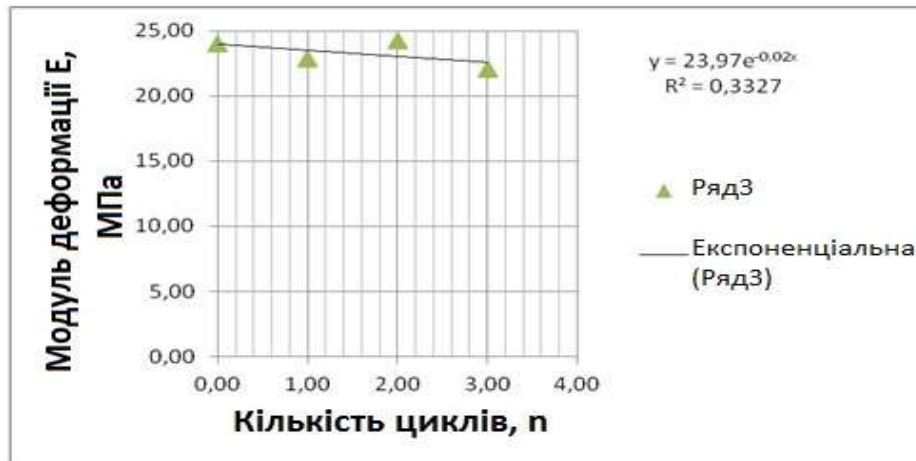


Рис. 1.13. Залежність модуля загальної деформації E піску від кількості циклів «заморожування-розморожування» n

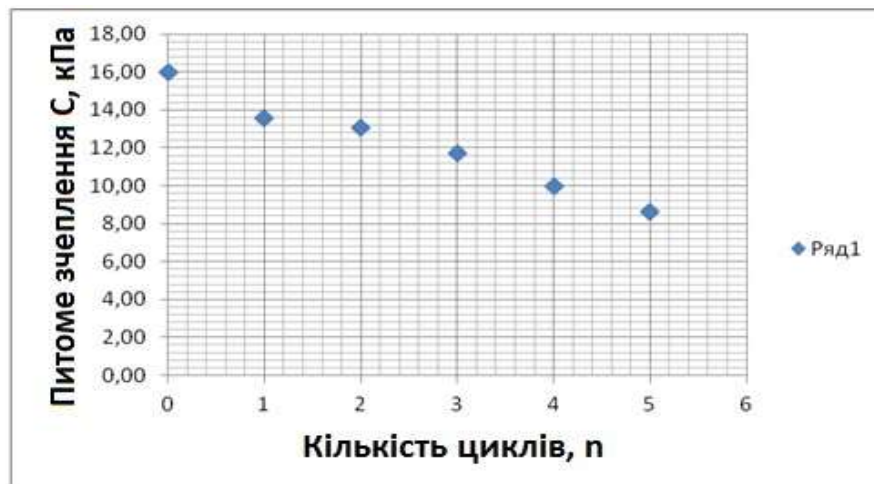


Рис. 1.14. Залежність питомого зчеплення суглинку від кількості циклів «заморожування-розморожування» n

Аналіз наведених на цих рисунках даних дозволяє зробити такі висновки:

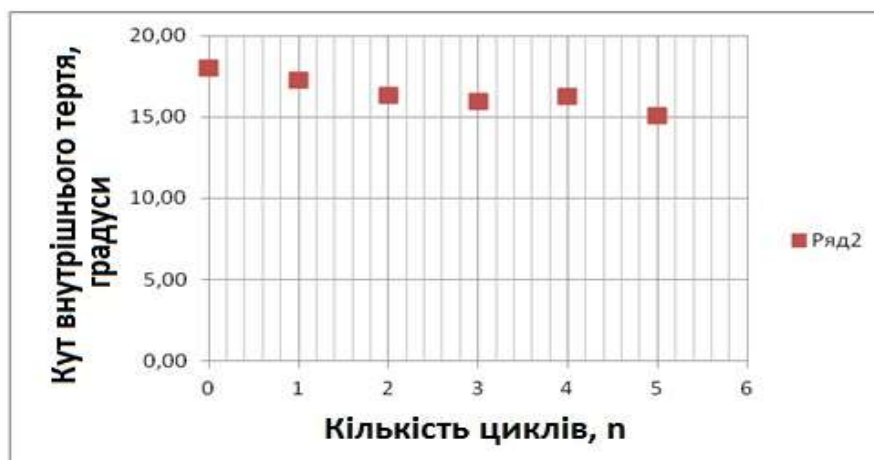


Рис. 1.15. Залежність кута внутрішнього тертя суглинку від кількості циклів «заморожування-розморожування» n

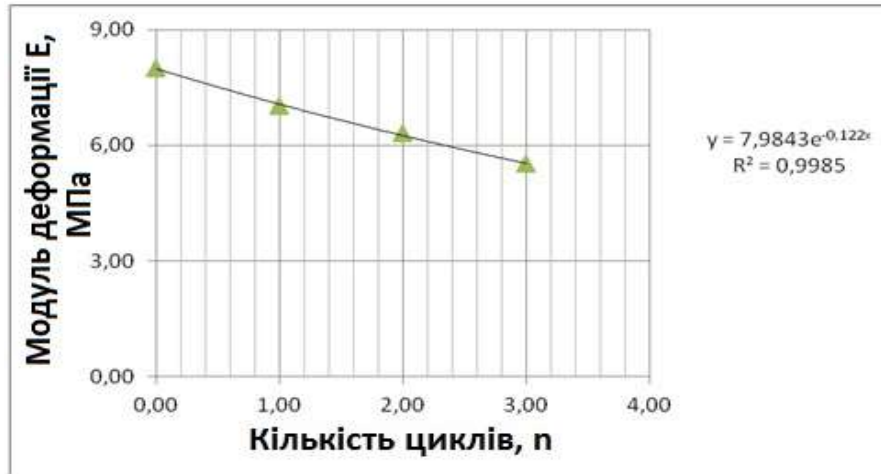


Рис. 1.16. Залежність модуля загальної деформації E суглинку від кількості циклів «заморожування-розморожування» n

1. Найбільш суттєво при циклічному заморожуванні – відтаюванні змінюються властивості глинистих ґрунтів. При цьому зміни властивостей піщаного ґрунту знаходяться у межах експериментальної розбіжності.

2. Із міцнісних характеристик ґрунту його заморожування-розморожування найбільше впливає на питоме зчеплення. При цьому кут внутрішнього тертя піщаного ґрунту залишається практично незмінним.

3. Циклічне заморожування-розморожування піщаного ґрунту майже не впливає на значення модуля загальної деформації піщаного ґрунту.

При цьому зміни модуля загальної деформації суглинистого ґрунту є значними.

При замерзанні приблизно на 10% зростає об'єм води, що знаходиться у порах ґрунту. У технічній літературі це явище називають морозним здиманням [8, 13, 14, 15, 47, 71, 75, 76, 77].

Оскільки у зоні впливу колектору теплового насосу можливе замерзання ґрунтової рідини, то це явище також може проявитися у основі теплового насосу. Відзначене явище було доведено експериментальним шляхом авторами робіт [47, 81-86], якими було доведено, що деформації морозного здимання можуть досягати 140 мм.

Також є цікавими виконані авторами [47] випробування бетонних зразків при циклічному заморожуванні – розморожуванні (рис. 1.17 та 1.18).

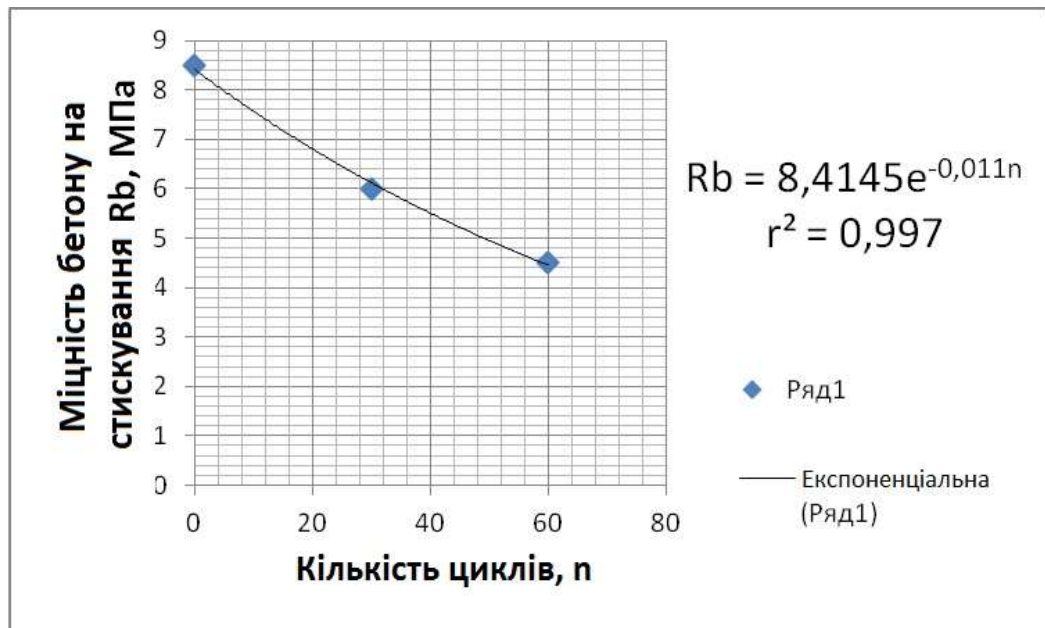


Рис. 1.17. Залежність розрахункової міцності бетону R_b на стиск від кількості циклів заморожування-розморожування

На рис. 1.17 наведено залежність міцності бетону на стиснення при циклічному замерзанні – розморожуванні від кількості циклів.

На рис. 1.18 наведено залежність класу бетону при циклічному замерзанні – розморожуванні.

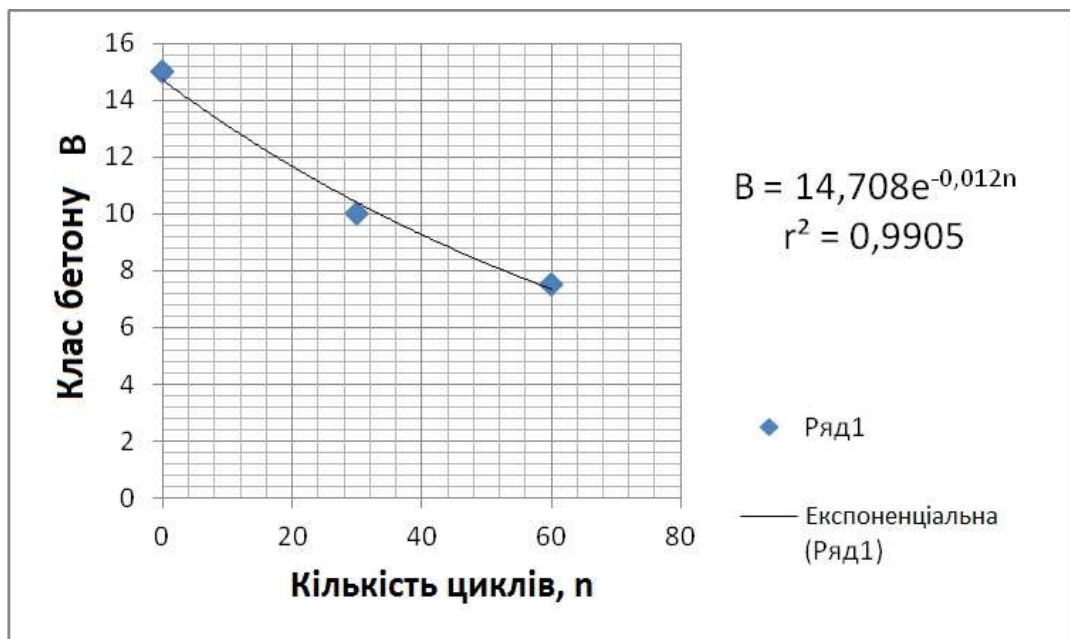


Рис. 1.18. Залежність класу бетону V від кількості циклів заморожування-розморожування

Наведені на рис. 1.17 та 1.18 дані свідчать про те, що міцність бетону на стиск та клас бетону при циклічному замерзанні – розморожуванні зменшується.

Виконані авторами [47, 93] якісні випробування бетонних зразків з порожнинами всередині при циклічному заморожуванні – розморожуванні вказують на те, що замерзла в порожнинах рідина може призвести до руйнування бетонної конструкції (рис. 1.19).

Це обумовлено додатковими зусиллями, які не враховують діючі у даний час на території України будівельні норми [16].

При цьому руйнування суцільних зразків майже непомітні.

Ці дані свідчать про те, що при проектуванні конструкцій теплових насосів із залізобетону при циклічному заморожуванні – відтаюванні обов'язково слід враховувати не тільки зміну їх фізичних характеристик, а й конструктивні особливості.



Рис. 1.19. Наскрізні тріщини в бетонному зразку, зумовлені заморожуванням води, яка знаходиться всередині порожнини

Подальші дослідження були спрямовані на аналіз виконаних автором робіт [47] експериментальних робіт щодо визначення несучої здатності моделей

одиначних паль при їх циклічному заморожуванні – відтаюванні (рис. 1.20 та 1.21). У якості основи було використано виготовлену за спеціальною технологією глинисту пасту [9].

Аналіз наведених на рис. 1.21 даних дозволив нам зробити висновок про те, що циклічне заморожування – відтаювання глинистого ґрунту (точніше, пасти), у якому розташовані енергетичні палі, призводить до суттєвого зниження несучої здатності енергетичних паль по ґрунту.

Викладені в цьому розділі матеріали виконаних різними авторами експериментальних досліджень теплових насосів, середовищ та конструкцій, у яких розміщено колектори теплових насосів, дозволили зробити такі висновки:

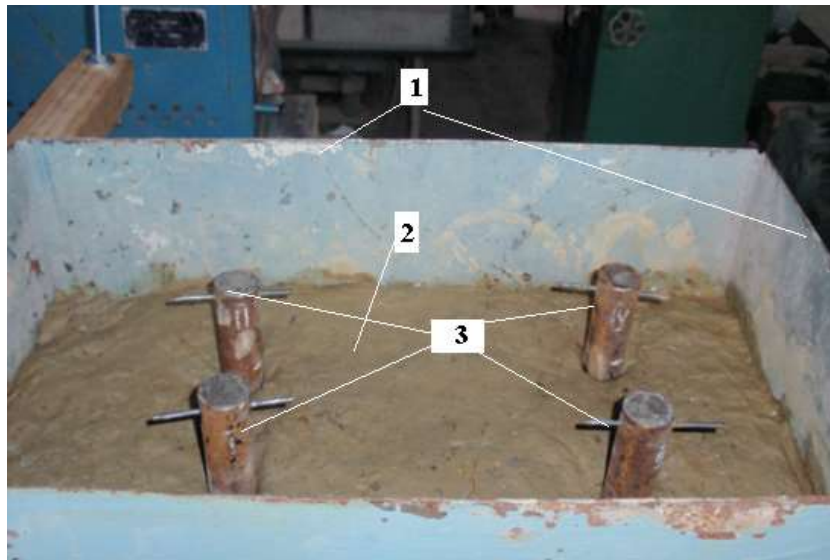


Рис. 1.20. Експериментальна установка (фото): 1 – ґрунтовий лоток; 2 – ґрунт; 3 – моделі паль

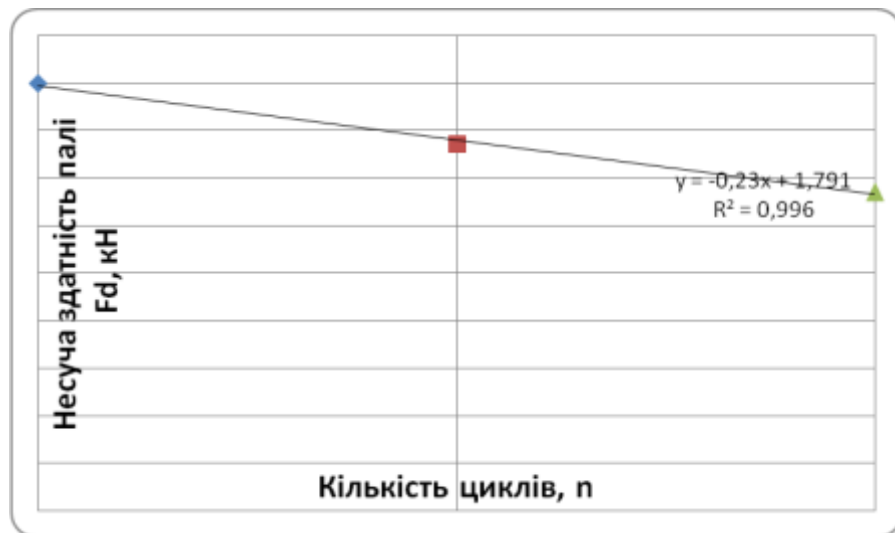


Рис. 1.21. Залежність несучої здатності моделей паливих фундаментів від кількості циклів заморожування-розморожування ґрунту

1. З'явилася інноваційна високоефективна технологія опалення, кондиціонування приміщень і підігріву води з використанням теплових насосів. Суть цієї технології полягає в тому, що в якості джерела теплової енергії використовують низькопотенційне тепло навколишнього середовища, в тому числі повітря, води і ґрунту.

2. Досвід застосування теплових насосів свідчить про те, що найбільш ефективним і економічно вигідним є використання таких ґрунтових теплових насосів, колектори яких розташовані в підземних частинах будівель і споруд, зокрема в палях.

У даному випадку економічний ефект обумовлений тим, що окреме улаштування колекторів теплових насосів є дуже трудомістким та вартісним процесом, а суміщення улаштування палей з розташованими у них тепловими насосами дозволяє суттєво (іноді майже на 80-90%) знизити витрати на виготовлення колекторів теплових насосів.

3. При розташуванні колекторів теплових насосів в тілі палей є наявною проблема не врахованих у діючих в даний час в українських нормативних документах додаткових навантажень і впливів на ґрунт та розташовані у

грунтовій основі колектори теплових насосів, а також конструкції, у яких розташовані теплові насоси.

Ці додаткові навантаження та впливи обумовлені такими факторами:

3.1. Не врахованими у діючих на даний час на території України нормативних документах додаткових температурних напружень і деформацій ґрунтової основи.

3.2. Не врахованими у діючих на даний час на території України нормативних документах додаткових температурних напружень і деформацій у елементах конструкцій булинків і споруд, у яких розміщено колектори теплових насосів.

3.3. Не врахованими у діючих на даний час на території України нормативних документах додаткових напружень і деформацій ґрунтової основи, що обумовлені циклічним замерзанням та відтаюванням ґрунтової основи.

3.4. Не врахованими у діючих на даний час на території України нормативних документах додаткових температурних напружень і деформацій у елементах конструкцій булинків і споруд, у яких розміщено колектори теплових насосів.

4. Є наявною проблема погіршення властивостей ґрунту при його циклічному замерзанні - відтаванні. Встановлено, що найбільший вплив циклічне замерзання – відтавання має на міцнісні та деформативні властивості глинистих ґрунтів (тобто супісків, суглинків та глин). Це явище не знайшло свого відображення у діючих на території України нормативних документах.

5. Також є наявною проблема погіршення властивостей бетону при його циклічному замерзанні - відтаванні. Встановлено, що у даному випадку знижується клас бетону, а також його міцність на стиск та розтягнення.

У даному випадку, відміною від прийнятої у діючих на території України нормативних документах схеми замерзання – відтаювання бетонних та залізобетонних конструкцій є той факт, що колектори теплових насосів та

конструкції, у яких вони розміщені, постійно знаходяться нижче від рівня підземних вод.

6. Також актуальною є проблема конструювання елементів будинків та споруд, що знаходяться нижче від рівня підземних вод, бо у цьому випадку слід враховувати додаткові напруження, які виникають внаслідок замерзання води у пустотах цих конструкцій.

Аналіз наведених у розділі 1.2 даних дозволив зробити такі висновки:

1. У присвяченій даній проблемі літературі повністю відсутні дані щодо польових натурних випробувань несучої здатності та осідань паль при циклічному заморожуванні – відтаюванні основи.

2. Також у присвяченій випробуванням, розрахунку та проектуванню паль, у яких розміщено колектори теплових насосів технічній літературі повністю відсутні дані щодо урахування фізичної нелінійності міцнісних властивостей ґрунту.

На вирішення цих проблем і будуть спрямовані подальші дослідження.

Також у наведеному вище аналізі практично не відображено сучасні методи розрахунку та проектування основ та фундаментів, у яких розташовано колектори теплових насосів.

Розгляду цих питань присвячений розділ 1.3.

1.3. Сучасні методи проектування фундаментів (у тому числі палевих) у загальному випадку, а також основ та фундаментів теплових насосів (загальні принципи).

Розрахунок основ та фундаментів виконують за першою та другою групами граничних станів.

У ході розрахунків за першою групою граничних станів визначають міцність та стійкість ґрунтових основ та фундаментів.

У ході розрахунків за другою групою граничних станів визначають деформації ґрунтових основ та фундаментів.

Необхідно підкреслити, що розрахунок за першою та другою групами граничних станів слід виконувати по ґрунту та матеріалу фундаментних конструкцій окремо.

У загальному випадку, при проектуванні основ та фундаментів розрахунок за деформаціями основ виконують, виходячи з умов

$$s \leq s_{uu} \quad (1.1)$$

$$s_{uu}$$

де s - спільна деформація основи і споруди, яку визначають розрахунком;

s_{uu} - граничне значення спільної деформації споруди і основи.

Спільна деформація основ і споруд характеризується:

- абсолютним осіданням (підйомом) S основи окремого фундаменту;
- середнім S і максимальним S_{max} осіданням споруди;
- відносною нерівномірністю осідання (підйомів) двох фундаментів;
- $\Delta S/L$, L -відстань між фундаментами;
- креном фундаменту (споруди), i ;
- відносним прогином чи вигином f/L , де L – довжина ділянки вигину чи прогину;
- кривизною ділянки споруди, що згинаються, ρ ;
- відносним кутом закручування споруди, θ ;
- горизонтальним переміщенням фундаменту (споруди), u .

Розрахунок фундаментів за деформаціями основи слід виконувати на основі лінійних чи нелінійних розрахункових моделей.

Лінійні моделі застосовуються при дотриманні критерію

$$\sigma \leq \sigma_R \quad (1.2)$$

де σ_R - напруження, що відповідає розрахунковому опору основи R .

Розрахунок фундаментів за несучою здатністю основ виконують із метою забезпечення міцності та стійкості їх основ, а також недопущення зрушення по підшві й перекидання фундаменту.

Розрахунок фундаментів (у тому числі палевих) за несучою здатністю основ виконують, виходячи з умов

$$\sigma \leq \sigma_u \text{ або } F \leq \gamma_c F_u / \gamma_n, \quad (1.3)$$

де $\sigma = F/bl$, Па

σ_u – напруження, що відповідає межі несучої здатності основи, Па ;

F - розрахункове навантаження на основу, Н;

F_u - сила граничного опору основи; її вертикальна складова N_u , Н;

γ_c – коефіцієнт умов роботи, який приймають для ґрунтів згідно ДСТУ Б А1,1-25-94; пісків, крім пилуватих, $\gamma_c=0.9$; глинистих ґрунтів у нестабілізованому стані $\gamma_c=0.85$; скельних ґрунтів: невивітрілих і слабо вивітрілих $\gamma_c=1.0$; вивітрілих $\gamma_c=0.9$; сильно вивітрілих $\gamma_c=0.8$;

γ_n – коефіцієнт надійності за відповідальністю, визначається залежно від класу наслідків (відповідальності) об'єкта згідно з ДБН И.1.2-14;

b,l – розміри в плані (ширина і довжина) сторін фундаменту, м.

Далі зупинимося на особливостях при проектуванні палевих фундаментів у загальному випадку.

Основні положення розрахунку фундаменту з висячих паль наведені у ДБН В.2.1-10-2018 «Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування» [1, 13, 14, 15, 29].

Розрахунок палевих фундаментів виконують за властивостями (несучою здатністю і деформаціями) ґрунтової основи і матеріалу конструкції фундаментів та вищерозташованих конструкцій будівель і споруд, як правило, в загальній розрахунковій схемі "основа-фундамент-верхня споруда".

Розрахунок палевих фундаментів сумісно з їх основою має бути виконаний за граничними станами:

а) першої групи:

- за міцністю матеріалу паль і палевих ростверків згідно з вимогами норм проектування залізобетонних (відповідних) конструкцій, у т.ч. конструкцій мостів і гідротехнічних споруд;
- за несучою здатністю ґрунтів основи, що оточують палі;
- за несучою здатністю ґрунтів основи, що оточують палеві фундаменти, якщо на них передаються значні горизонтальні навантаження (підпірні стіни,

фундаменти розпирних конструкцій, утримуючі конструкції стін котлованів тощо), у т.ч. сейсмичні або динамічні;

- споруда розташована на укосі або основа складена крутоспадаючими шарами ґрунту;

б) другої групи:

- за осіданнями паль і пальових фундаментів сумісно з ґрунтовою основою та вищерозташованими конструкціями будівель і споруд від вертикальних навантажень;
- за переміщеннями паль (горизонтальним і кутом повороту голови палі) сумісно з ґрунтовою основою та вищерозташованими конструкціями будівель і споруд від дії горизонтальних навантажень і моментів;
- за утворенням або розкриттям тріщин в елементах залізобетонних конструкцій пальових фундаментів згідно з вимогами норм проектування залізобетонних конструкцій, у т.ч. конструкцій мостів і гідротехнічних споруд.

Несучу здатність висячої палі визначають як суму сил розрахункових опорів ґрунтів основи під нижнім кінцем палі і на її бічній поверхні з використанням схеми на рис. 1.22.

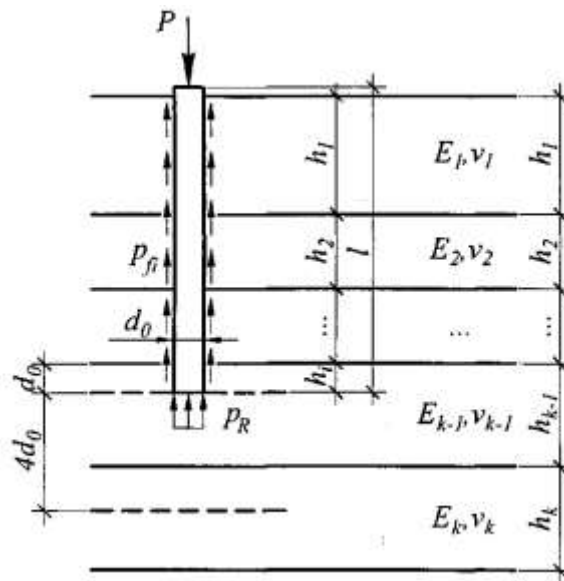


Рис. 1.22. Розрахункова схема для визначення несучої властивості та осідання одиночної палі

Розрахунок несучої здатності палі слід виконувати з використанням такої формули згідно з ДБН [14, 15]:

$$F_d = \gamma_c (\gamma_{cR} RA + u \sum \gamma_{cf} f_i h_i), \quad (1.4)$$

де γ_c - коефіцієнт умов роботи палі в ґрунті;

R - розрахунковий опір ґрунту під нижнім кінцем палі, кПа;

A - площа спирання палі на ґрунт, м²;

u - зовнішній периметр поперечного перерізу палі, м;

f_i - розрахунковий опір i -го шару ґрунту основи на бічній поверхні палі, кПа;

h_i - товщина i -го шару ґрунту, дотичного з бічною поверхнею палі, м;

γ_{cR} , γ_{cf} - коефіцієнти умов роботи ґрунту відповідно під нижнім кінцем і на бічній поверхні палі, що враховують вплив способу занурення палі на розрахункові опори ґрунту.

У відповідності із ДБН В.2.1-10-2009 «Основи та фундаменти споруд» [13, 14, 15], при проектуванні фундаменту повинна виконуватися умова розрахунку за деформаціями, відповідно до якої очікувана осадка фундаменту s не повинна перевищувати граничну для даного типу споруди величину осідання s_u ($s \leq s_u$).

Розрахунок пальових фундаментів за деформаціями основ виконують у складі загальних розрахункових схем, у нелінійній постановці з використанням адекватних моделей ґрунтової основи та числових методів розрахунку [13, 14, 15].

Осідання одиночної палі s_l під дією вертикального навантаження P визначається за формулою [13, 14, 15]:

$$S = \frac{S_e \cdot P}{P_u - P}, \quad (1.5)$$

де s_e - пружна складова осідання палі при навантаженні на палю P_e ;

P_e - навантаження, що обмежує лінійну ділянку спільного осідання (від стиснення стовбура та осідання ґрунтової основи) голови палі (межа пропорційності); за відсутності результатів натурних випробувань паль

приймають $P_e = 0,5P_u$;

P_u - величина граничного опору палі - навантаження, за якого вичерпується несуча здатність основи F_d ;

P - вертикальне навантаження на палю, $P = P_f + P_R$;

P_f - частина навантаження, що передається на ґрунтову основу бічною поверхнею палі, $P_f = u \sum p_{fi} h_i$;

u - периметр палі;

p_{fi} - питомий опір i -го шару ґрунтової основи по бічній поверхні палі;

h_i - товщина i -го шару ґрунту, що контактує з бічною поверхнею палі;

P_R - частина навантаження, що передається на ґрунтову основу нижнім кінцем палі, $P_R = p_R A$;

p_R - питомий опір ґрунтової основи під нижнім кінцем палі (ступінь реалізації питомих опорів P_f та P_R залежить від величини вертикального навантаження P), визначається в межах одного діаметра вище і чотирьох нижче позначки нижнього кінця палі;

A - площа спірання палі на ґрунт.

Також існує методика розрахунку осідань пальових фундаментів при їх інтерпретації як умовного фундаменту, який включає у себе палі та прилеглий до них масив ґрунту (рис. 1.23).

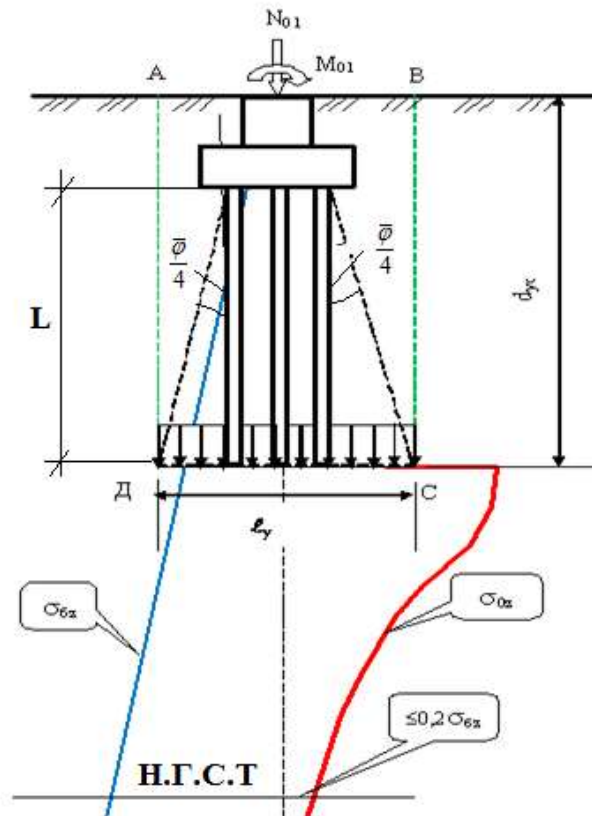


Рис. 1.23. Розрахункова схема для визначення осідань умовного палевого фундаменту.

Примітка: синім кольором позначено епюру тиску від власної ваги ґрунту, а червоним – додаткового тиску.

Для визначення розмірів умовного фундаменту у плані слід використовувати такі формули:

$$\left. \begin{aligned} b^y &= b + 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\bar{\varphi}}{4} \right) \\ l^y &= l + 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\bar{\varphi}}{4} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (1.6)$$

де: b^y та l^y - ширина та довжина підшви умовного фундаменту; b та l - відстань між крайніми палями в осях відповідно у напрямку сторін b^y та l^y ;

$\bar{\varphi} = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot h_i}{L}$; φ_i та h_i - відповідно кут внутрішнього тертя та товщина

грунтового шару i - того грунтового шару; n - кількість грунтових шарів на інтервалі глибин від підшви ристверку до вістря палі.

Подальший розрахунок осідань умовного фундаменту слід виконувати так, як це робиться при розрахунку фундаментів неглибокого закладання [13, 14].

Далі розглянемо запропоновану автором робіт [47, 79-86] методику визначення напружено-деформованого стану геомеханічної системи «фундамент – грунтовий масив» у зоні дії колектора теплового насосу:

1. Розрахунок НДС потрібно виконувати на основі першої та другої групи граничних станів. Незалежно від стану, для якого виконується розрахунок, слід розглядати найневигідніший випадок.

2. Розрахунок НДС основ і фундаментів обов'язково повинен передувати розрахунок на вплив температурних полів, зумовлених роботою теплових насосів, а також визначення зон замерзання і розмерзання.

3. Окрім навантажень і впливів, вказаних у ДБН В.1.2-2:2006, необхідно враховувати навантаження, зумовлені заморожуванням і розморожуванням основи, а також додаткові зусилля, які спричинені різницею коефіцієнтів лінійного температурного розширення бетону і полімерного матеріалу, з якого виготовлені колектори теплових насосів. Ці навантаження необхідно розглядати як тривалі змінні.

4. Під час розрахунку за першою групою граничних станів необхідно виконати умову:

$$F \leq F_u, \quad (1.7)$$

де F – навантаження, яке діє на основу чи фундамент, а F_u – її граничне значення;

4.1. Як розрахункові треба приймати розрахункові характеристики ґрунту, визначені у інтервалі імовірності $\alpha = 0,95$.

4.2. Визначення міцнісних характеристик ґрунту необхідно проводити з врахуванням їх зниження під час розморожування ґрунту.

Знижувальний коефіцієнт для питомого зчеплення треба приймати таким, що дорівнює 0,7; а для кута внутрішнього тертя – 0,9.

Для споруд високого класу відповідальності ці характеристики треба визначати експериментально.

4.3. Під час визначення несучої здатності висячих паль F_d необхідно враховувати суттєве зниження їх несучої здатності по бічній поверхні під час заморожування-розморожування ґрунту. Для цього потрібно використовувати формулу:

$$F_d = k_d \cdot F_d^{\text{дбн}}, \quad (1.8)$$

де $F_d^{\text{дбн}}$ – несуча здатність палі, визначена за рекомендацією ДБН, а k_d – експериментальний коефіцієнт зниження несучої здатності палі.

5. Під час розрахунків за другою групою граничних станів необхідно виконати умову:

$$S \leq S_u, \quad (1.9)$$

де S – фактичне осідання основи чи фундаменту, а S_u – її граничне значення, визначене за рекомендаціями ДБН В.2.1-10-2009.

5.1. Треба розрізняти осідання, зумовлені силовими впливами S_c , морозним здійманням ґрунту (підніманням) S_n і осідання, зумовлені розморожуванням ґрунту (опусканням) S_o .

5.2. Як розрахункову, необхідно приймати найбільшу з осідань:

$$S = S_c + S_n \text{ або } S = S_c + S_o \quad (1.10)$$

5.3. Осідання S_c треба визначати за методикою ДБН. Як розрахункові треба приймати деформаційні характеристики, встановлені для ґрунту в природному стані.

5.4. Осідання S_o необхідно визначати за формулою:

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot (\alpha_{0,i-1} + \alpha_{0,i}) \cdot h_i, \quad (1.11)$$

де β – безрозмірний коефіцієнт, що розраховується так:

$$\beta_i = \frac{\varepsilon_{0,i} \cdot (1 - 2 \cdot \nu_i) (3 \cdot \lambda_{m,i} + 2 \cdot G_{m,i})}{\lambda_i + 2 \cdot G_i};$$

де $\varepsilon_{0,i}$ – деформація, зумовлена заморожуванням ґрунтової основи в i -му шарі ґрунту на вертикалі, що проходить через центр підшви фундаменту;

$$G_i = \frac{E_i}{2(1+\nu_i)} \text{ та } \lambda_i = \frac{\nu_i E_i}{(1-2\nu_i)(1+\nu_i)} - \text{константи Ламе } i\text{-го шару ґрунту у}$$

незамерзлому стані;

$$G_{i,m} = \frac{E_{i,m}}{2(1+\nu_{i,m})} \text{ та } \lambda_{i,m} = \frac{\nu_{i,m} \cdot E_{i,m}}{(1-2\nu_{i,m})(1+\nu_{i,m})} - \text{константи Ламе } i\text{-го шару}$$

ґрунту у замерзлому стані;

E_i – модуль загальної деформації i -го шару ґрунту в незамерзлому стані;

$E_{i,m}$ – модуль загальної деформації i -го шару ґрунту в замерзлому стані;

ν_i – коефіцієнт Пуассона i -го шару ґрунту в незамерзлому стані;

$\nu_{i,m}$ – коефіцієнт Пуассона i -го шару ґрунту в замерзлому стані;

h_i – товщина i -го шару ґрунту, приймають не більше від 0,4 ширини фундаменту;

n – кількість шарів, на які поділена товща основи, що стискається;

α_0 – безрозмірний коефіцієнт, який необхідно приймати згідно з табл. 6.2, наведений у роботі [47].

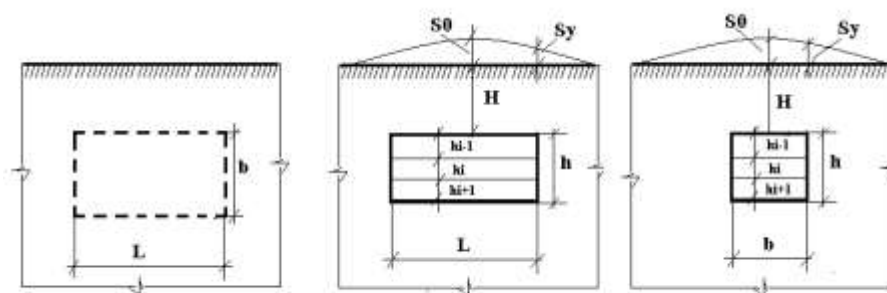


Рис. 1.24. Схема до розрахунку підйому даної поверхні внаслідок заморожування ділянки ґрунту розміром $L \times b \times h$

5.5. Якщо фундамент розташований поза зоною заморожування-розморожування основи, то для визначення його додаткових деформацій потрібно використовувати наведений у [13,14] метод кутових точок.

6. У разі заморожування основи необхідно враховувати зниження коефіцієнта фільтрації, внаслідок чого можливе підняття рівня підземних вод і додаткове обводнення основи.

1.4. Ціль та задачі досліджень.

Наведені вище матеріали досліджень дозволили мені сформулювати мету, об'єкт, предмет, ціль та завдання досліджень.

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

Об'єктом дослідження 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 «грунтова 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.

1.5. Висновки за розділом

Наведені у даному розділі матеріали досліджень дозволили зробити такі висновки:

1. З'явилася високоефективна 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 розміщенню 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.

4. Аналіз присвячених енергетичним палям експериментальних робіт дозволив виявити таке:

4.1. Найбільш негативним чинником при експлуатації енергетичних паль є циклічне замерзання-відтаювання навколо прилеглого до них ґрунту.

У цьому випадку суттєво погіршуються міцнісні та деформаційні властивості основи.

Однак у технічній літературі повністю відсутні дані щодо поведінки ґрунту при температурах, ненабагато вищих від температури замерзання води.

4.2. У присвячених визначенню несучої здатності енергетичних паль при циклічному замерзанню-відтаюванню прилеглого до них ґрунту відсутні роботи, присвячені натурним випробуванням або випробуванням великорозмірних моделей паль.

5. Аналіз присвячених енергетичним палям теоретичних робіт дозволив виявити таке:

5.1. При розрахунку несучої здатності енергетичних паль по ґрунту завжди використовують фізично - лінійний критерій міцності Кулона – Мора [13, 14, 15, 73, 75, 76]. Однак, відомо, що насправді залежність руйнуючого дотичного напруження від вертикального тиску на ґрунт (іноді її називають огинаючою Мора) є нелінійною.

5.2. Сучасні методи розрахунку енергетичних паль за другою групою критичних станів не дозволяють прогнозувати осідання одиночної палі (у наявності є лише метод розрахунку осідань умовного фундаменту із енергетичних паль[47]).

5.3. На сьогодні існує багато методів розрахунку теплових полів одиночних енергетичних паль, однак методи розрахунку теплових полів у кущів та полів в основі фундаментів із теплових паль отримали недостатній розвиток [47].

РОЗДІЛ 2
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИКЛІЧНОГО
ТЕМПЕРАТУРНОГО ВПЛИВУ ТА ЗНАКОЗМІННОГО
ЗАМОРОЖУВАННЯ-РОЗМОРОЖУВАННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ
СУГЛИНИСТОГО ҐРУНТУ.

При взаємодії колекторів теплових насосів із ґрунтовими основами відбувається зміна температури останньої [47, 96-99].

Правила експлуатації теплових насосів у розвинених країнах допускають циклічне заморожування-розморозування їхніх колекторів [51, 47].

Сьогодні у практиці будівництва зазначені явища враховують у таких випадках:

1. Під час визначення деформацій морозного пучення (в умовах України цей вид розрахунку виконують під час визначення глибини закладення підшви фундаменту).

2. У випадку циклічного заморожування-розморозування відбувається погіршення властивостей ґрунту [47, 71, 77]. Це явище враховують під час проектування морських споруд через введення додаткових навантажень і впливів (під час розрахунку напружено-деформованого стану) і знижувальних коефіцієнтів (під час визначення механічних властивостей) [35, 47].

3. У разі циклічного заморожування-розморозування погіршуються властивості бетону. Це явище враховують під час проектування, визначаючи кількість циклів заморожування-розморозування бетону, при цьому його властивості знижуються незначно (морозостійкість) [47, 96].

4. Колектори теплових насосів можуть перебувати нижче від рівня підземних вод, через що заморожування-розморозування проходить за інших умов, ніж це відбувається під час випробувань за стандартною методикою.

Перелічені явища частково було висвітлено у роботах Б. В. Моркляника [47, 79].

Однак у цих роботах недостатньо висвітлено такі аспекти проблеми розрахунку та проектування основ теплових насосів:

1. Незрозуміло, яким чином циклічна зміна температури ґрунту в області позитивних температур впливає на його міцнісні властивості.
2. Неясно, яким чином циклічне заморожування - відтаювання повністю та неповністю водонасиченого ґрунту впливає на його міцнісні властивості.
3. Незрозуміло, яким чином при циклічному заморожуванні – відтаюванні ґрунту слід враховувати фізичну нелінійність його міцності від нормального тиску на ґрунт.
4. Запропонована Б. Моркляником методика корекції міцнісних властивостей ґрунту у процесі його заморожування – відтаювання є евристичною, і потребує уточнення та модифікації.

На розв'язання цих питань і спрямовані викладені у даному розділі матеріали досліджень.

2.1. Визначення нелінійних міцнісних властивостей суглинного ґрунту.

Мета. Відомо, що залежність міцності глинистих ґрунтів в загальному та суглинного ґрунту зокрема від діючого на них вертикального тиску має криволінійний вигляд (їх міцнісні характеристики є фізично нелінійні). При цьому під час прогнозу міцності та стійкості ґрунтових основ і споруд використовують лінійний критерій міцності Кулона - Мора [42, 43, 87, 88].

Це призводить до недостатньо точної оцінки властивостей ґрунтів, що не дозволяє адекватно прогнозувати руйнування та втрату стійкості ґрунтової основи та споруд. При написанні даної роботи нами було поставлено за мету оцінити, наскільки прийнятні для розрахунку фізичної нелінійності суглинних ґрунтів є критерій міцності О. Шашенко та поліноміальний критерій міцності [87, 88].

У відповідності із дослідженнями М. Цитовича до деякого значення вертикального тиску дотична граничних кіл напружень [75-77] має

криволінійний вигляд, що відрізняється від лінійної залежності Кулона – Мора (рис. 2.1). Це, в свою чергу, призводить до завищення утримуючих сил при розрахунку стійкості та міцності ґрунтових основ та споруд.

В результаті аналізу було зроблено висновок про те, що проблема врахування фізичної нелінійності міцнісних властивостей глинистих ґрунтів є актуальною.

Задача досліджень була сформульована таким чином:

1. Відомо експериментальні результати консолидовано – дренажних випробувань суглиністого ґрунту в приладі одноплощинного зсуву.
2. Необхідно:

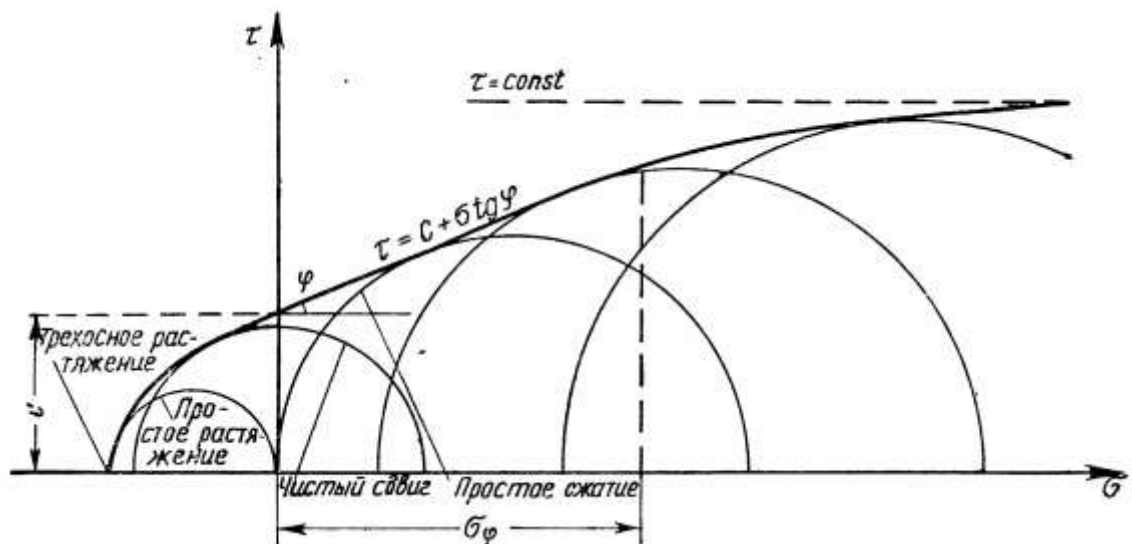


Рис. 2.1. Криві граничних опорів зсуву зв'язних глинистих ґрунтів в умовах відкритої систем (консолидовано – дренажних; дані М. Цитовича).

2.1. Виконати апроксимацію експериментальних даних із використанням лінійної залежності (критерій міцності Кулона – Мора).

2.2. Виконати апроксимацію експериментальних даних із використанням нелінійної залежності (точніше, полінома другого ступеню).

2.3. За допомогою відносної середньоквадратичної похибки виконати оцінку точності апроксимації.

2.4. Виконати екстраполяцію результатів апроксимації в область малих тисків.

Для визначення властивостей ґрунту та його класифікації нами були використані рекомендації [19-24]. Фізичні властивості випробуваного нами суглинку представлені у табл. 2.1.

Міцність ґрунту визначалась згідно з рекомендаціями [19-24].

Результати визначення міцності ґрунту при його природній вологості представлено в табл. 2.2.

Результати випробувань ґрунту із заданою вологістю (тобто при його повному водонасиченні) представлено в табл. 2.3.

Аналіз даних, поданих у табл. 2.1, дозволяє зробити висновок про те, що властивості випробуваного нами суглинистого ґрунту є типовими для даного виду глинистих ґрунтів.

Для визначення матеріальних констант критерію міцності Кулона – Мора, що описується формулою:

$$\tau_k = \sigma \cdot \operatorname{tg}(\varphi_k) + c_k, \quad (2.1)$$

була використана загальноприйнята методика [7]. Тут τ - руйнівне дотичне напруження; σ - вертикальне навантаження на ґрунтовий зразок; φ_k і c_k - матеріальні константи, що підлягають визначенню (відповідно кут внутрішнього тертя та питома зчеплення) критерію міцності Кулона - Мора.

Для визначення матеріальних констант критерію О. Шашенка, який має вигляд:

$$\tau_{ш} = \sqrt{\sigma \cdot \operatorname{tg}(\varphi_{ш}) \cdot c_{ш} + c_{ш}^2}, \quad (2.2)$$

була використана методика [87]. Тут τ - руйнівне дотичне напруження; σ - вертикальне навантаження на ґрунтовий зразок; $\varphi_{ш}$ і $c_{ш}$ - матеріальні константи, що підлягають визначенню (відповідно кут внутрішнього тертя та питома зчеплення) критерія міцності О. Шашенка.

При цьому, для визначення матеріальних констант поліноміального критерію міцності, мною запропоновано в межах певної точки $\sigma = \sigma_0$ на кривій

«руйнівне дотичне напруження – вертикальне навантаження» розкласти залежність $\tau = f(\sigma)$ в ряд Тейлора [36].

Для перших трьох членів ряду отримана таким чином аналітична залежність дотичного напруження від нормального напруження має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \tau_n = f(\sigma) &\approx f(\sigma_0) + \frac{\partial f(\sigma_0)}{\partial \sigma_0} \cdot \frac{(\sigma - \sigma_0)}{1!} + \frac{\partial^2 f(\sigma_0)}{\partial^2 \sigma_0} \cdot \frac{(\sigma - \sigma_0)^2}{2!} = \\ &= a_0 + a_1 \cdot \sigma + a_2 \cdot \sigma^2; \quad a_0 = f(\sigma_0) - \frac{\partial f(\sigma_0)}{\partial \sigma_0} \cdot \sigma_0 + \frac{\partial^2 f(\sigma_0)}{\partial^2 \sigma_0} \cdot \sigma_0^2; \\ a_1 &= \frac{\partial f(\sigma_0)}{\partial \sigma_0} - \frac{\partial^2 f(\sigma_0)}{\partial^2 \sigma_0} \cdot \sigma_0; \quad a_2 = \frac{\partial^2 f(\sigma_0)}{\partial^2 \sigma_0} \cdot \frac{\sigma_0^2}{2}. \end{aligned} \right\}, \quad (2.3)$$

де τ_n - руйнівне дотичне напруження; σ - вертикальне навантаження на ґрунтовий зразок; a_1 , a_2 , і a_3 - матеріальні константи, що підлягають визначенню поліноміального критерію міцності, які необхідно визначати за допомогою методу найменших квадратів [36].

Стало відомо, що розраховані із використанням формул (2.1), (2.2) і (2.3) залежності міцності ґрунту природньої вологості від вертикального навантаження на зразок в рамках критеріїв міцності Кулона – Мора, О. Шашенка та поліноміального критерію міцності мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \tau_k &= 0,0503 + 0,5118 \cdot \sigma; \\ \tau_{ш} &= \sqrt{-0,0187 + 0,2323 \cdot \sigma}; \\ \tau_n &= 0,0334 + 0,6495 \cdot \sigma - 0,1958 \cdot \sigma^2. \end{aligned} \right\}, \quad (2.4)$$

Виявилось, що розраховані із використанням формул (2.1), (2.2) і (2.3) залежності міцності ґрунту заданої вологості (тобто цілком водонасичений) від вертикального навантаження на зразок в рамках критеріїв міцності Кулона – Мора, О. Шашенка та поліноміального критерію міцності мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \tau_k &= 0,0200 + 0,4181 \cdot \sigma; \\ \tau_{ш} &= \sqrt{-0,0137 + 0,1371 \cdot \sigma}; \\ \tau_n &= 0,0036 + 0,5523 \cdot \sigma - 0,1908 \cdot \sigma^2. \end{aligned} \right\}, \quad (2.5)$$

У формулах (2.4) та (2.5): τ_k , $\tau_{ш}$ і τ_n - руйнівні зусилля, які розраховані за допомогою критеріїв міцності Кулона – Мора, О. Шашенка та поліноміального відповідно.

Результати апроксимації залежностей «руйнівне навантаження - вертикальне навантаження на зразок» представлені на рис. 2.2.

Оцінка відповідності критеріїв міцності експериментальним даним було виконано за допомогою формули

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{n} \left(\frac{\tau_{\text{э}} - \tau_p}{\tau_{\text{э}}} \right)^2}, \quad (2.6)$$

де ε - відносна середня квадратична похибка між дослідними ($\tau_{\text{э},i}$) та розрахунковими ($\tau_{p,i}$) значеннями руйнівних дотичних напружень; i - номер досліджу; n - загальна кількість дослідів.

Таблиця 2.1

Фізичні властивості складників ІГЕ-4-а ґрунтів. Суглинки червоно - бурі, місцями сірувато - жовті з прожилками червоно - бурих, в підшві шару записочені з включеннями карбонатів, тверді.

НАЗВА ХАРАКТЕРИСТИКИ	ЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ				
1	2	3	4	5	6
Лабораторний номер	5	6	7	9	13
Виробка та її номер	20	20	20	20	20
Глибина відбору 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

Продовження таблиці 2.1

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 ³	2,68	2,67	2,67	2,68	2,67
Щільність ґрунту, г/см ³	1,75	1,62	1,67	1,92	1,81
Щільність сухого ґрунту г/см ³	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
Недостаток 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 приведені дані, які відповідають природньому, а в знаменнику - заданому стані ґрунту.

Таблиця 2.2

Результати випробувань на приладі одноплощинного зрізу складників
ПЕ-4-а ґрунтів в природньому стані.

Опір зрізу зразка в природному стані в МПа при навантаженні (зсув неконсолідований)				
Вертикальне навантаження σ , МПа	Руйнівне навантаження τ , МПа			
0,100	0,090	0,101	0,119	0,081
0,200	0,153	0,165	0,153	0,143
0,400	0,254	0,281	0,253	0,265
0,600	0,338	0,379	0,348	0,344
Власні значення міцнісних характеристик (стандартна методика; критерій міцності Кулона-Мора)				
Кут внутрішнього тертя φ , градуси	25	28	26	27
Питоме зчеплення c , МПа	0,063	0,058	0,056	0,05

Таблиця 2.3

Результати випробувань на приладі одноплощинного зрізу складників
ІГЕ-4-а ґрунтів в заданому стані.

Опір зрізу зразка в заданому (водонасиченому) стані (зсув неконсолідований)						
Вертикальне навантаження σ , МПа	Руйнівне навантаження τ , МПа					
0,100	0,054	0,052	0,060	0,065	0,055	0,071
0,200	0,108	0,098	0,096	0,103	0,103	0,103
0,400	0,205	0,194	0,185	0,205	0,195	0,198
0,600	0,286	0,264	0,248	0,252	0,273	0,269
Власні значення міцнісних характеристик (стандартна методика; критерій міцності Кулона-Мора)						
Кут внутрішнього тертя φ , градуси	24	23	21	20	23	23
Питоме зчеплення c , МПа	0,022	0,019	0,024	0,038	0,02	0,024

Значення середньоквадратичних відхилень представлені в табл. 2.4.

Виявилось, що в даному випадку найбільш точні результати експерименту отримані за допомогою поліноміального критерію міцності. Результати отримані за допомогою критеріїв міцності Кулона – Мора та О. Шашенка мають меншу точність.

Таблиця 2.4

Відносні розбіжності між розрахунковими та експериментальними даними

№ зп	Назва критерію міцності	Середньоквадратичне відхилення ε , % при стані ґрунту	
		Природний	Заданий
1	Кулона-Мора	9,4	7,6
2	О. Шашенка	16,8	24,1
3	Поліноміальний	8,4	6,8

На основі цього було зроблено висновок про те, що в області зміни експериментальних даних ($\sigma \in \{0,1 \dots 0,6\}$ МПа) більш точним є поліноміальний критерій міцності.

В ході подальшого аналізу нами було виконано співставлення залежностей руйнуючого грунт дотичного напруження, кута внутрішнього тертя, питомого зчеплення від тиску на грунт.

Для визначення «дотичних» кута внутрішнього тертя та питомого зчеплення в точці з поточною координатою « σ » нами були використані формули:

$$\varphi = \arctg \left\{ \frac{\partial \tau}{\partial \sigma} \right\}; \quad c = \tau - \sigma \cdot \frac{\partial \tau}{\partial \sigma}. \quad (2.7)$$

З рис. 2.2 стає відомо, що встановлений в рамках критерію міцності Кулона – Мора кут внутрішнього тертя не залежить від тиску на грунт.

При цьому, розрахований в рамках поліноміального критерію міцності та критерію міцності О. Шашенка «дотичний» кут внутрішнього тертя залежить від нормального тиску на грунт. В даному випадку є чітка тенденція спадного кута внутрішнього тертя та збільшення питомого зчеплення при збільшенні навантаження на грунт.

Слід зауважити, що в розглянутому випадку отримані за допомогою поліноміального критерію міцності результати мають високий ступінь відповідності сучасним поглядам про руйнування ґрунтів при зсуві в області зміни експериментальних даних (тобто при $\sigma \in (0,1 \dots 0,6)$ МПа).

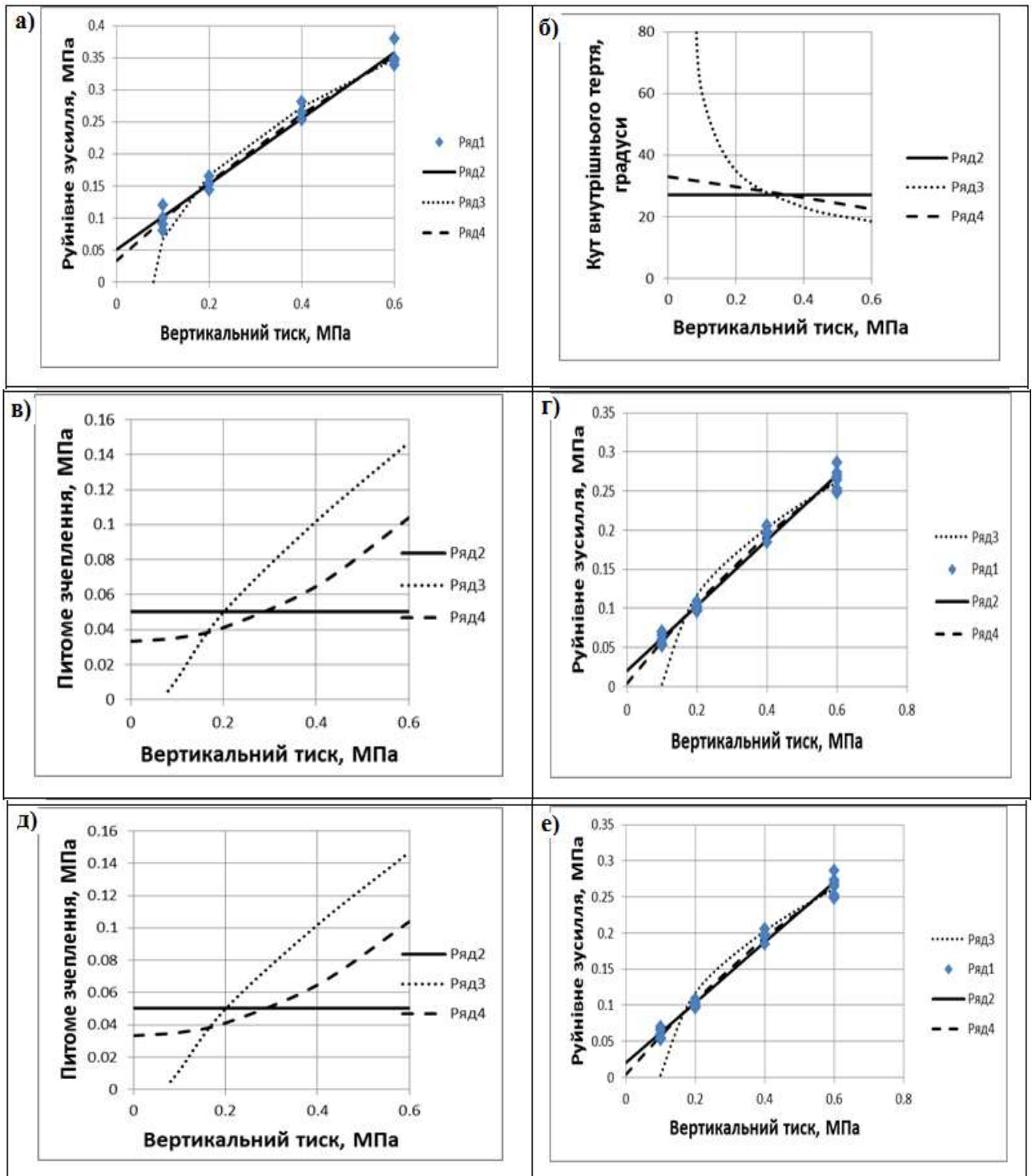


Рис. 2.2. Результати визначення фізичної нелінійності міцнісних характеристик суглинистого ґрунту в природньому (рис. а, б, в) та заданому (рис. г, д, е) стані.

Ряд 1 – дослід; ряд 2 – критерій міцності Кулона – Мора; ряд 3 – критерій міцності О. Шашенка; ряд 4 - поліноміальний критерій міцності.

Висновки. Представлені в роботі матеріали випробувань дозволили зробити такі висновки:

1. Встановлено, що запропонований нами поліноміальний критерій міцності ґрунту цілком може бути використаний для прогнозу міцності суглинистих ґрунтів.

2. Показано, що в області зміни експериментальних даних залежність «руйнівне навантаження - вертикальний тиск на ґрунт», встановлена в рамках поліноміального критерію міцності, більш відповідає досліді, ніж аналогічні залежності, встановлені в рамках критеріїв міцності Кулона – Мора та О. Шашенка.

У цілому, було зроблено висновок про те, що поліноміальний критерій міцності цілком може бути використаний для прогнозу міцності суглинистих ґрунтів.

При цьому для врахування фізичної нелінійності міцності ґрунту також може бути використаний критерій міцності О. Шашенка.

2.2. Вплив циклічного охолодження - нагрівання на міцнісні властивості ґрунту

У цьому підрозділі наведено матеріали – результати експериментів, під час проведення яких було визначено, яким чином циклічне охолодження - нагрівання ґрунту впливає на його міцнісні властивості.

2.2.1. Якісний експеримент

У ході випробувань було визначено міцність ґрунтових зразків із суглинистого ґрунту з природною вологістю. Фізичні властивості ґрунту наведено у таблиці 2.1.

У ході експериментів було використано наступну методику:

1. Спочатку з використанням пробовідбірника добирали зразки природної структури, з яких з використанням ріжучого кільця польової лабораторії Литвинова ПЛЛ 9 компресійного приладу вирізалися ґрунтові зразки з суглинистого ґрунту природної вологості.



Рис. 2.3. Загальний вигляд ґрунтових зразків перед початком випробувань

2. Далі було виконано фотофіксацію зовнішнього вигляду ґрунтових зразків (рис. 2.3).
3. Після цього їх розміщували в посудину з притертою кришкою і витримували в ній зразки ґрунту протягом семи діб при кімнатній температурі.
4. Далі місткість з ґрунтовими зразками розміщували у холодильну камеру і охолоджували до температури $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$. У такому стані їх витримували 1 добу.
5. Після цього місткість із ґрунтовими зразками виймали з холодильної камери і нагрівали до кімнатної температури. У такому стані їх витримували 1 добу.
6. Цикли нагріву – відтаювання повторювались на протязі одного місяця.



Рис. 2.4. Загальний вигляд ґрунтових зразків після завершення випробувань (п'ятнадцять циклів нагріву-охолодження)

7. Після цього виконувалась розгерметизація місткості із ґрунтовими зразками та було зроблено їх повторну фотофіксацію. Ці дані наведено на рис. 2.4.

Співставлення наведених на рис. 2.3 та 2.4 фотографій дозволило встановити, що із зростанням кількості циклів заморожування-розморожування на них не було виявлено видимих оком пошкоджень.

Тому якісний експеримент дав нам змогу зробити висновок, що в цьому разі циклічне нагрівання – охолодження ґрунту не призвело до повного руйнування його структури.

Для більш детального аналізу змін, що відбуваються при циклічному нагріві та охолодженні ґрунту необхідно визначити його міцнісні властивості.

Матеріали цих досліджень подані у підрозділі 2.1.2.

2.2.2. Міцнісні властивості

Випробовуваний ґрунт – суглинок. Властивості ґрунту наведено в табл. 2.1.

Міцність ґрунту визначалася з використанням приладу одноплощинного зсуву.

Випробування та опрацювання експериментальних даних проводили за стандартною методикою, а дренажування – за консолідованою схемою [80, 98, 99, 305].

Попереднє обтиснення ґрунтових зразків виконувалося вертикальними навантаженнями 0,1; 0,20; 0,40 та 0,60 МПа.

Циклічне нагрівання - охолодження виконувалося відповідно до викладеної у підрозділі 2.1.1 методики. Усього було виконано шість циклів випробувань.

При цьому після кожного циклу нагріву – охолодження визначалась міцність чотирьох зразків.

Результати визначення дотичного руйнівного зусилля зразків із природною вологістю наведено у табл. 2.5 та на рис. 2.5.

Для порівняння отриманих при різній кількості температурних циклів даних було використано загальновідомі методи математичної статистики [36].

Задачу випробувань було сформульовано таким чином:

Таблиця 2.5

Результати випробування суглинистого ґрунту з природною вологістю при циклічному нагріві – охолодженні.

№ зп	Верт. тиск на ґрунт, МПа	Руйнівне зусилля в залежності від циклів нагрівання – відтаювання ґрунту, МПа					
		До початку випробувань	1 цикл випробувань	2 цикл випробувань	3 цикл випробувань	4 цикл випробувань	5 цикл випробувань
1	0,1	0,085	0,107	0,119	0,078	0,103	0,089
2	0,2	0,137	0,159	0,152	0,150	0,151	0,163
3	0,4	0,271	0,278	0,251	0,261	0,281	0,245
4	0,6	0,375	0,352	0,301	0,332	0,311	0,311

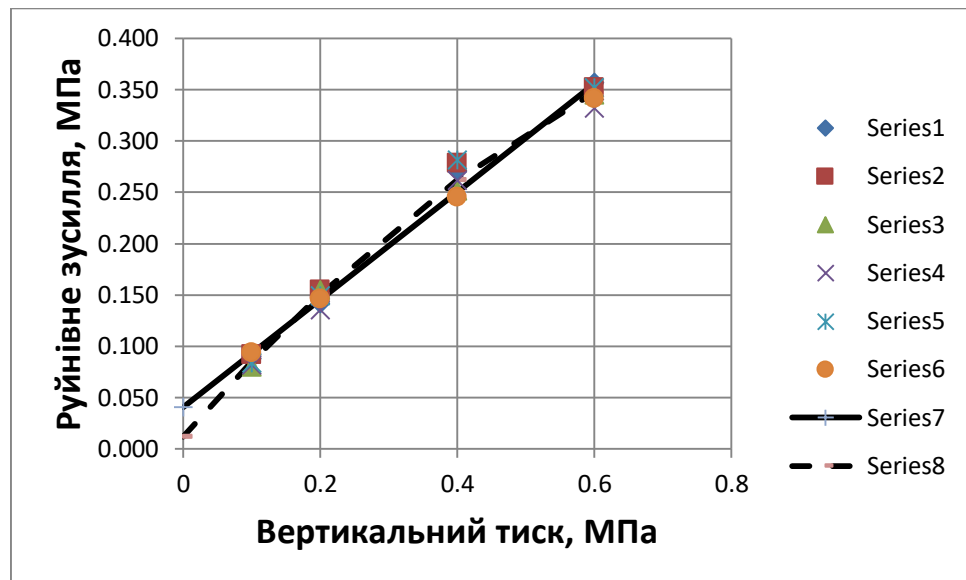


Рис. 2.5. Вплив періодичного нагріву – охолодження на міцність суглинистого ґрунту з природною вологістю. Ряд 1 – міцність ґрунту у природному стані; ряд 2 – те ж саме, після 1 – го циклу нагріву – охолодження; ряд 3 – те ж саме, після 2 – го циклу нагріву – охолодження; ряд 4 – те ж саме, після 3 – го циклу нагріву – охолодження; ряд 5 – те ж саме, після 4 – го циклу нагріву – охолодження; ряд 6 – те ж саме, після 5 – го циклу нагріву – охолодження; ряд 7 – крива міцності Кулона – Мора; ряд 9- поліноміальний критерій міцності.

1. Значення руйнівного зусилля ґрунту, що встановлені до початку випробувань на циклічний нагрів – охолодження, приймалось за еталон.

2. Далі з використанням формули

$$\varepsilon_{abs} = \left| \frac{\tau_0 - \tau_i}{\tau_0} \right| \cdot 100\% , \quad (2.8)$$

де τ_0 - руйнівне зусилля для ґрунту у природному стані; τ_i - те ж саме, після τ_i циклів нагрівання – охолодження. Ці дані наведено у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6

Значення параметру ε_{abs} в залежності від кількості циклів нагрівання – охолодження ґрунту.

J	Верт. тиск на ґрунт, МПа	Значення параметру $\varepsilon_{abs} = \left \frac{\tau_0 - \tau_i}{\tau_0} \right \cdot 100\%$ в залежності від кількості циклів нагрівання – охолодження ґрунту, %					
		До початку випробувань	1 цикл випробувань	2 цикл випробувань	3 цикл випробувань	4 цикл випробувань	5 цикл випробувань
1	0,1	0.0	4.5	9.1	6.8	4.5	6.3
2	0,2	0.0	9.2	8.8	4.5	4.9	2.7
3	0,4	0.0	2.7	7.3	3.6	3.8	9.6
4	0,6	0.0	1.4	3.4	7.0	1.4	4.5

3. Далі з використанням формули

$$\sigma_{a,i} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left(\frac{\tau_{0,j} - \tau_{i,j}}{\tau_{0,j}} \right)^2} \cdot 100\% \quad (2.9)$$

було визначено середнє квадратичне відхилення відносних середньоквадратичних відхилень руйнівних зусиль ґрунтових зразків, визначених при циклічному нагріві – охолодженні, від руйнівних зусиль для ґрунту, що знаходиться у природному стані. Тут: $\sigma_{a,i}$ - відносне середнє квадратичне відхилення значень руйнуючих зусиль $\tau_{i,j}$, отриманих для i - того циклу нагріву - відтаювання ґрунту від руйнуючих зусиль $\tau_{0,j}$, отриманих для ґрунту, що знаходиться у природному стані; $j \in (1, \dots, 4)$ - номер вертикального навантаження на ґрунт; m - кількість вертикальних навантажень.

Ці дані наведені у табл. 2.7 та на рис. 2.6.

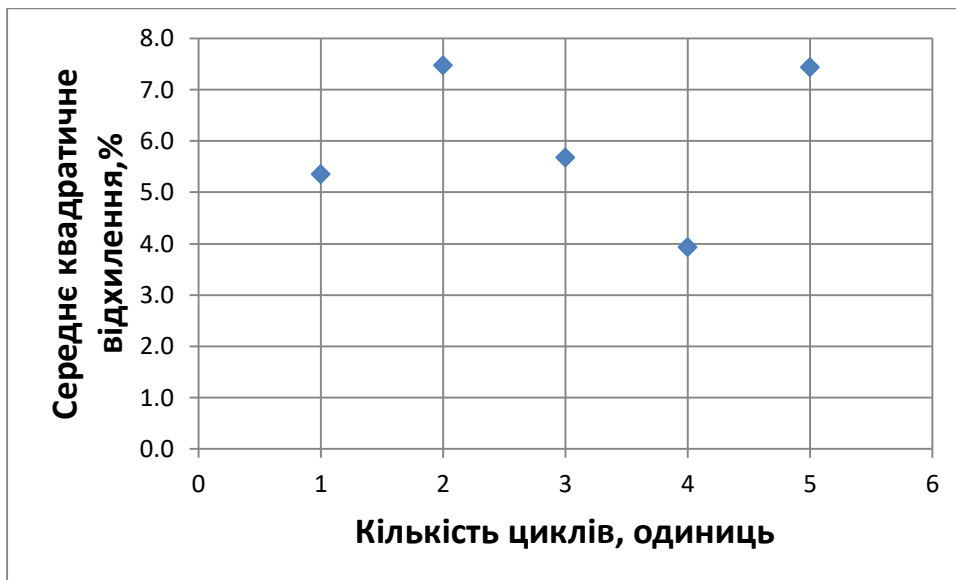


Рис. 2.6. Розбіжність між опором зрушенню ґрунту у природному стані та після температурного впливу

Таблиця 2.7

Результати випробування суглинистого ґрунту при циклічному нагріванні – охолодженні з природною вологістю. Середнє квадратичне відхилення.

Номер циклу нагріву - охолодження	1	2	3	4	5
Середнє квадратичне відхилення, %	5,3	7,5	5,7	3,9	6,3

Аналіз наведених на рис. 2.5 та 2.6, а також у табл. 2.6 та 2.7 даних дозволив нам зробити висновок про те, що циклічний нагрів та охолодження ґрунту не впливає на його міцність. Про це свідчить розбіжність наведених у таблицях та рис. 2.6 даних.

Аналогічні дослідження було виконано для повністю водонасиченого суглинистого ґрунту (рис. 2.7 та 2.8), а також у табл. 2.8, 2.9 та 2.10.

Таблиця 2.8

Результати випробування міцності повністю водонасиченого суглинистого ґрунту при циклічному нагріві – охолодженні.

№ зп	Верт. тиск на ґрунт, МПа	Руйнівне зусилля в залежності від циклів нагрівання – відтаювання ґрунту, МПа					
		До початку випробувань	1 цикл випробувань	2 цикл випробувань	3 цикл випробувань	4 цикл випробувань	5 цикл випробувань
1	0,1	0,051	0,048	0,061	0,058	0,052	0,055
2	0,2	0,097	0,099	0,097	0,103	0,100	0,098
3	0,4	0,194	0,207	0,185	0,180	0,193	0,178
4	0,6	0,250	0,247	0,249	0,229	0,236	0,258

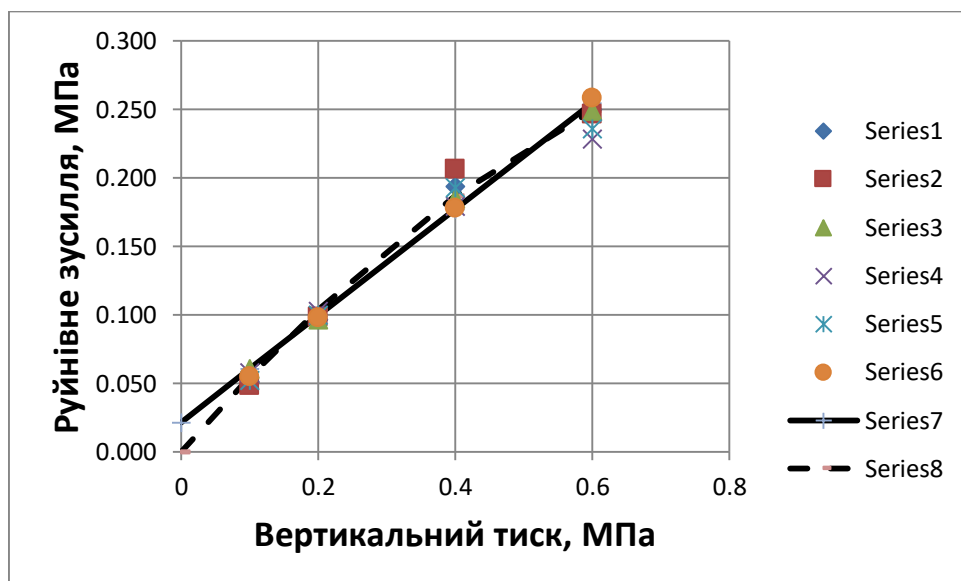


Рис. 2.7. Вплив періодичного нагріву – охолодження на міцність повністю водонасиченого суглинистого ґрунту. Ряд 1 – міцність ґрунту у природному стані; ряд 2 – те ж саме, після 1 – го циклу нагріву – охолодження; ряд 3 – те ж саме, після 2 – го циклу нагріву – охолодження; ряд 4 – те ж саме, після 3 – го циклу нагріву – охолодження; ряд 5 – те ж саме, після 4 – го циклу нагріву – охолодження; ряд 6 – те ж саме, після 5 – го циклу нагріву – охолодження; ряд 7 – крива міцності Кулона – Мора; ряд 9- поліноміальний критерій міцності.

Таблиця 2.9

Значення параметру ε_{abs} в залежності від кількості циклів нагрівання – охолодження ґрунту.

<i>J</i>	Верт. тиск на ґрунт, МПа	Значення параметру $\varepsilon_{abs} = \left \frac{\tau_0 - \tau_i}{\tau_0} \right \cdot 100\%$ в залежності від кількості циклів нагрівання – охолодження ґрунту, %					
		До початку випробувань	1 цикл випробувань	2 цикл випробувань	3 цикл випробувань	4 цикл випробувань	5 цикл випробувань
1	0,1	0	5,0	18,8	13,2	2,3	8,4
2	0,2	0	1,7	0,2	5,8	3,0	1,1
3	0,4	0,0	5,1	15,1	17,6	11,4	18,3
4	0,6	0,0	9,5	8,8	16,2	13,5	5,4

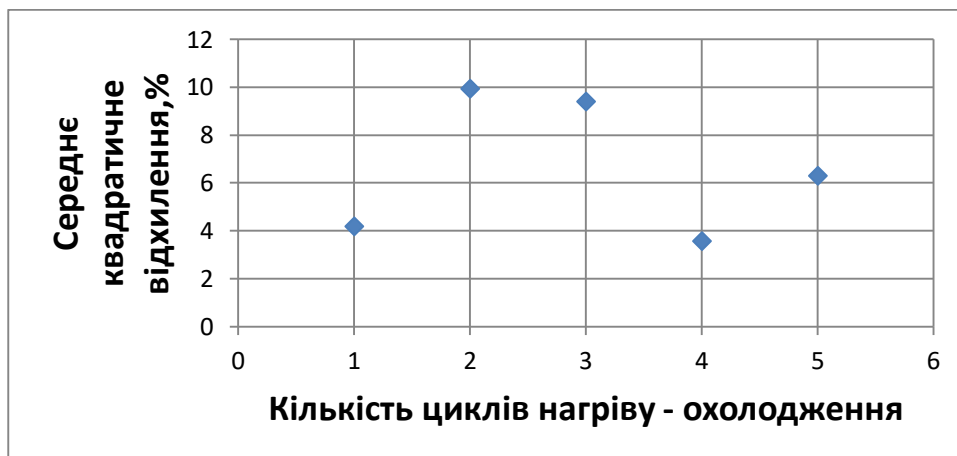


Рис. 2.8. Розбіжність між опором зрушенню повністю водонасиченого ґрунту у природному стані та після температурного впливу

Таблиця 2.10

Результати випробування повністю водонасиченого суглинистого ґрунту при циклічному нагріві – охолодженні. Середнє квадратичне відхилення.

Номер циклу нагріву - охолодження	1	2	3	4	5
Середнє квадратичне відхилення, %	4,2	9,9	9,4	3,6	6,3

Аналіз наведених на рис. 2.7 та 2.8, а також у табл. 2.9 та 2.10 даних дозволив нам зробити висновок про те, що циклічний нагрів та охолодження повністю водонасиченого ґрунту не впливає на його міцність. Про це свідчить розбіжність наведених у таблицях та рис. 2.10 даних.

2.3. Вплив циклічного заморожування-відтаювання на міцнісні властивості суглинистого ґрунту

У цьому підрозділі наведено матеріали – результати експериментів, під час проведення яких було визначено, яким чином циклічне заморожування - відтаювання ґрунту впливає на його міцнісні властивості.

У ході випробувань нами було використано методику Б. В. Моркляника [47].

Для аналізу результатів випробувань нами було використано наведену у підрозділі 2.2 методику.

Для визначення закономірностей зміни міцності ґрунту було розроблено спеціальну методику, суть якої полягає у наступному:

1. Результати визначення міцності ґрунту слід розбити на дві групи. До першої групи слід віднести міцність, визначену до впливу на ґрунт у вигляді заморожування – відтаювання. У подальшому цю міцність будемо називати початковою та позначати $\tau_{0,i}$; тут i - номер ступеню вертикального навантаження, при якому було визначено міцність $\tau_{0,i}$.

До другої групи слід віднести міцність, визначену після впливу на ґрунт в вигляді заморожування – відтаювання. У подальшому цю міцність будемо називати початковою та позначати $\tau_{n,i}$; тут i - номер ступеню вертикального навантаження, при якому було визначено міцність $\tau_{n,i}$, а n - номер циклу заморожування - відтаювання.

2. Далі для кожного із значень вертикального навантаження на ґрунт слід знайти відношення міцності, встановленої після проектної кількості

заморожування – відтаювання, до початкової. В подальшому цю характеристику будемо називати відносною міцністю та позначати $\tau_{n,i}^*$. Для цього слід використовувати таку формулу:

$$\tau_{n,i}^* = \frac{\tau_{n,i}}{\tau_{0,i}}, \quad (2.10)$$

3. Після цього слід знайти середнє значення (тобто стандарт) $k(n)$ для відносних міцностей:

$$k_n = \sum_{i=1}^{in} \tau_{n,i}^* = \sum_{i=1}^{in} \frac{\tau_{n,i}}{\tau_{0,i}}. \quad (2.11)$$

Тут in - кількість значень вертикального тиску, для яких визначалась міцність ґрунту після n - ого циклу заморожування – відтаювання.

4. Після цього з використанням відомих методів математичної статистики [36], слід знайти залежність відносної міцності від кількості циклів заморожування – відтаювання $k(n)$.

Кут внутрішнього тертя φ та пито́ме зчеплення c визначаються як параметри лінійної залежності:

$$K = n \cdot a + b. \quad (2.12)$$

Нормативні значення параметрів a та b обчислювалися за формулами:

$$\left. \begin{aligned} \Delta &= m \cdot \sum_{n=1}^m n^2 - \left(\sum_{n=1}^m n \right)^2; \\ b &= \left(\sum_{n=1}^m k_n \cdot \sum_{n=1}^m n^2 - \sum_{n=1}^m n \cdot \sum_{n=1}^m k_n \cdot n \right) / \Delta; \\ a &= \left(m \cdot \sum_{n=1}^m k_n \cdot n - \sum_{n=1}^m k_n \cdot \sum_{n=1}^m n \right) / \Delta \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

Тут $n = 1, 2, 3$ – номер випробування, а m – кількість випробувань.

5. Для прогнозу міцності ґрунту після n циклів заморожування – відтаювання слід використовувати формулу:

$$\tau_{n,i} = K \cdot \tau_{0,i}. \quad (2.14)$$

2.3.1. Визначення міцнісних властивостей ґрунту з природною вологістю.

Нижче наведено результати досліджень міцності ґрунту з природною вологістю при його циклічному замерзанні – відтаюванні.

У табл. 2.11 наведено результати визначення міцності ґрунту, отримані у ході його циклічного заморожування – відтаювання.

У графічній формі ці дані наведено на рис. 2.9.

Таблиця 2.11

Результати випробування міцності суглинистого ґрунту з природною вологістю при його циклічному замерзанні – відтаюванні

№ зп	Верт. тиск на ґрунт, МПа	Руйнівне зусилля в залежності від циклів нагрівання – відтаювання ґрунту, МПа					
		До початку випробувань	1 цикл випробувань	2 цикл випробувань	3 цикл випробувань	4 цикл випробувань	5 цикл випробувань
1	0,1	0,088	0,087	0,086	0,085	0,086	0,082
2	0,2	0,142	0,139	0,138	0,136	0,142	0,132
3	0,4	0,271	0,263	0,260	0,257	0,249	0,249
4	0,6	0,357	0,343	0,340	0,336	0,321	0,360

У таблиці 2.12 наведено результати визначення абсолютної розбіжності між міцностями немерзлого ґрунту та міцності ґрунту, отримані у ході його циклічного заморожування – відтаювання (формула (2.8)).

При цьому, на рис. 2.10 наведено розраховану з використанням формули (2.9) розбіжність між опором зрушенню суглинистого ґрунту з природною вологістю до та після циклічного заморожування – відтаювання.

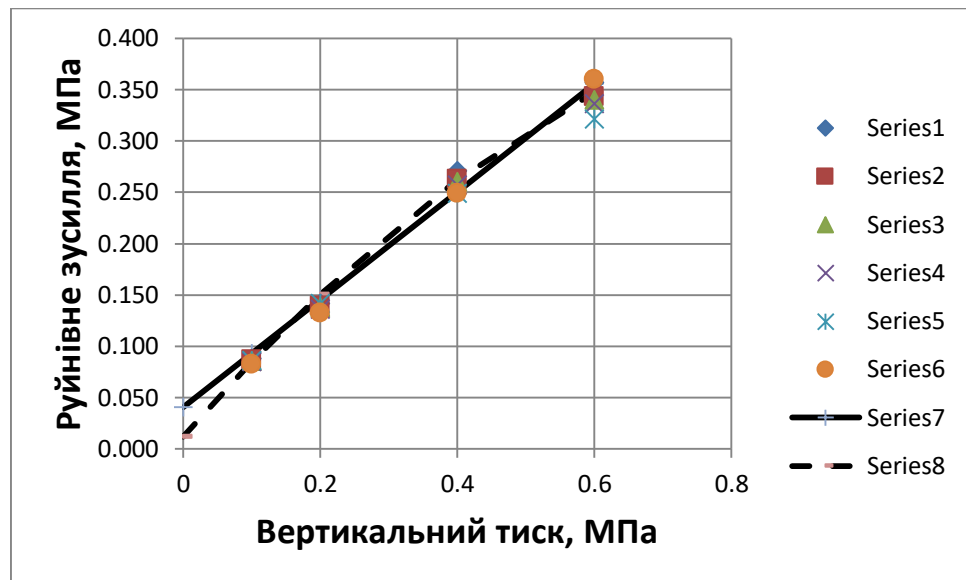


Рис. 2.9. Вплив періодичного замерзання – відтаювання на міцність суглинистого ґрунту з природною вологістю. Ряд 1 – міцність ґрунту у природному стані; ряд 2 – те ж саме, після 1 – го циклу нагріву – охолодження; ряд 3 – те ж саме, після 2 – го циклу нагріву – охолодження; ряд 4 – те ж саме, після 3 – го циклу нагріву – охолодження; ряд 5 – те ж саме, після 4 – го циклу нагріву – охолодження; ряд 6 – те ж саме, після 5 – го циклу нагріву – охолодження; ряд 7 – крива міцності Кулона – Мора; ряд 9- поліноміальний критерій міцності.

Таблиця 2.12

Значення параметру ε_{abs} в залежності від кількості циклів заморожування - відтаювання ґрунту

J	Верт. тиск на ґрунт, МПа	Значення параметру $\varepsilon_{abs} = \left \frac{\tau_0 - \tau_i}{\tau_0} \right \cdot 100\%$ в залежності від кількості циклів заморожування - відтаювання ґрунту, %					
		До початку випробувань	1 цикл випробувань	2 цикл випробувань	3 цикл випробувань	4 цикл випробувань	5 цикл випробувань
1	0,1	0,0	1,5	2,5	3,5	2,3	6,5

Продовження таблиці 2.12

<i>J</i>	Верт. тиск на грунт, МПа	Значення параметру $\varepsilon_{abs} = \left \frac{\tau_0 - \tau_i}{\tau_0} \right \cdot 100\%$ в залежності від кількості циклів заморожування - відтаювання ґрунту, %					
		До початку випробувань	1 цикл випробу вань	2 цикл випробу вань	3 цикл випробу вань	4 цикл випробу вань	5 цикл випробу вань
2	0,2	0,0	2,0	3,0	4,0	0,2	7,0
3	0,4	0,0	3,0	4,0	5,0	8,1	8,0
4	0,6	0,0	3,8	4,8	5,8	10,0	0,8

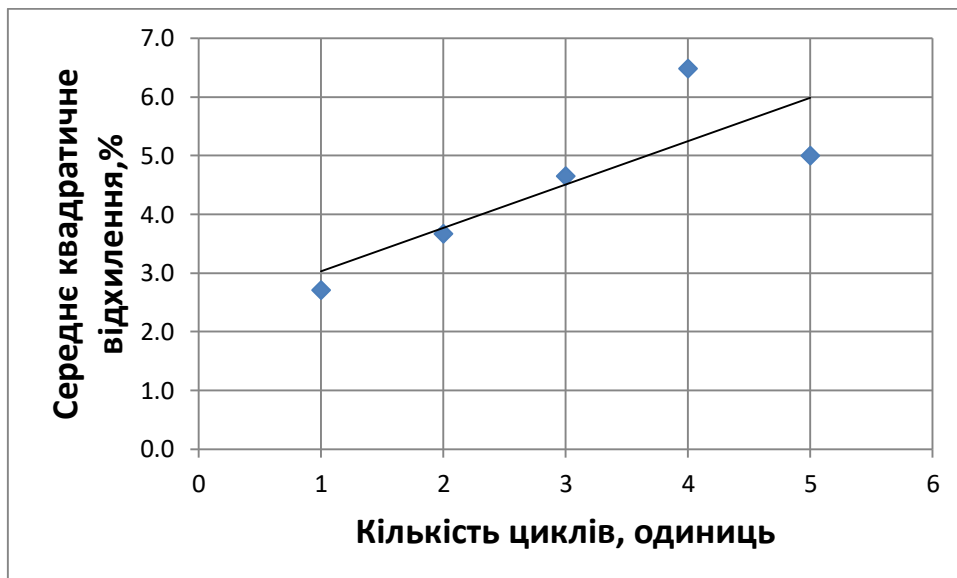


Рис. 2.10. Розбіжність між опором зрушенню суглинистого ґрунту з природною вологістю до та після циклічного заморожування - відтаювання

Таблиця 2.13

Результати випробування суглинистого ґрунту з природною вологістю при циклічному заморожуванні - відтаюванні. Середнє квадратичне відхилення.

Номер циклу нагріву - охолодження	1	2	3	4	5
Середнє квадратичне відхилення, %	4,2	9,9	9,4	3,6	6,3

Крім того, у табл. 2.13 ці дані наведено у табличній формі.

Аналіз наведених на рис. 2.10 і табл. 2.13 даних дозволив нам зробити висновок про те, що є наявним стабільне зростання середнього квадратичного відхилення встановленої при циклічному заморожуванні та відтаюванні ґрунту міцності від початкової. Про це також свідчить лінія тренду.

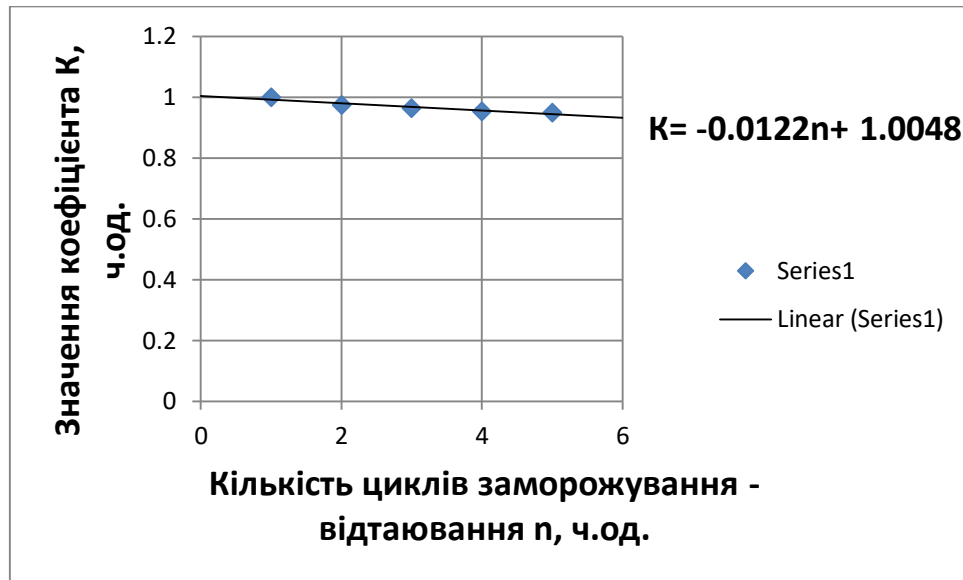


Рис. 2.11. Залежність коефіцієнта зниження міцності ґрунту K від кількості циклів замерзання – відтаювання ґрунту.

На рис. 2.11. наведено залежність коефіцієнта зниження міцності ґрунту K від кількості циклів замерзання – відтаювання ґрунту. Із рисунку випливає, що ця залежність має вигляд спадної функції, яка у аналітичній формі описується формулою:

$$K = 1,0048 - 0,0122 \cdot n. \quad (2.15)$$

Із формули (2.15) випливає, що у даному конкретному випадку міцність ґрунту знижується у середньому приблизно на один відсоток після кожного циклу замерзання – відтаювання.

2.3.2. Визначення міцнісних властивостей повністю водонасиченого ґрунту.

Нижче наведено результати досліджень міцності ґрунту з природною вологістю при його циклічному замерзанні – відтаюванні.

У табл. 2.14 наведено результати визначення міцності ґрунту, отримані у ході його циклічного заморожування – відтаювання.

У графічній формі ці дані наведено на рис. 2.12.

Таблиця 2.14

Результати випробування міцності повністю водонасиченого суглинистого ґрунту при його циклічному замерзанні – відтаюванні

№ зп	Верт. тиск на ґрунт, МПа	Руйнівне зусилля в залежності від циклів нагрівання – відтаювання ґрунту, МПа					
		До початку випробувань	1 цикл випробувань	2 цикл випробувань	3 цикл випробувань	4 цикл випробувань	5 цикл випробувань
1	0,1	0,054	0,053	0,052	0,051	0,050	0,048
2	0,2	0,108	0,105	0,104	0,102	0,102	0,096
3	0,4	0,182	0,175	0,173	0,169	0,158	0,160
4	0,6	0,246	0,234	0,232	0,227	0,209	0,214

У таблиці 2.15 наведено результати визначення абсолютної розбіжності між міцностями немерзлого ґрунту та міцності ґрунту, отримані у ході його циклічного заморожування – відтаювання (формула (2.8)).

При цьому, на рис. 2.13 наведено розраховану з використанням формули (2.9) розбіжність між опором зрушенню повністю водонасиченого суглинистого ґрунту до та після циклічного заморожування - відтаювання

Крім того, у таблиці 2.16 наведено ці дані.

Аналіз наведених на рис. 2.13 і табл. 2.16 даних дозволив нам зробити висновок про те, що є наявним стабільне зростання середнього квадратичного відхилення встановленої при циклічному заморожуванні та відтаюванні ґрунту міцності від початкової. Про це також свідчить лінія тренду.

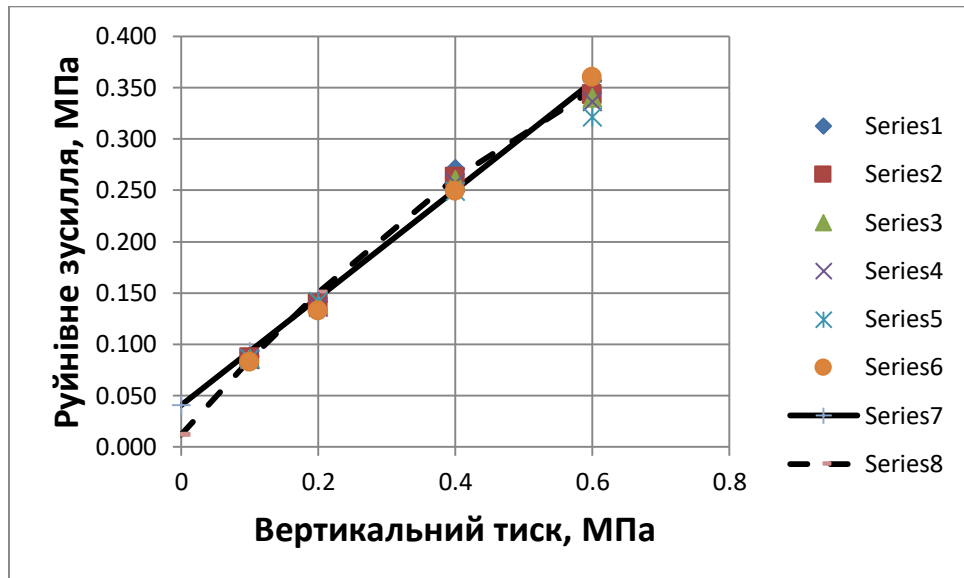


Рис. 2.12. Вплив періодичного замерзання – відтаювання на міцність повністю водонасиченого суглинистого ґрунту. Ряд 1 – міцність ґрунту у природному стані; ряд 2 – те ж саме, після 1 – го циклу нагріву – охолодження; ряд 3 – те ж саме, після 2 – го циклу нагріву – охолодження; ряд 4 – те ж саме, після 3 – го циклу нагріву – охолодження; ряд 5 – те ж саме, після 4 – го циклу нагріву – охолодження; ряд 6 – те ж саме, після 5 – го циклу нагріву – охолодження; ряд 7 – крива міцності Кулона – Мора; ряд 9- поліноміальний критерій міцності.

Таблиця 2.15

Значення параметру ε_{abs} в залежності від кількості циклів заморожування - відтаювання ґрунту

J	Верт. тиск на ґрунт, МПа	Значення параметру $\varepsilon_{abs} = \left \frac{\tau_0 - \tau_i}{\tau_0} \right \cdot 100\%$ в залежності від кількості циклів заморожування - відтаювання ґрунту, %					
		До початку випробувань	1 цикл випробувань	2 цикл випробувань	3 цикл випробувань	4 цикл випробувань	5 цикл випробувань
1	0,1	0,0	2,5	3,5	5,5	7,3	10,5

Продовження таблиці 2.15

<i>J</i>	Верт. тиск на ґрунт, МПа	Значення параметру $\varepsilon_{abs} = \left \frac{\tau_0 - \tau_i}{\tau_0} \right \cdot 100\%$ в залежності від кількості циклів заморожування - відтаювання ґрунту, %					
		До початку випробувань	1 цикл випробу- вань	2 цикл випробу- вань	3 цикл випробу- вань	4 цикл випробу- вань	5 цикл випробу- вань
2	0,2	0,0	3,0	4,0	6,0	5,2	11,0
3	0,4	0,0	3,9	4,9	6,9	13,0	11,9
4	0,6	0,0	4,8	5,8	7,8	15,0	12,8

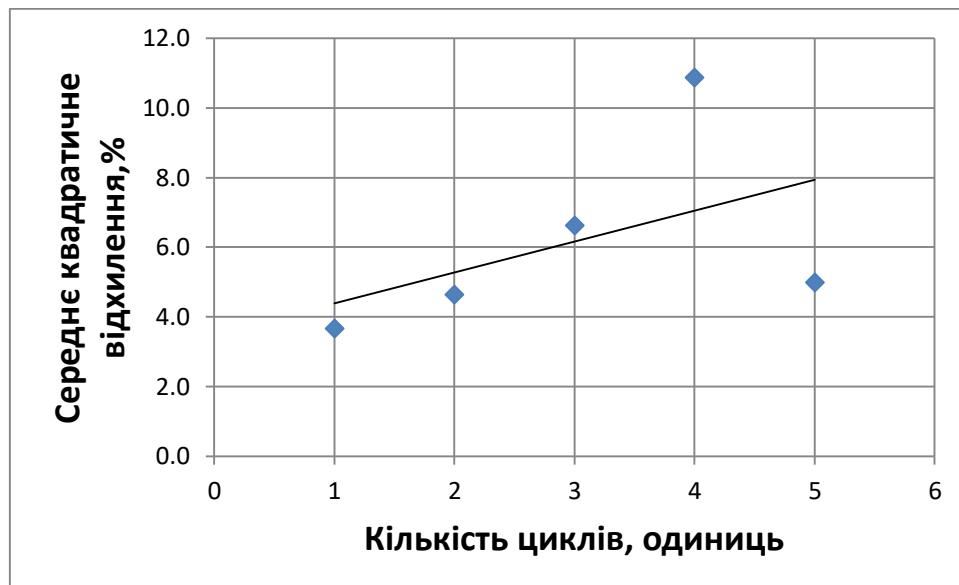


Рис. 2.13. Розбіжність між опором зрушенню повністю водонасиченого суглинистого ґрунту до та після циклічного заморожування - відтаювання

Таблиця 2.16

Результати випробування повністю водонасиченого суглинистого ґрунту при циклічному заморожуванні - відтаюванні. Середнє квадратичне відхилення.

Номер циклу нагріву - охолодження	1	2	3	4	5
Середнє квадратичне відхилення, %	3,7	4,7	6,6	10,9	5,0

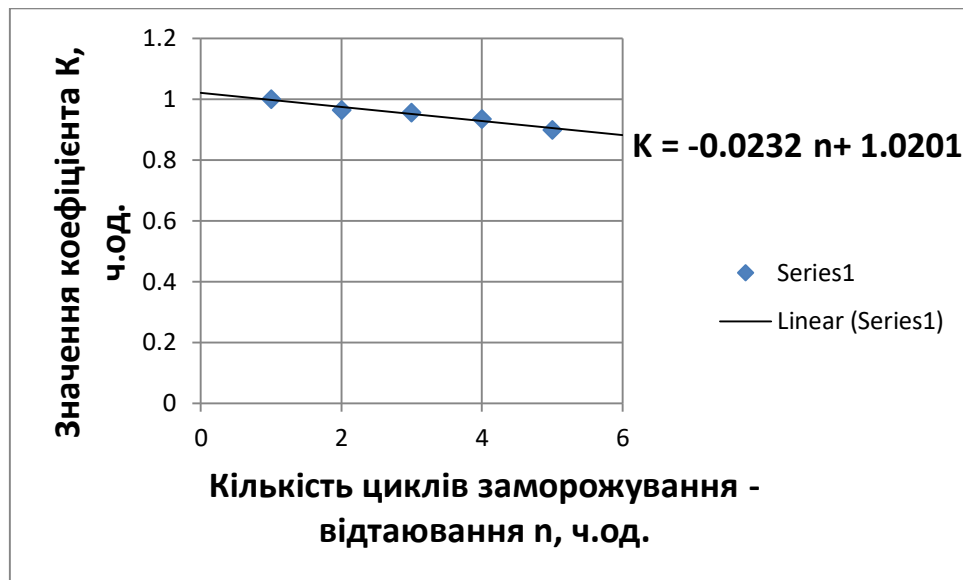


Рис. 2.14. Залежність коефіцієнта зниження міцності повністю водонасиченого ґрунту K від кількості циклів замерзання – відтаювання.

На рис. 2.14. наведено залежність коефіцієнта зниження міцності ґрунту K від кількості циклів замерзання – відтаювання ґрунту. Із рисунку видно, що ця залежність має вигляд спадної функції, яка у аналітичній формі описується формулою:

$$K = 1,0201 - 0,0232 \cdot n. \quad (2.16)$$

Із формули (2.16) випливає, що у даному конкретному випадку міцність ґрунту знижується у середньому приблизно на два з половиною відсотки після кожного циклу замерзання – відтаювання.

2.4. Висновки за розділом 2.

Наведені в цьому розділі матеріали досліджень дали нам змогу зробити наступні висновки:

1. Якщо температура ґрунту не знижується нижче нуля градусів за шкалою Цельсія, її циклічна зміна не призводить до суттєвої зміни його міцнісних властивостей. При цьому ступінь водонасичення ґрунту майже не має значення.

2. Циклічне заморожування-розморожування ґрунту суттєво погіршує його міцнісні властивості. При цьому чим вища ступінь вологості ґрунту, тим сильніше знижується його міцність.

3. Показано, що врахування нелінійності міцнісних властивостей ґрунту дозволяє суттєво підвищити точність апроксимації залежності руйнівного зусилля від нормального тиску. Встановлено, що для цієї цілі найбільш придатним є поліном другого ступеню.

4. Розроблено методику визначення функціонального зниження міцності ґрунту від кількості циклів його заморожування – розморожування.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИКЛІЧНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ВПЛИВУ ТА ЗНАКОЗМІННОГО ЗАМОРОЖУВАННЯ-РОЗМОРОЖУВАННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ СУГЛИНИСТОГО ҐРУНТУ.

При взаємодії колекторів теплових насосів із основами відбувається зміна температури основи [40, 41, 47, 81, 92].

Раніше (розділ 2) було встановлено: якщо температура ґрунту не опускається нижче +2 градусів за Цельсієм, її вплив на міцність ґрунту є незначним.

Правила експлуатації теплових насосів у розвинених країнах допускають циклічне заморожування-розморозжування їхніх колекторів [51, 47]. Як це було встановлено удругому розділі, циклічне заморожування – відтаювання ґрунту суттєво впливає на міцнісні властивості ґрунту. Це, у свою чергу, впливає на несучу властивість одиночних паль.

Найбільш повні дослідження несучої здатності паль при циклічному замерзанні – відтаюванні були проведені Б. В. Моркляником [47]. Однак, при цьому можна мати зауваження, яке полягає у тому, що ним було випробувано моделі паль лише довжиною 250 мм та діаметром 24 мм.

Оскільки ці розміри є значно меншими за фактичні розміри паль, існує проблема підтвердження (або спростування) отриманих автором [47] результатів.

Тому при проведенні викладених у даному розділі досліджень стояло завдання виконати натурні випробування великорозмірних моделей паль при циклічному заморожуванні – відтаюванні основи та визначенні на цій основі закономірностей змін несучої здатності паль.

Матеріали досліджень викладено у такій послідовності:

1. Спочатку було розглянуто та проаналізовано різні способи визначення несучої здатності паль у польових умовах, і на цій основі визначено прийнятний для проведення досліджень спосіб. Ці дані наведено у розділі 3.1.

2. Після цього було розроблено устаткування та методику проведення експериментів. Ці матеріали викладено у розділі 3.2.

3. Нарешті, у розділі 3.3 наведено результати експериментів та аналіз їх результатів.

3.1. Сучасні методи визначення несучої здатності паль.

Згідно із діючими на сьогоднішній день на території України будівельними нормами, несучу здатність паль слід визначати:

- розрахунковим шляхом;
- з використанням результатів польових випробувань інвентарних моделей паль;
- шляхом натурних випробувань.

При проведенні польових і натурних випробувань паль необхідно керуватися рекомендаціями ДСТУ Б.В.2.1-27, ДСТУ Б В.2.1-1(ГОСТ 5686-99) і ДСТУ Б В.2.1-9.

Аналіз присвячених випробуванням паль нормативних документів дозволив нам зробити такі висновки:

1. Діючі в Україні нормативні документи та дані провідних вчених [13, 14, 15, 73] не містять рекомендацій щодо врахування впливу температури на будівельні конструкції і основи в тому випадку, коли відстань між деформаційними швами в будинку (споруді) не перевищує обумовлених будівельними нормами розмірів

При цьому, в [13, 14, 15, 16] не розглядаються такі важливі для розрахунку і проектування енергетичних паль питання, як:

- температурні деформації матеріалу паль і основи;

- можливість морозного здимання ґрунту, нижчого від глибини сезонного промерзання ґрунту.

2. Діючі в Україні нормативні документи [13, 14, 15, 16, 73] крім встановлених у них фізичних характеристик, таких як характеристик міцності і характеристик деформативності, допускають визначення додаткових властивостей основи, необхідних для врахування впливу на міцність і деформації ґрунту, не обумовлених в ДБН факторів. На наш погляд, це положення слід використовувати при врахуванні впливу теплових насосів на ґрунтові основи.

У даний час найбільш розповсюдженими є динамічний спосіб визначення несучої здатності паль та спосіб визначення несучої здатності паль статичними навантаженнями.

Методика випробування паль динамічними навантаженнями полягає у наступному:

1. По голові палі наносять обумовлену програмою випробувань кількість ударів, яку називають залогом. Зазвичай, ця кількість ударів складає від 1 до 10.

2. Далі вимірюють вертикальне переміщення палі відносно основи. Цю характеристику називають відмовою.

3. Якщо це можливо, після кожного удару молота визначають відстань його відскоку вгору після кожного удару.

4. Далі, несуча здатність палі визначається з використанням залежності виду:

$$F_u = \frac{\eta AM}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{4E_d}{\eta A s_a}} \times \frac{g_i + \varepsilon^2 (q_2 + q_3)}{q_1 + q_2 + q_3} - 1 \right], \quad (3.1)$$

де η - коефіцієнт, що залежить від пружних властивостей матеріалу паль, що приймається для залізобетонних паль $\eta = 1500$ кПа, для дерев'яних паль $\eta = 1000$ кПа; A - площа поперечного перерізу паль, м²; M - коефіцієнт, що враховує спосіб занурення паль: для забивних паль $M = 1$; E_d - розрахункова енергія удару молота, кН·м: для молота одиночної дії $E_d = GH$, для дизель-молотів від 0,9 до 0,4 GH; q_1 - повна вага молота або віброзанурювача, кН; ε -

коефіцієнт (при забиванні залізобетонних паль із застосуванням наголівника з дерев'яною вкладкою $\varepsilon_2 = 0,2$); q_2 - вага палі з наголовником, кН; q_3 - вага підбабка, кН.

Щодо динамічного способу випробування можна мати такі зауваження:

1. У нормативній літературі розглядаються лише залізобетонні та дерев'яні палі.

2. У формулу 3.1 входять емпіричні усереднені параметри.

Далі розглянемо статичний спосіб визначення несучої здатності паль.

Суть методу полягає у ступеневому прикладенні навантажень до голови палі та визначенні по діаграмі «навантаження – осідання» характерної точки на осі навантажень, яку і вважають несучою властивістю $F_{d,i}$. Тут i - номер випробування.

Якщо число паль менше 6, то за нормативну несучу властивість палі приймають найменше із значень несучих властивостей, тобто:

$$F_{dm} = \min(F_{d,i}, i = 1..n), \quad (3.2)$$

де n – кількість випробуваних паль.

Якщо число паль дорівнює або є більшим за 6, то нормативну несучу здатність палі розраховують з використанням методів математичної статистики за викладеною у ДБН методикою [24].

Для визначення несучої здатності за результатами статичних випробувань використовують формулу:

$$F_d = \gamma_c F_u, n / \gamma_g, \quad (3.3)$$

де: γ_c - коефіцієнт умов роботи, а γ_g - коефіцієнт надійності по ґрунту.

Викладене свідчить про те, що використання статичного способу випробування паль є більш достовірним, ніж динамічний метод.

Тому зупинимось на особливостях визначення несучої здатності паль з використанням статичного методу.

I. Спочатку розглянемо необхідний для цього склад обладнання та особливості методики випробувань.

1. До складу обладнання для випробувань палей статичними, вдавлюючими, висмикуючими або горизонтальними навантаженнями повинні:

- пристрій для навантаження палі (домкрати, тарований вантаж, палезанурювальне обладнання);

- упорна конструкція для сприйняття реактивних сил (система балок або ферм з анкерними палями та/або вантажна платформа, палезанурювальне обладнання);

- пристрій для вимірювання переміщення палі у процесі випробування (реперна система із вимірювальними приладами).

Принципові схеми установок для статичних випробувань палей наведені на рис. 3.1.

2. Всі конструкції установок, що застосовуються для випробувань, повинні бути розраховані на навантаження, що на 20% перевищує найбільше навантаження, передбачене програмою випробувань.

3. Пристрій для навантаження палей повинен забезпечувати осьову і центральну передачу навантаження на палею, можливість передачі навантажень ступенево, стабільність тиску на кожному ступені навантаження.

4. При застосуванні установок, в яких упором для домкрата служить вантажна платформа, вага кожного елемента вантажу, а також вага платформи повинні бути визначені заздалегідь і позначені фарбою, що не змивається.

5. При випробуванні ґрунтів палями з допомогою тарованих вантажів, згідно рисунку Б1, схема "в", всановлення реперної системи і вимірювальні прилади повинні бути змонтовані до передачі навантаження на палею.

6. Глибина занурення анкерних палей не повинна перевищувати глибини занурення випробуваної палі.

7. Необхідні мінімальні відстані у проміжку між випробуваною палею і анкерною палею або до найближчої опори вантажної платформи і/або опори палевдавлюючої машини, а також до опор реперної установки повинні прийматись за таблицею 3.1.

Таблиця 3.1.

Необхідні мінімальні відстані у проміжку між випробуваною палею і анкерною палею або до найближчої опори вантажної платформи і/або опори палевдавлюючої машини, а також до опор реперної установки при проведенні випробувань ґрунтів палями статичними вдавлюючими навантаженнями

Назва випробувань	Для забивних залізобетонних паль квадратного перерізу	Для круглих буронабивних суцільних, забивних залізобетонних і металевих трубчатих паль	Для еталонних паль і паль-зондів	Для гвинтових паль	Необхідна мінімальна відстань від випробуваної до анкерних паль і до опор реперної системи
При проведенні інженерних вишукувань	30x30			-	1,35 м
	35x35, 40x40			1,8 м	
	20x20			1,0 м	
	-	Діаметром до 800 мм	-	-	Не менше 2 м
	-	Діаметром, більшим від 800 мм до 1,5 м	-	-	Не менше 2 м
	-	Діаметром більшим 1,5 м*	-	-	-
	-	-	Незалежно від розмірів	-	Не менше 1 м
-	-	-	**	Не менше 2 м	

Продовження таблиці 3.1.

Назва випробувань	Для забивних залізобетонних паль квадратного перерізу	Для круглих буронабивних суцільних, забивних залізобетонних і металевих трубчатих паль	Для еталонних паль і паль-зондів	Для гвинтових паль	Необхідна мінімальна відстань від випробуваної до анкерних паль і до опор реперної системи
При проведенні контрольних випробувань	20x20 см	-	-	-	1 м
	30x30 см				1,5 м
	35x35, 40x40 см				1,5 м
	-	Діаметром до 800 мм	-	-	3, але не менше, ніж 1,5 м
		Діаметром, більшим від 800 мм до 1,5 м	-	-	2
		Діаметром більшим 1,5 м*	-	-	-
		-	-	**	Не менше 2
<p>*При діаметрі паль понад 1,5 м необхідні мінімальні відстані від випробуваною палею і анкерних паль і до опор реперної системи слід визначати на основі математичного моделювання процесу випробувань із використанням просторової схеми методом кінцевих елементів і нелінійних пружно-пластичних моделей ґрунту або ж за досвідом проведення подібних випробувань в аналогічних інженерно-геологічних умовах.</p> <p>**Незалежно від розмірів.</p>					

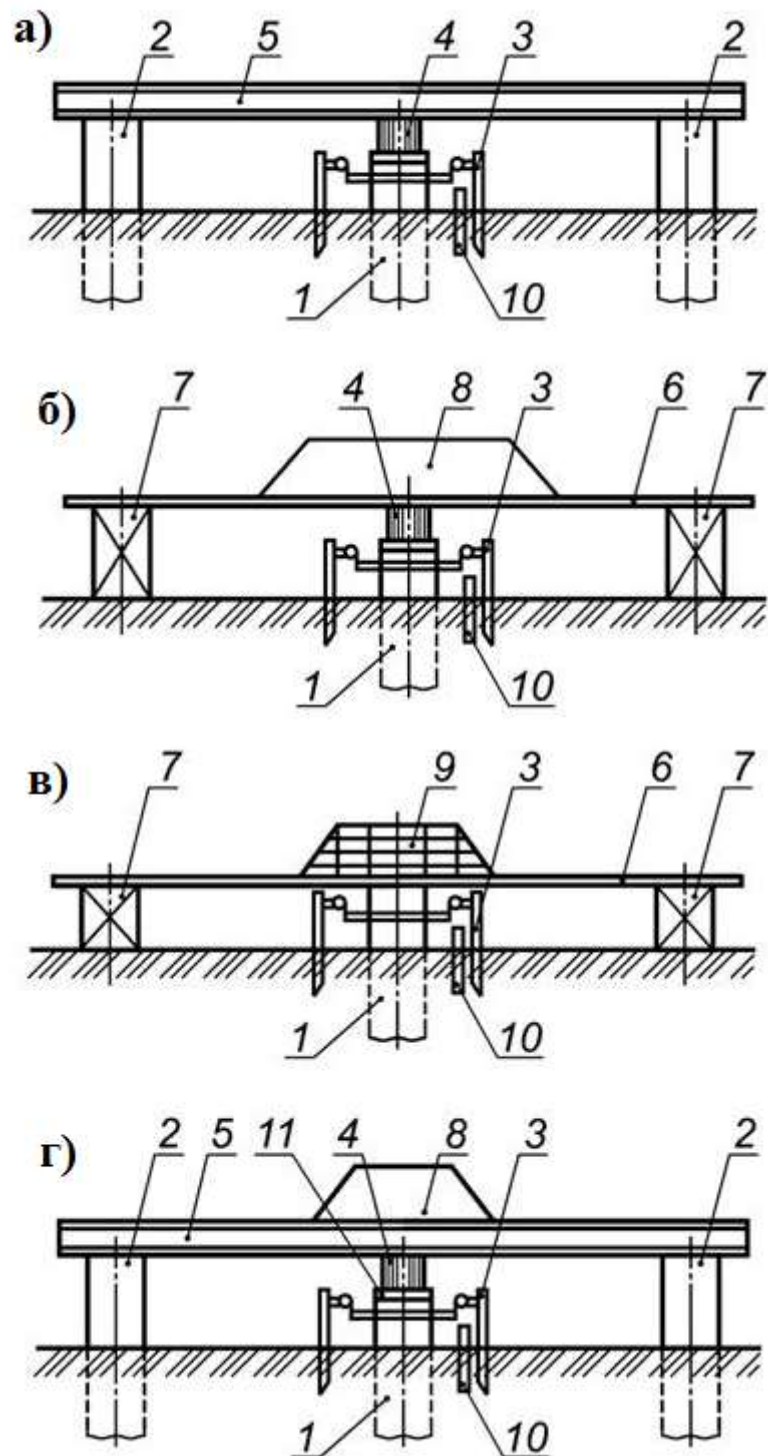


Рис. 3.1. Рекомендовані схеми статичних випробувань паль: а - установка із гідравлічним домкратом, системою балок та анкерними палями; б - установка із гідравлічним домкратом, та вантажною платформою, що служить для нього упором; в - установка тарованим вантажем; г – комбінована установка.

1 - випробувана паля; 2 - анкерна паля; 3 - реперна система із прогиномірами; 4 - домкрат із манометром; 5 - система упорів, балок;

6 - вантажна платформа; 7 - опора; 8 - вантаж (упор для домкрату); 9 - тарований вантаж; 10 - термометричний прилад (при потребі); 11 - опорна плита-оголовок

8. Найбільший прогин інвентарної конструкції, що служить упором для домкрату, повинен бути не більшим, ніж 0,004 її розрахункового прольоту.

9. Прилади вимірювання деформації (перемещень) палей при їх статичних випробуваннях (індикатори, прогиноміри, прилади автоматичного запису статичних деформацій і т.д.) повинні забезпечувати похибку вимірювань не більше, ніж 0,1 мм.

10. При використанні прогиномірів застосовують сталевий дріт діаметром 0,3 мм. Перед початком випробувань дріт повинен бути попередньо розтягнутий на протязі 2 діб вантажем вагою 4 кг. Під час випробувань маса вантажу на дроті повинна складати від 1 до 1,5 кг.

11. Межі вимірювань і ціну поділки манометрів і динамометрів, що використовуються для визначення навантаження на палею в процесі випробувань, вибирають в залежності від найбільшого навантаження на палею, передбаченого програмою випробувань із запасом, не меншим, ніж 20%.

12. Прилади, що використовуються для вимірювання переміщення палей і навантажень, повинні бути протаровані і перевірені на відповідність до паспортних даних.

II. Далі проведемо обробку результатів статичних випробувань палей.

9.5.1 Результати випробування ґрунтів оформлюють у вигляді:

- інженерно-геокриологічного розрізу із графіками розподілу сумарної вологості (льодовості) і температури за глибиною ґрунту (див. додаток С). Графік використовують для оцінки можливості і доцільності використання забивних і бурозабивних палей;
- графіків залежності деформації (осадки, виходу) палей від навантаження (див. додаток Т і У);

- графіків зміни деформації у часі за ступенями навантаження (див. додаток Г і У).

9.5.2 Маштаб графіків приймають:

- по вертикалі - 1 см, що дорівнює 1 м глибини інженерно-геокриологічного розрізу, 1 м глибини занурення палі або 1 мм переміщення (осадки, виходу) палі;

- по горизонталі - 1 см, що дорівнює 0,2 одиниці вологості (льодовості) і 1°C температури ґрунту - для інженерно-геокриологічного розрізу; 100 кН навантаження або 5 год. Витримки навантаження.

3.2. Властивості ґрунту, на якому розміщений майданчик для випробувань. Устаткування та методика проведення експериментів щодо визначення несучої здатності палі при циклічному заморожуванні – відтаюванні основи

3.2.1. Властивості ґрунту майданчика, на якому виконувались випробування.

За основу було використано покрівний суглинок, фізичні властивості якого наведено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Властивості ґрунту

НАЗВА ХАРАКТЕРИСТИКИ	ЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ					
	1	2	3	4	5	6
Лабораторний номер						
Виробка та її номер	свердловина 1			свердловина 2		
Глибина відбору проби, м	0,50	1,50	3,50	2,00	2,50	3,00
Вологість на гр.текуч., ч.од.	0,30	0,30	0,32	0,31	0,30	0,30
Вологість на гр.розкоч., ч.од.	0,20	0,21	0,21	0,21	0,20	0,21
Число пластичності, ч.од.	0,10	0,09	0,11	0,10	0,10	0,09
Вологість природна, ч.од.	0,23	0,24	0,24	0,24	0,23	0,24

Продовження таблиці 3.2

Вологість водонасичення, ч.од.	0,30	0,29	0,29	0,30	0,31	0,30
Показник текучості, ч.од.	0,29	0,29	0,29	0,29	0,30	0,29
Щільність часток ґрунту, г/см ³	2,69	2,71	2,71	2,69	2,69	2,68
Щільність ґрунту, г/см ³	1,79	1,84	1,83	1,79	1,77	1,80
Щільність сухого ґрунту г/см ³	1,46	1,48	1,48	1,44	1,44	1,45
Пористість, ч.од.	0,46	0,45	0,46	0,46	0,47	0,46
Коеф. порист. прир. слож., ч.од.	0,85	0,83	0,84	0,86	0,87	0,85
Ступінь вологості, ч.од.	0,73	0,79	0,78	0,75	0,71	0,76
Недостаток водонасиченості, ч.од.	0,07	0,05	0,05	0,06	0,08	0,06
Опір зрізу зразка в природному стані в МПа при навантаженні (зсув неконсолідований)						
0,100 МПа	0,082	0,075	0,079	-	0,081	0,089
0,200 МПа	0,145	0,121	0,129	-	0,124	0,142
0,300 МПа	0,182	0,163	0,176	-	0,165	0,194

Залежності міцності від нормального тиску на ґрунт у графічній формі наведені на рис. 3.2.

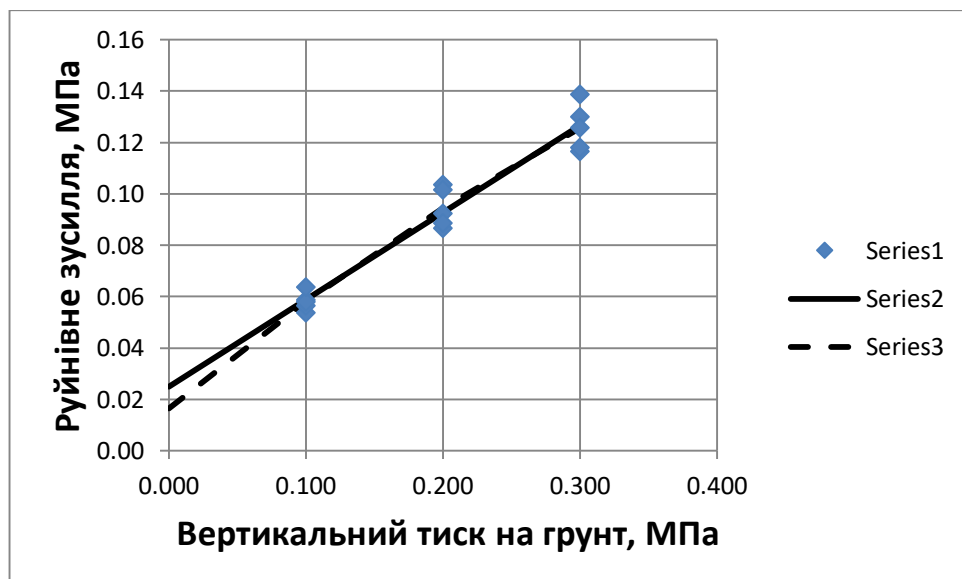


Рис. 3.2. Залежності міцності від нормального тиску на ґрунт

Виявилось, що матеріальні константи критерію міцності у рамках критерію міцності Кулона – Мора мають вигляд:

- кут внутрішнього тертя $\varphi = 18,7^0$;
- питоме зчеплення $c=0,025$ МПа=25 кПа.

Також було встановлено, що матеріальні константи поліноміального критерію міцності дорівнюють: $a_0 = 0,0167$ МПа; $a_1 = 0,4414$; $a_2 = -0,2571$ 1/МПа.

Модуль загальної деформації основи було визначено за таблицею В3 (ДБН В.2.1-10-2009, с.48).

У ході визначення впливу циклічного заморожування – відтаювання на міцність ґрунту було використано викладену у другому розділі методику.

Результати визначення коефіцієнту зменшення міцності, визначені після п'яти циклів заморожування – відтаювання ґрунту, наведено на рис. 3.3.

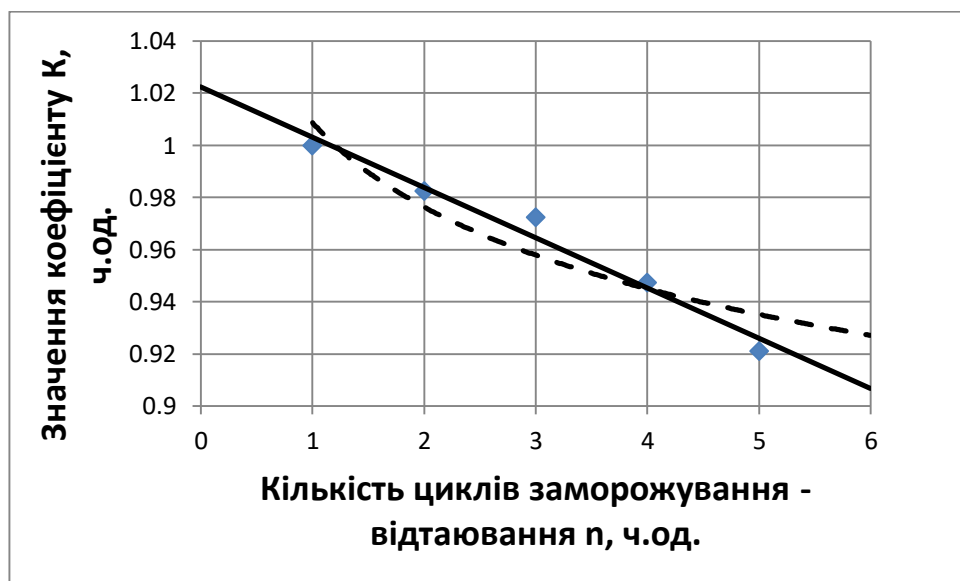


Рис. 3.3. Коефіцієнт зниження міцності ґрунту при циклічному заморожуванні – розмерзанні.

Примітка:

Суцільна лінія – лінійна апроксимація лінійною залежністю; штрихова лінія – апроксимація експоненціальною залежністю

Виявилось, що залежність коефіцієнту зниження міцності ґрунту від кількості циклів розмерзання – відтаювання K може бути апроксимовано або лінійною функцією у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} K &= 1,0226 - 0,0193 \cdot n; \\ R &= 0,987. \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

або експоненціальною залежністю у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} K &= 1,0241 \cdot \exp(-0,02 \cdot n); \\ R &= 0,981. \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

Тут K - коефіцієнт зниження міцності ґрунту від кількості циклів розмерзання – відтаювання; n - кількість циклів замерзання – відтаювання; R - коефіцієнт множинної кореляції.

3.2.2. Обладнання, яке використовувалося при проведенні експериментів

Перед початком розробки конструкції було визначено несучу властивість палі довжиною 200 см та поперечним перерізом 80x80 мм.

З цією метою було використано довідник інженера Еспрі (рис. 3.4), викладену у ДБН [15] методику, а також розроблену нами та викладену у розділі 4 методику визначення несучої здатності паль.

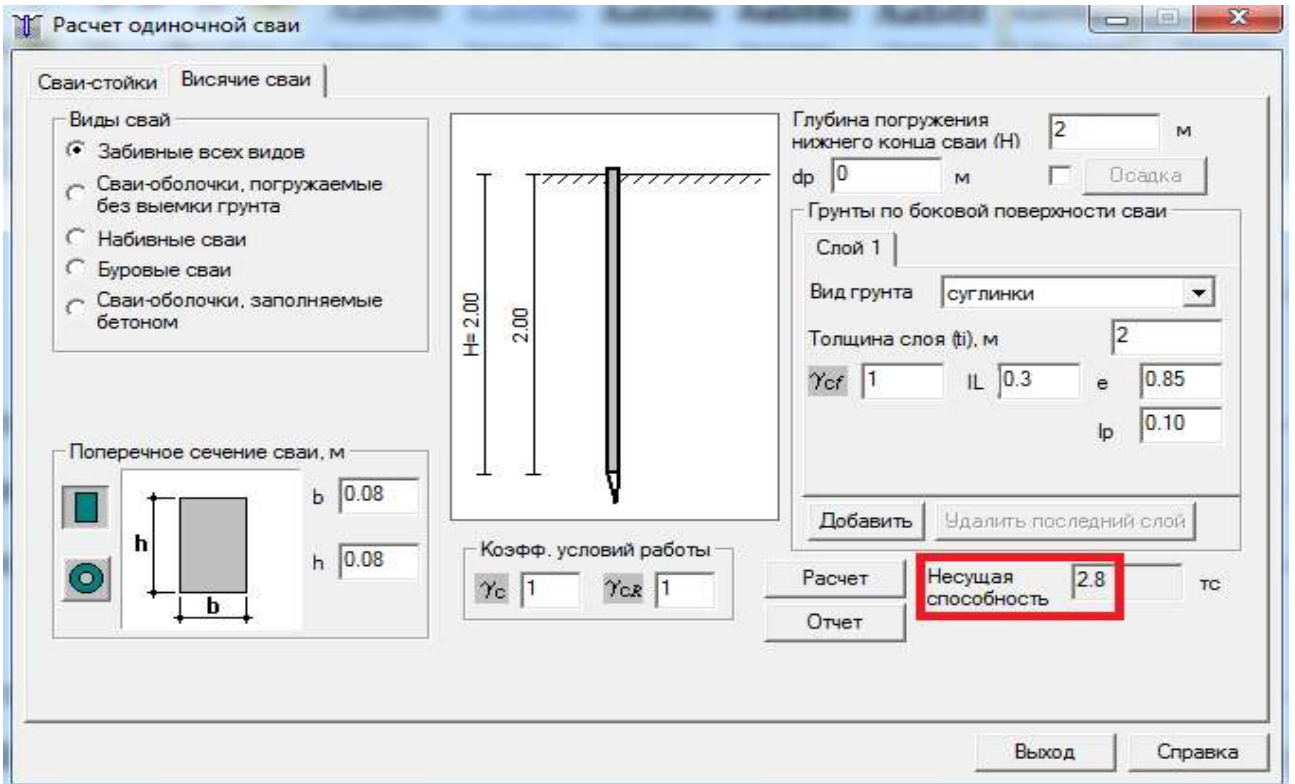
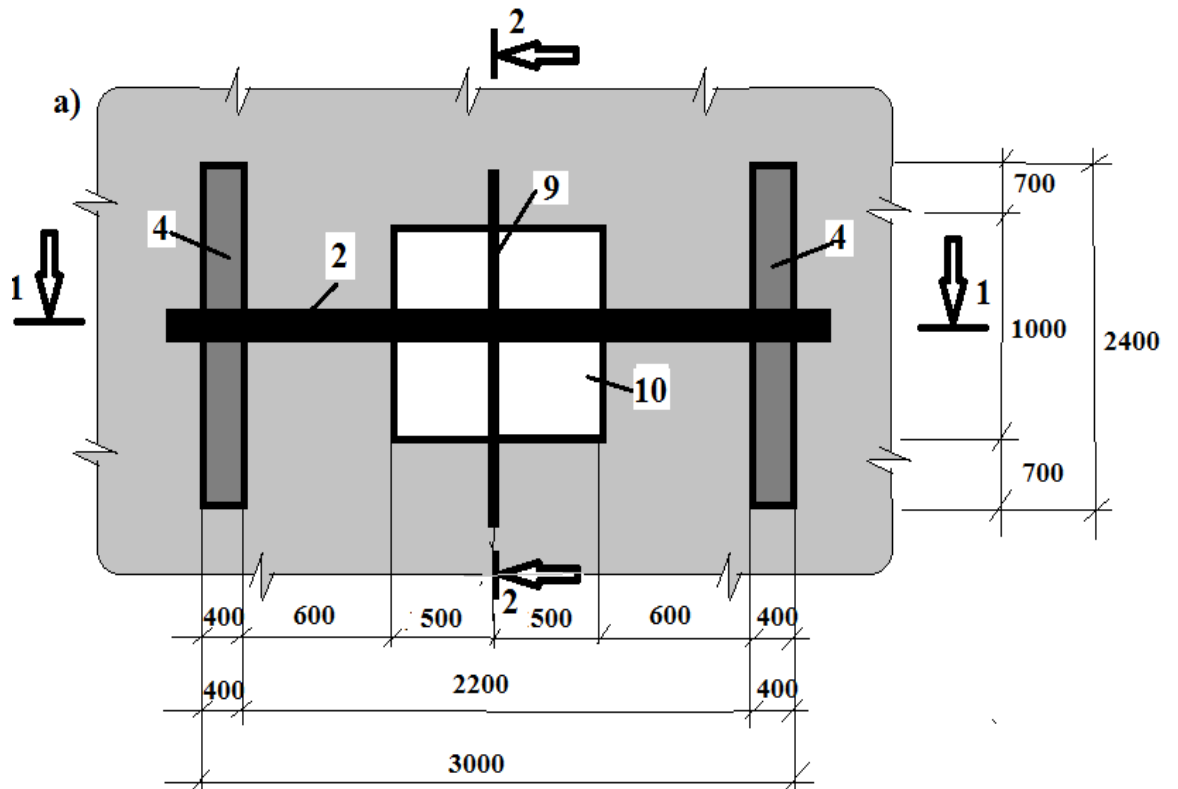


Рис. 3.4. До визначення несучої здатності палі.



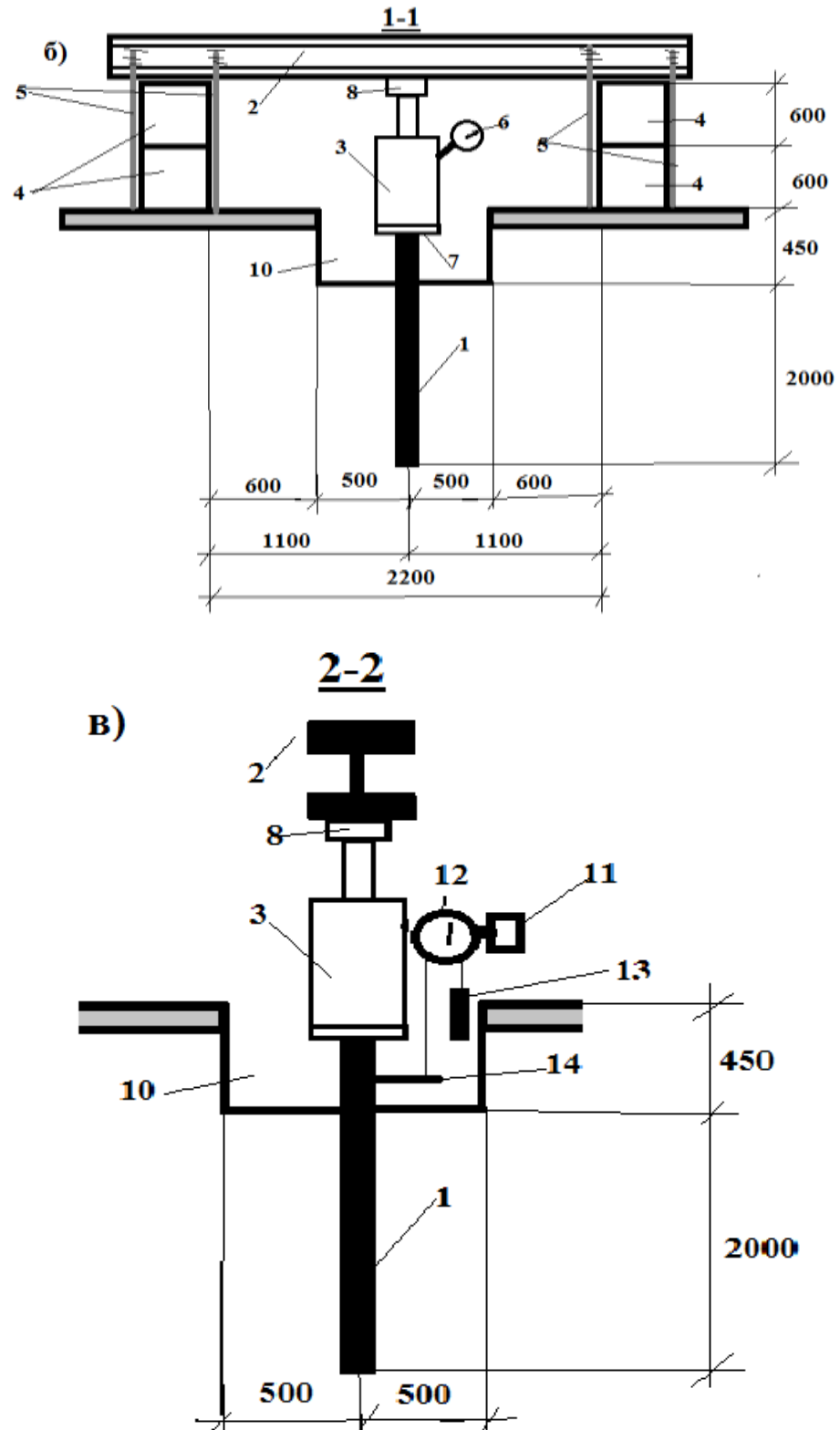


Рис. 3.5. Схема установки, з використанням якої виконувалось випробування ґрунту: а) – план; б) – розріз по 1-1; в) – розріз по 2-2.

Примітка.

На рис. 3.5 прийняті такі позначення: 1-паля; 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

Також було встановлено, що розрахована за методикою ДБН [15] несуча здатність палі дорівнює 2,5 тонни, а за запропонованою нами методикою (див.розділ 4) – 2,2 тонни.

Якщо відома несуча здатність палі, то легко визначити вагу вантажів, до яких кріпиться упорна балка (рис. 3.5, позиція 2). Це дозволило використати як

опори два поставлених один на одній залізобетонні блоки ФСБ вагою 1,3 тонни із загальною вагою 5,2 тонни (рис. 3.5, позиція 4).

Як упору балку, було використано двотавр №16 (у цьому випадку згідно із вимогами, наведеними у п. 8, прогин від прикладеної у центрі прольоту зосередженої сили не перевищує 0,004 від розрахункового прольоту балки, що дорівнює 2600 мм).

3.2.3. Методика проведення експериментів.

Перед початком експерименту рився шурф глибиною 450 ± 100 мм таким чином, щоб була відкрита покрівля суглинистого ґрунту (позиція 10 на рис. 3.5). Розміри шурфу у плані дорівнювали 1000x1000 мм.

Після цього паля – металева квадратна труба з перетином 80x80 мм та закритим нижнім кінцем (позиція 1 на рис. 3.5) ковшем екскаватора забивалась на проектну відмітку. У такому стані вона витримувалася один тиждень (згідно з діючими у даний час нормами цей термін для суглинистого ґрунту дорівнює 6 діб). При цьому паралельно з витримкою палі виконувався монтаж обладнання, тобто вантажів, упорної балки, та ін.

Далі з використанням підйомного крану виконувався монтаж фундаментних блоків ФБС 24-4-6 (позиція 4 на рис. 3.5), таким чином, щоб відстань між ними у просвіті дорівнювала 2200 мм.

Після цього під нижні блоки підсовувалася і далі вигиналася обв'язка із арматури класу С400 діаметром 18 мм (позиція 5 на рис. 3.5), до якої приварювалася упорна балка (позиція 2 на рис. 3.5).

Далі до палі приварювався кронштейн для кріплення струни прогиноміру (позиція 2 на рис. 3.5).

Потім на палю встановлювався домкрат (позиція 3 на рис. 3.5) і далі з використанням металевих прокладок (позиція 7 та 8 на рис. 3.5) вибирався люфт між верхом домкрату та упорною балкою.

Далі монтувалася реперна система (рівнобічний кутик №80; позиція 11 на рис. 3.5), до якої кріпився прогиномір (позиція 12 на рис. 3.5), на коліщатко якого накидалась сталева струна із контрвантажем (позиція 13 на рис. 3.5).

У подальшому починались випробування палі.

Методика випробувань палі полягала у наступному:

1. З палі знімався домкрат (позиція 3 на рис. 3.5) та пластини (позиції 6 та 7 на рис. 3.5).

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 розміщався 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 металевого 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. 3.5) та пластини (позиції 6 та 7 на рис. 3.5).

10. Далі виконувалось налаштування реперної системи (позиція 9 на рис. 3.5) і починались випробування палі.

11. Випробування паль 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.

Ці дані наведено у підрозділі 3.3.

3.3. Результати випробувань паль при циклічному замерзанні - відтаюванні основи

У даному підрозділі наведено результати виконаних мною випробувань металевих паль при циклічному замерзанні – розмерзанні прилеглого до нього ґрунту.

Необхідність проведення таких випробувань обумовлена такими причинами:

1. Аналогічні випробування, виконані Б. В. Морклянником, були проведені на маломірних моделях (довжина 250 мм та діаметр 25 мм).

2. У ході виконаних Б. В. Морклянником експериментів було заморожено усю основу, а не лише прилеглий до палі ґрунт (саме така ситуація виникає при експлуатації енергетичних палів).

Випробування виконувались у такій послідовності:

1. Спочатку було випробувано палю у основі з природною температурою. Ці дані наведено на рис. 3.7.

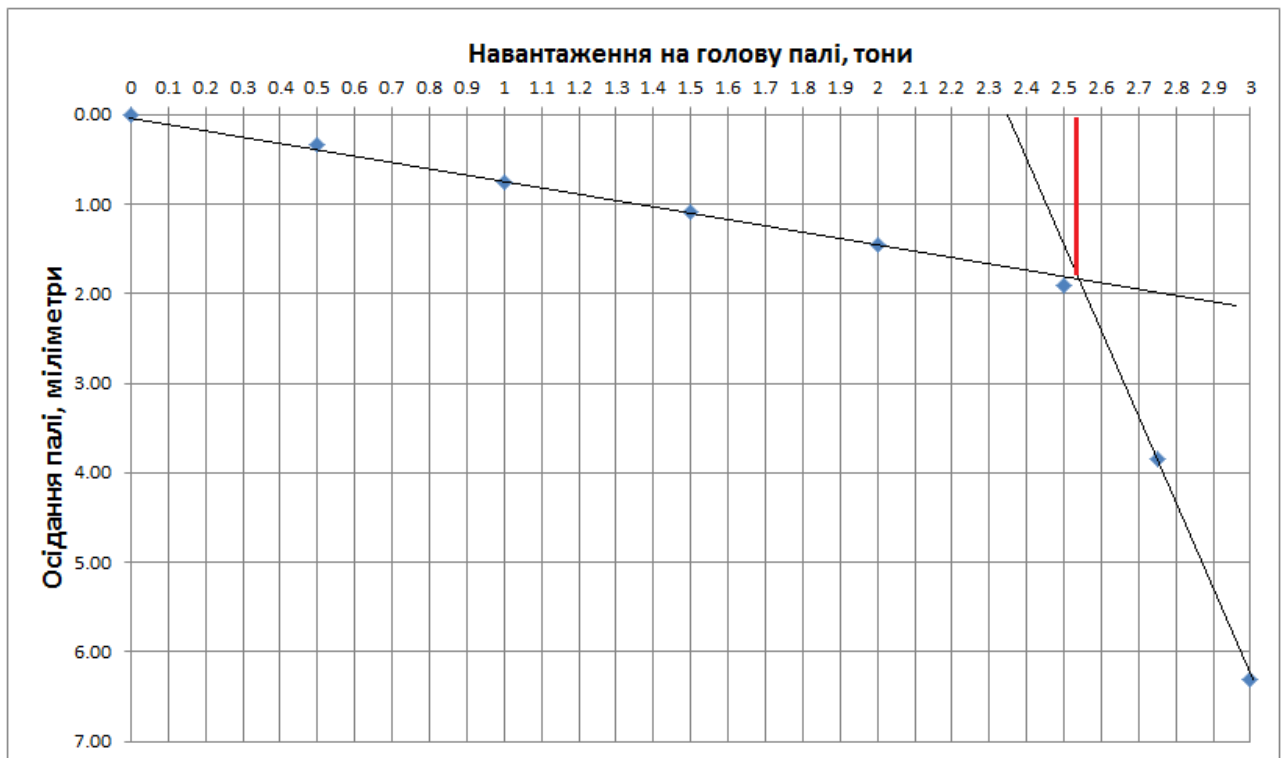


Рис. 3.7. Результати визначення несучої здатності палі при природній температурі основи. $F_{d,0} = 2,52$ тонни.

2. Результати визначення несучої здатності палів при циклічному заморожуванні – розмерзанні ґрунту при одному, двох, трьох, чотирьох та п'яти циклах розмерзання – відтаювання наведено відповідно на рисунках 3.8, 3.9, 3.10, 3.11 та 3.12.



Рис. 3.8. Результати визначення несучої здатності палі після першого циклу замерзання - відтаювання основи. $F_{d,1} = 2,50$ тонни.

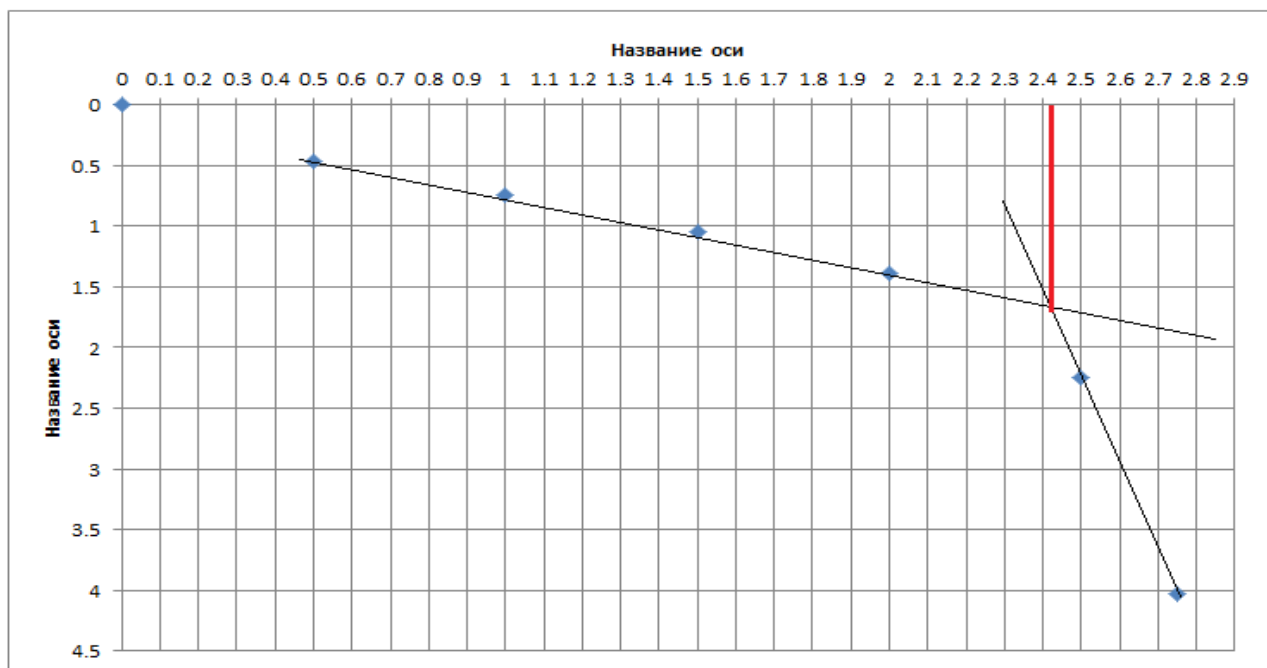


Рис. 3.9. Результати визначення несучої здатності палі після другого циклу замерзання - відтаювання основи. $F_{d,2} = 2,41$ тонни.

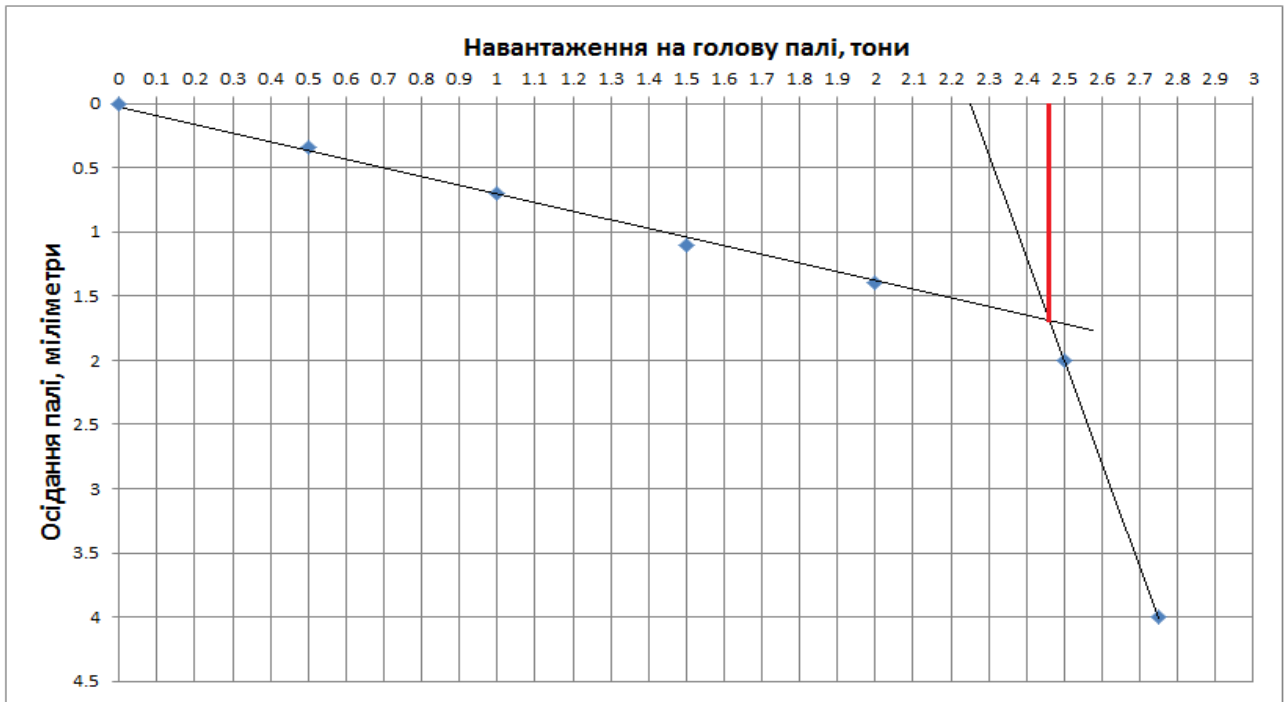


Рис. 3.10. Результати визначення несучої здатності палі після третього циклу замерзання - відтаювання основи. $F_{d,3} = 2,46$ тонни.

Таблиця 3.3.

Результати визначення несучої здатності палі

Номер циклу											
0		1		2		3		4		5	
P, тонни	S, мм	P, тонни	S, мм	P, тонни	S, мм	P, тонни	S, мм	P, тонни	S, мм	P, тонни	S, мм
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,50	0,36	0,50	0,34	0,50	0,46	0,50	0,34	0,50	0,47	0,50	0,50
1,00	0,76	1,00	0,71	1,00	0,74	1,00	0,69	1,00	0,75	1,00	0,82
1,50	1,09	1,50	1,12	1,50	1,05	1,50	1,11	1,50	1,06	1,50	1,19
2,00	1,46	2,00	1,43	2,00	1,39	2,00	1,38	2,00	1,42	2,00	1,60
2,50	1,91	2,50	1,85	2,50	2,25	2,50	1,99	2,50	2,25	2,50	2,41
2,75	3,85	2,75	3,71	2,76	4,03	2,75	3,98	2,75	4,29	2,75	3,79
3,00	6,30	3,00	7,40	3,00	-	-	-	-	-	-	-

Примітка: у таблиці прийнято такі позначки: P – навантаження на палю; S – осідання палі.

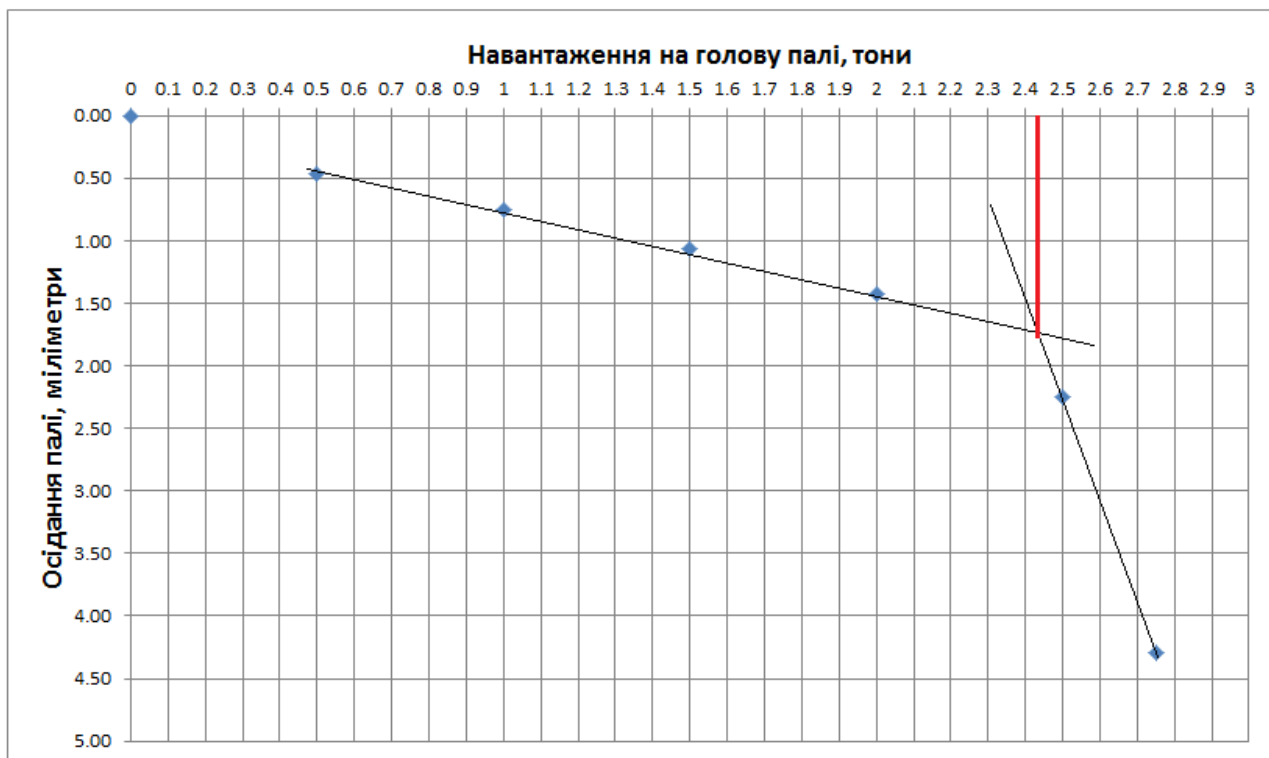


Рис. 3.11. Результати визначення несучої здатності палі після четвертого циклу замерзання - відтаювання основи. $F_{d,4} = 2,43$ тонни.

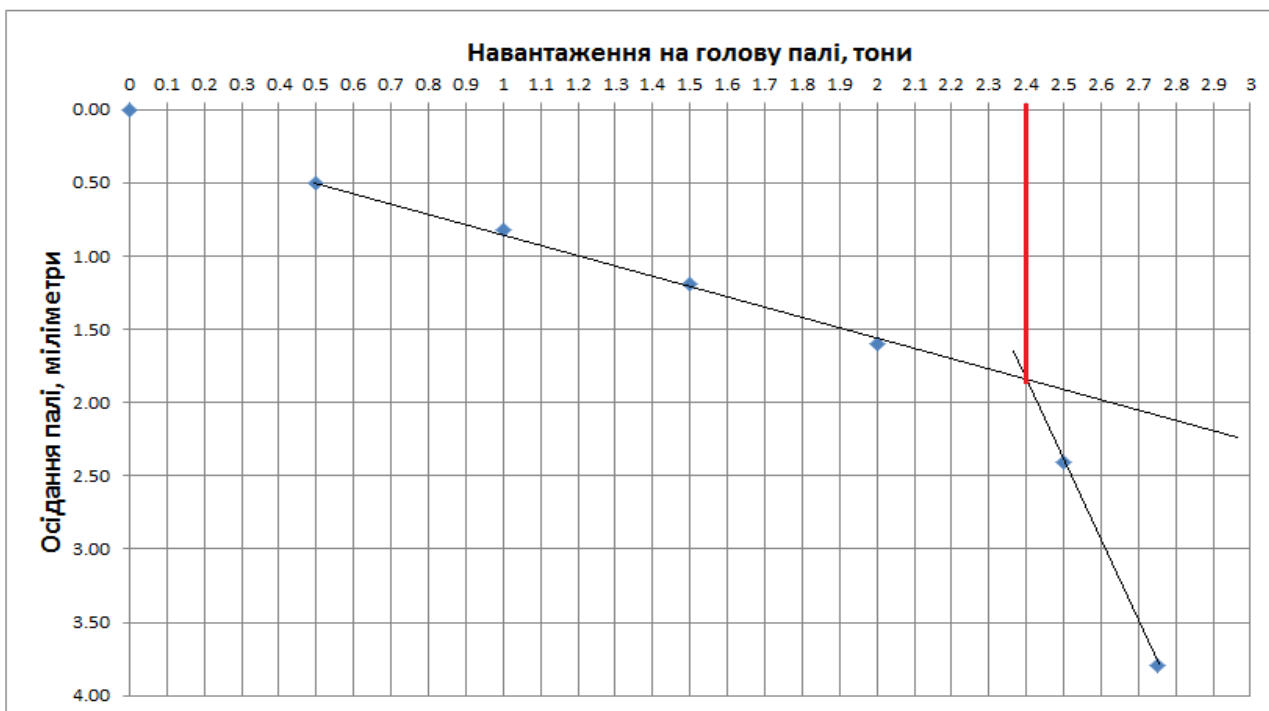


Рис. 3.12. Результати визначення несучої здатності палі після п'ятого циклу замерзання - відтаювання основи. $F_{d,5} = 2,40$ тонни.

У табличній формі наведені на рис. 3.8, 3.9, 3.10, 3.11 та 3.12 результати випробувань палів наведено у таблиці 3.3.

При цьому залежності несучої здатності палів від кількості циклів замерзання – відтаювання наведено на рис. 3.13, а у табличній формі ці дані наведено у таблиці 3.4.

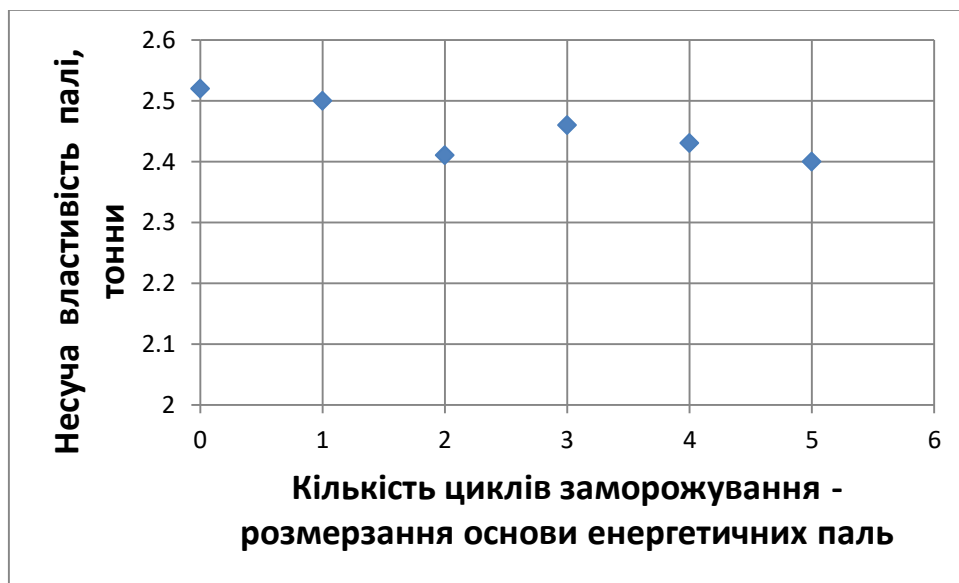


Рис. 3.13. Залежність несучої здатності палів від кількості циклів замерзання – відтаювання.

Таблиця 3.4

Несуча здатність палів в залежності від кількості замерзання - розморожування

Кількість циклів замерзання-відтаювання, одиниць	0	1	2	3	4	5
Несуча здатність палів, тонни	2,52	2,5	2,41	2,46	2,43	2,4

Далі нами було виконано побудову трендів залежності несучої здатності палів від кількості циклів замерзання – відтаювання. Для цього було використано лінійну (3.6) та експоненціальну (3.7) залежності.

Лінійний тренд має такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} F_d &= 2,5076 - 0,0217 \cdot n; \\ R &= 0,83. \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

Експоненціальний тренд має такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} F_d &= 2,507 \cdot \exp(-0,009 \cdot n); \\ R &= 0,83. \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

У формулах (3.6) та (3.7) прийняті такі позначення: F_d - несуча здатність палі; n - кількість циклів замерзання – відтаювання; R - коефіцієнт множинної кореляції.

Аналіз наведених у даному розділі даних і, особливо, тренди (3.6) та (3.7) дозволили нам зробити висновок про те, що є чіткою тенденція зниження несучої здатності палі при зростанні кількості циклів замерзання – відтаювання.

Так, згідно із (3.6) та (3.7) після п'яти циклів несуча здатність палі знизиться приблизно на 4,5%, а після десяти циклів – на 9%.

Тому, розглянута Б. М. Моркляником проблема зниження несучої здатності енергетичних палі при циклічному замерзанні-розморожуванні основи є наявною і потребує свого рішення.

3.4. Висновки за розділом 3.

Було встановлено наступне:

1. Обґрунтовано найбільш придатний для проведення випробувань енергетичних палі спосіб.
2. Розроблено методику та устаткування, необхідні для проведення випробувань енергетичних палі.
3. Показано, що циклічне замерзання – відтаювання основи енергетичних палі призводить до суттєвого зниження їх несучої здатності.

Однак, наведених у розділі даних недостатньо для формулювання конкретних рекомендацій щодо прогнозу несучої здатності основ енергетичних паль.

Присвячені вирішенню цього питання матеріали наведено у четвертому розділі.

РОЗДІЛ 4
ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ В ОСНОВІ
ФУНДАМЕНТІВ ІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАЛЬ, МЕТОДИКА
ВИЗНАЧЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАЛЬ ТА
АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ.

У даному розділі представлено матеріали таких досліджень:

1. Теоретичні дослідження температурних полів в основі фундаментів із енергетичних палів.

Необхідність проведення цих досліджень обумовлена такими чинниками:

1.1. Вище було показано, що при позитивних температурах циклічна їх зміна незначно впливає на властивості ґрунту, а, отже, на несучу властивість палів по ґрунту.

1.2. Отримані Моркляником Б. формули мають складну форму, тому при їх практичному використанні виникають певні труднощі.

2. Методика розрахунку несучої здатності енергетичних палів з урахуванням нелінійних властивостей основи та циклічного замерзання - відтаювання ґрунту.

Необхідність проведення цих досліджень обумовлена такими причинами:

2.1. Природні ґрунти характеризуються фізичною нелінійністю міцнісних властивостей. Однак цей фактор не враховується діючими нормативними документами, що потребує відповідного вирішення.

2.2. Міцнісні властивості природніх ґрунтів при циклічному замерзанні-розморожуванні можуть суттєво змінюватись. Це явище не враховується діючими нормативними документами, і також потребує свого розв'язку.

3. Перевірка результатів досліджень на адекватність експерименту. На основі цього наші методичні розробки можуть бути рекомендовані до застосування у сучасній інженерній практиці.

4. Результати впровадження матеріалів досліджень у інженерну практику будівництва.

4.1. Розподіл температурного поля в основі фундаментів із енергетичних паль.

Спочатку розглянемо сучасні методи розрахунку температурних полів в ґрунтових основах.

Згідно сучасної теорії поширення тепла в природі [37, 38, 40, 41, 47], розрізняють три основних види теплопередачі в суцільному середовищі, у тому числі у ґрунті:

- кондуктивну;
- конвективну;
- радіаційну (теплопередачу випромінюванням).

В сучасній практиці, при розрахунку температурних полів в будівельних конструкціях, основах і фундаментах конвективним і радіаційним способами теплопередачі нехтують.

Тому для опису кондуктивної теплопередачі в подальшому будемо використовувати закон Фур'є, який має вигляд [2, 35]:

$$dQ = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \cdot dF \cdot dt, \quad (4.1)$$

де dQ - кількість тепла, яке пройшло за час dt через елемент поверхні dF по нормалі до неї; $\frac{\partial T}{\partial n} = grad(T)$ - температурний градієнт; T - температура; λ - коефіцієнт теплопередачі; t - час.

Це рівняння дозволяє отримати точні рішення задач теорії теплопровідності при виконанні таких умов:

- якщо за теплофізичними властивостями основа є однородною та ізотропною;
- у тому випадку, коли теплофізичні властивості основи слабо залежать (або взагалі не залежать) від температури;
- в основі відсутні фазові переходи (не відбувається замерзання та відтаювання порової рідини).

Якщо одночасно виконуються вищезазначені умови, то рівняння поширення в основі тепла за допомогою кондуктивного теплообміну має вигляд:

$$a \cdot \Delta T = \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (4.2)$$

де T – температура в точці M із координатами (x, y, z) і в момент часу t ;

$a = \frac{\lambda}{\gamma \cdot c}$ - коефіцієнт температуропровідності; $\Delta = \nabla^2$ - оператор Лапласа; γ

- питома вага ґрунту; c - його питома теплоємність.

В розгорнутому вигляді в декартовій системі координат рівняння теплопровідності має вигляд:

$$a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t} \quad . \quad (4.3)$$

В розгорнутому вигляді в циліндричній системі координат рівняння теплопровідності має вигляд:

$$a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (4.4)$$

де T – температура в точці M із координатами (r, z, φ) і в момент часу t .

При осьовій симетрії рівняння (4.4) має вигляд:

$$a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (4.5)$$

У цьому випадку поширення температури в основі не залежить від кута повороту радіус – вектора.

Далі розглянемо умови на межі контакту шарів ґрунту з різними властивостями (див. також [20, 21]) та межі поділу середовищ, необхідних для розрахунку теплових полів навколо колекторів теплових насосів.

Найбільш поширеними з них є:

1. Умова Діріхле:

$$T_W = f(x, y, t). \quad (4.6)$$

2. Умова Неймана:

$$\frac{\partial T_W}{\partial n} = f_1(x, y, t). \quad (4.7)$$

Тут T_W - температура на межі; $\frac{\partial T_W}{\partial n}$ - похідна від температури по нормалі до межі; $f(x, y, t)$ і $f_1(x, y, t)$ - деякі функції координат x та y ; t - час.

3. Закон теплообміну Ньютона.

Умови ідеального температурного контакту на межі ґрунтових шарів на глибині H (для простоти викладення покладемо їх паралельно одна одній):

$$T_1(x, y, H, t) - T_2(x, y, H, t) = 0; \quad (4.8)$$

$$\lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=H} - \lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0.$$

Тут λ_1 і λ_2 - коефіцієнти теплопередачі ґрунтових шарів; $T_1(x, y, H, t)$ і $T_2(x, y, H, t)$ - температура на контакті ґрунтових шарів на глибині H ; x, y, z - координати; t - час.

У подальшому розглянемо початкові умови. При їх визначенні необхідно знати температурні поля в момент включення теплового насосу.

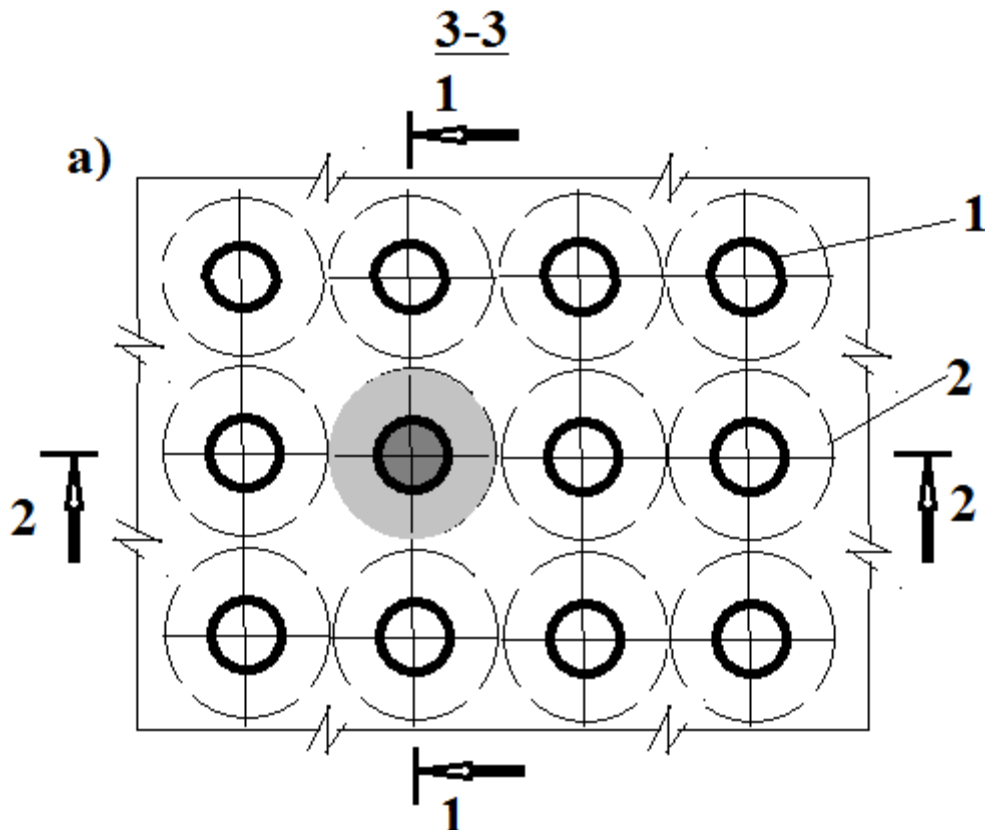
У загальному випадку вони мають вигляд:

$$T(x, y, z, 0) = F(x, y, z), \quad (4.9)$$

де $F(x, y, z)$ - деяка функція координат, яка характеризує розподіл температури в основі в початковий момент часу.

Вищезазначені дані дозволяють перейти до безпосередньої постановки і вирішення поставленої при написанні даного розділу задачі.

Розглянемо фундамент із енергетичних палів, довжина яких є значно більшою ніж їх поперечний переріз (рис. 4.1).



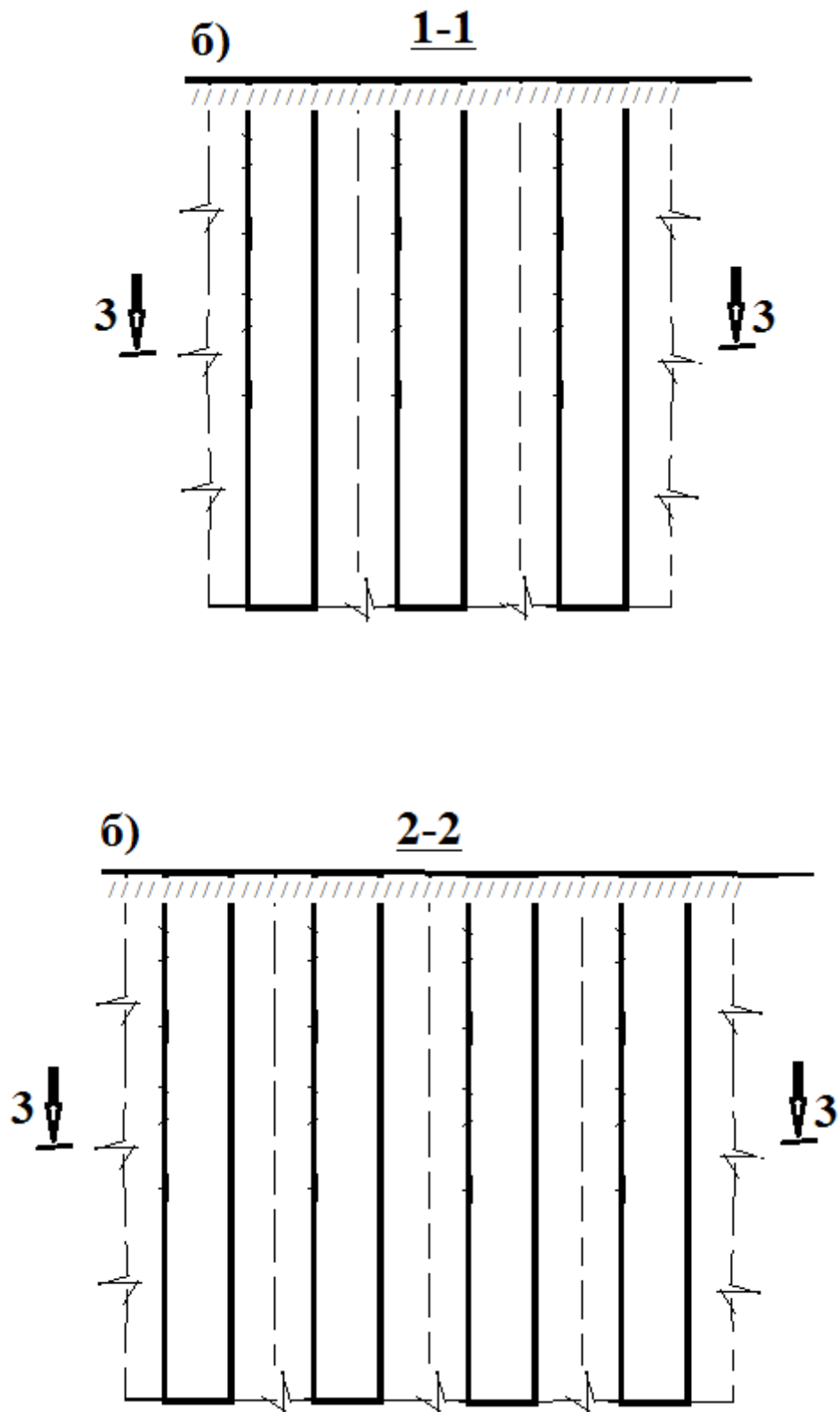


Рис. 4.1. Схема до розрахунку температурного поля в основі енергетичної палі.

Примітки.

1. Суцільною лінією показано контури палі.

2. Штриховою лінією показано контури зони впливу температурного поля палі.
3. На розрізі 3-3 темносірим кольором показано розрахункову область палі, а світлосірим кольором, розрахункова область основи.

Зі схеми на рис. 4.1 стає відомо, що найбільш не вигідним з точки зору швидкості поширення температури буде горизонтальний переріз на половині висоти центральної палі, яка знаходиться у центрі фундаменту. В цьому випадку ми отримуємо плоску задачу теплопровідності в циліндричній системі координат із осью симетрії.

Також приймемо, що середня температура теплоносія у перерізі відома зазделегіть.

В якості середньої температури в будь-якому перерізі палі (включаючи розрахунковий; див. схеми на рис. 1.6 - г в розділі 1) приймемо:

$$T_w(t) = \frac{T_{вх}(t) + T_{вих}(t)}{2}, \quad (4.10)$$

де $T_w(t)$ - температура в точці контакту палі із ґрунтом;

$T_w(t) = \frac{T_{вх}(t) + T_{вих}(t)}{2}$ - температура теплоносія на вході в колектор

енергетичної палі; $T_w(t) = \frac{T_{вх}(t) + T_{вих}(t)}{2}$ - те ж, на виході із колектора

енергетичної палі.

Відповідна цьому випадку та прийнятим вище допускам, розрахункова схема представлена на рис. 4.2.

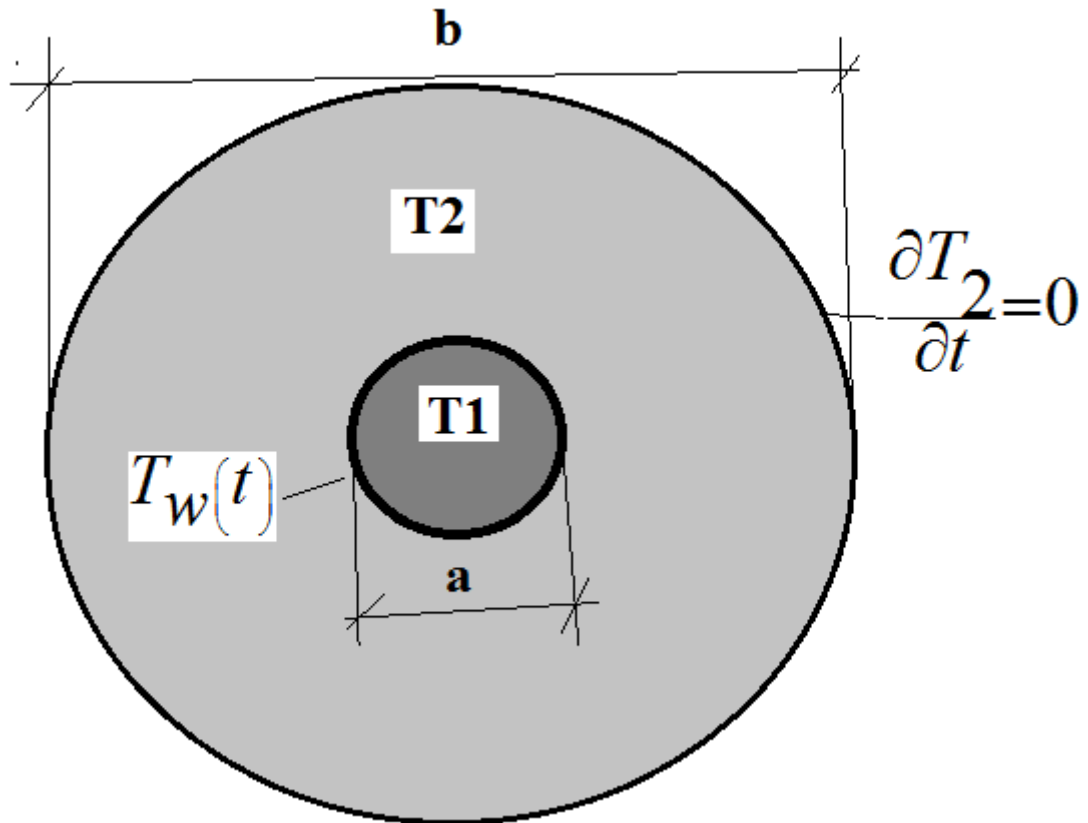


Рис. 4.2. Схема до розрахунку температурного поля.

Примітки:

1. На рисунку темносірим кольором показано розрахункову область палі, а світлосірим кольором, розрахункова область основи.
2. На рисунку прийняті такі позначення: T_1 - температура палі; T_2 - температура прилеглої до неї основи; $T_w(t)$ - температура в точці контакту палі із ґрунтом (вона кількісно дорівнює середній температурі теплоносія; див. формулу (4.10)).

Як допущення приймемо, що переходом теплоти через шар теплоносія з ґрунту в палю і навпаки можна знехтувати.

Тоді рівняння, що описують зміну теплових полів всередині палі і основи можна описати за допомогою таких диференціальних рівнянь в часткових похідних:

$$\left. \begin{aligned}
 k_1 \cdot \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) &= \frac{\partial T_1}{\partial t}; \\
 k_2 \cdot \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) &= \frac{\partial T_2}{\partial t}; \\
 k_1 &= \frac{\lambda_1}{\gamma_1 \cdot c_1}; \\
 k_2 &= \frac{\lambda_2}{\gamma_2 \cdot c_2}.
 \end{aligned} \right\}. \quad (4.11)$$

Тут $k_1 = \frac{\lambda_1}{\gamma_1 \cdot c_1}$ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу палі

(залізобетон); $k_2 = \frac{\lambda_2}{\gamma_2 \cdot c_2}$ - коефіцієнт теплопровідності ґрунту; λ_1 і

λ_2 - коефіцієнти кондуктивної теплопередачі матеріалу палі та ґрунту відповідно; γ_1 і γ_2 - питома вага матеріалу палі та ґрунту відповідно; c_1 і c_2 - питома теплоємність матеріалу палі та ґрунту відповідно.

Для матеріалу палі маємо такі граничні та початкові умови:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\partial T_1(0,t)}{\partial r} &= 0; \\
 T_1(a,t) &= T_w(t); \\
 T_1(r,0) &= T_0.
 \end{aligned} \right\}. \quad (4.12)$$

Верхня гранична умова (4.12) означає, що при однорідному температурному полі міграція тепла через центр палі неможлива, а нижня

гранична умова означає, що джерелом температури є температура $T_w(t)$, прикладена на відстані a від центру круглої палі.

Для ґрунту маємо такі граничні та початкові умови:

$$\left. \begin{aligned} T_2(a, t) &= T_w(t); \\ \frac{\partial T_2(b, t)}{\partial r} &= 0; \\ T_2(r, 0) &= T_0. \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

Нижня гранична умова (4.13) означає, що міграція тепла за межі зони впливу палі неможлива, а верхня гранична умова означає, що джерелом температури є температура $T_w(t)$, прикладена на відстані a від центру круглої палі.

Системи рівнянь (4.11) – (4.13) в рамках прийнятої розрахункової схеми дозволяють визначити розподіл температури.

4.1.1. Розподіл температури в матеріалі енергетичної палі.

Спочатку знайдемо розподіл температури в палі.

Для вирішення задачі використовуємо метод Бубнова – Гальоркіна [36].

Пробне вирішення $T_{1,0}$ приймемо у вигляді:

$$T_{1,0} = T_w(t) \quad (4.14)$$

Цей розв'язок задовільняє граничні умови, але не задовільняє верхнє рівняння 3.11.

Коректуюче вирішення приймаємо у вигляді:

$$T_{1,r} = \sum_{i=0}^{\infty} a_i(t) \cdot J_0\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right), \quad (4.15)$$

де $a_i(t)$ - деякі функції часу, що підлягають визначенню; $J_0\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right)$ - функція Бесселя першого роду з нульовим індексом; μ_i - корені рівняння $J_0(x) = 0$.

Функції $J_0\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right)$ точно задовільняють нульові граничні умови:

$$\left. \begin{aligned} \lim_{r \rightarrow a} J_0\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right) &\equiv 0; \\ \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\partial}{\partial r} J_0\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right) &\equiv 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.16)$$

З урахуванням (4.14) та (4.15) вирішення рівняння шукаємо у вигляді:

$$T_1 = T_{1,0} + T_{1,r} = T_w(t) + \sum_{i=0}^{\infty} a_i(t) \cdot J_0\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right). \quad (4.17)$$

Далі підставимо (4.16) в верхнє рівняння, помножимо обидві частини отриманої таким чином рівності на $J_0\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right)$ та проінтегруємо на інтервалі $r \in (0, a)$. Маємо:

$$\left. \begin{aligned} \frac{da_i(t)}{dt} + k_1 \cdot \frac{\mu_i^2}{a^2} \cdot a_i(t) + m_i \cdot \frac{dT_w(t)}{dt} &= 0; \\ m_i &= \frac{\int_0^a J_0\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right) \cdot r \cdot dr}{\int_0^a J_0^2\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right) \cdot r \cdot dr} \end{aligned} \right\} \quad (4.18)$$

Розв'язок (4.18) має вигляд:

$$a_i(t) = -m_i \cdot \int_0^t \exp\left[-k1 \cdot \frac{\mu_i^2}{a^2} \cdot (t - \tau)\right] \cdot \frac{dT_w(\tau)}{d\tau} \cdot d\tau + \left. \begin{array}{l} \\ + a_{i,0} \cdot \exp\left(-k1 \cdot \frac{\mu_i^2}{a^2} \cdot t\right) \end{array} \right\}. \quad (4.19)$$

Для того, щоб задовільнити початкову умову $T_1(r, 0) = T_0$, підставимо в (4.17) $t = 0$ і, далі, отриману таким чином суму прирівнюємо початковій температурі T_0 . Маємо:

$$T_1(r, 0) = T_w(0) + \sum_{i=0}^{\infty} a_{i,0} \cdot J_0\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right) = T_0,$$

звідки:

$$\sum_{i=0}^{\infty} a_{i,0} \cdot J_0\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right) = T_0 - T_w(0). \quad (4.20)$$

Далі помножимо обидві частини рівності (4.20) на множник $r \cdot J_0\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right)$ і проінтегруємо отриманий таким чином вираз на інтервалі

$$t \in (0, a). \text{ Отримуємо: } a_{i,0} \cdot \int_0^a J_0^2\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right) \cdot r \cdot dr = [T_0 - T_w(0)] \cdot \int_0^a J_0^2\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right) \cdot r \cdot dr,$$

звідки:

$$a_{i,0} = [T_0 - T_w(0)] \cdot \frac{\int_0^a J_0\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right) \cdot r \cdot dr}{\int_0^a J_0^2\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right) \cdot r \cdot dr} = m_i \cdot [T_0 - T_w(0)] \quad (4.21)$$

Враховуючи (4.21), функції (4.19) приймуть вигляд;

$$a_i(t) = m_i \cdot \left\{ \begin{array}{l} [T_0 - T_w(0)] \cdot \exp\left(-k1 \cdot \frac{\mu_i^2}{a^2} \cdot t\right) - \\ - \int_0^t \exp\left[-k1 \cdot \frac{\mu_i^2}{a^2} \cdot (t - \tau)\right] \cdot \frac{dT_w(\tau)}{d\tau} \cdot d\tau \end{array} \right\}. \quad (4.22)$$

З врахуванням (4.22) знайдемо кінцевий розподіл температури в межах енергетиченої палі:

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= T_w(t) + \sum_{i=0}^{\infty} a_i(t) \cdot J_0\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right); \\ a_i(t) &= m_i \cdot \left\{ \begin{aligned} &[T_0 - T_w(0)] \cdot \exp\left(-k1 \cdot \frac{\mu_i^2}{a^2} \cdot t\right) - \\ &-\int_0^t \exp\left[-k1 \cdot \frac{\mu_i^2}{a^2} \cdot (t - \tau)\right] \cdot \frac{dT_w(\tau)}{d\tau} \cdot d\tau \end{aligned} \right\}; \\ m_i &= \frac{\int_0^a J_0\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right) \cdot r \cdot dr}{\int_0^a J_0^2\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right) \cdot r \cdot dr} \end{aligned} \right\} \quad (4.23)$$

Практичний інтерес представляє випадок, коли температура не змінюється в часі. В цьому випадку (4.23) прийме вигляд:

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= T_w + \sum_{i=0}^{\infty} a_i(t) \cdot J_0\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right); \\ a_i(t) &= m_i \cdot (T_0 - T_w) \cdot \exp\left(-k1 \cdot \frac{\mu_i^2}{a^2} \cdot t\right); \\ m_i &= \int_0^a J_0\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right) \cdot r \cdot dr / \int_0^a J_0^2\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right) \cdot r \cdot dr. \end{aligned} \right\} \quad (4.24)$$

Беручи до уваги, що $\sum_{i=0}^{\infty} m_i \cdot J_0\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right) = 1$, з (4.24) знайдемо:

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= \sum_{i=0}^{\infty} m_i \cdot \left\{ T_w \cdot \left[1 - \exp\left(-k1 \cdot \frac{\mu_i^2}{a^2} \cdot t\right) \right] + T_0 \cdot \exp\left(-k1 \cdot \frac{\mu_i^2}{a^2} \cdot t\right) \right\} J_0\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right); \\ m_i &= \int_0^a J_0\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right) \cdot r \cdot dr / \int_0^a J_0^2\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right) \cdot r \cdot dr. \end{aligned} \right\} \quad (4.25)$$

Ряд (4.25) сходиться дуже швидко. Тому для виконання практичних розрахунків достатньо розглянути лише перший доданок (4.25). Маємо:

$$a_1 = T_w \cdot \left[1 - \exp\left(-k_1 \cdot \frac{\mu_i^2}{a^2} \cdot t\right) \right] + T_0 \cdot \exp\left(-k_1 \cdot \frac{\mu_i^2}{a^2} \cdot t\right). \quad (4.26)$$

При вирішенні практичних задач важливо знати, за який час температура основи буде дорівнювати нулю. Цей час приблизно може досягатись при виконанні умови $a_1 = 0$, звідки:

$$t_{крит} = -\frac{0,1724 \cdot a^2}{k_1} \cdot \ln\left(\frac{T_w}{T_w - T_0}\right). \quad (4.27)$$

Тут $t_{крит}$ – критичний час, після якого починається промерзання матеріалу енергетичних паль.

4.1.2. Розподіл температури в прилеглому до енергетичної палі ґрунті. Критичний час охолодження основи.

Далі знайдемо розподіл температури в прилеглому до палі ґрунті (друге рівняння системи (4.11), а також початкові та граничні умови (4.13)).

Для вирішення задачі використовуємо варіаційний метод Бубнова – Гальоркіна [36]. Пробне рішення $T_{1,0}$ приймемо у вигляді:

$$T_{1,0} = T_w(t). \quad (4.28)$$

Цей розв'язок точно задовільняє граничні умови, але не задовільняє верхнє рівняння 3.11.

Коректуючий розв'язок приймаємо у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} T_{1,r} &= \sum_{i=0}^{\infty} a_i(t) \cdot \psi_i(r); \\ \psi_i(r) &= J_0(\mu_i \cdot r) \cdot Y_0(\mu_i \cdot a) - Y_0(\mu_i \cdot r) \cdot J_0(\mu_i \cdot a); \end{aligned} \right\}, \quad (4.29)$$

де $a_i(t)$ - деякі функції часу, які необхідно визначити; $J_0(\mu_i \cdot r)$ - функція Бесселя першого роду із нульовим індексом; $Y_0(\mu_i \cdot r)$ - функція Неймана

першого роду із нульовим індексом; μ_i - корені рівняння $-x \cdot J_1(x \cdot b) \cdot Y_0(x \cdot a) + x \cdot Y_1(x \cdot b) \cdot J_0(x \cdot a) = 0$.

Функції $\psi_i(r)$ точно задовільняють нульові граничні умови:

$$\left. \begin{aligned} \lim_{r=a} [\psi_i(r)] &= \lim_{r=a} [J_0(\mu_i \cdot r) \cdot Y_0(\mu_i \cdot a) - Y_0(\mu_i \cdot r) \cdot J_0(\mu_i \cdot a)] \equiv 0; \\ \lim_{r=b} \left[\frac{\partial}{\partial r} [\psi_i(r)] \right] &= \lim_{r=b} \left\langle \begin{array}{l} -\mu_i \cdot J_1(\mu_i \cdot b) \cdot Y_0(\mu_i \cdot a) + \\ + \mu_i \cdot Y_1(\mu_i \cdot b) \cdot J_0(\mu_i \cdot a) \end{array} \right\rangle \equiv 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.30)$$

З урахуванням (4.28) і (4.29) роз'язок рівняння шукаємо у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= T_{1,0} + T_{1,r} = T_w(t) + \sum_{i=0}^{\infty} a_i(t) \cdot \psi_i(r); \\ \psi_i(r) &= J_0(\mu_i \cdot r) \cdot Y_0(\mu_i \cdot a) - Y_0(\mu_i \cdot r) \cdot J_0(\mu_i \cdot a). \end{aligned} \right\} \quad (4.31)$$

Далі підставимо (4.31) в друге рівняння (4.11), помножимо обидві частини отриманої таким чином рівності на функцію $\psi_j(r)$ та проінтегруємо на інтервалі $r \in (a, b)$.

Враховуючи, що при $i \neq j$ $\int_a^b \psi_i(r) \cdot \psi_j(r) \cdot r \cdot dr = 0$, а при $i = j$

$\int_a^b \psi_i(r) \cdot \psi_j(r) \cdot r \cdot dr \neq 0$ отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} \frac{da_i(t)}{dt} + k_2 \cdot \frac{\mu_i^2}{a^2} \cdot a_i(t) + m_i \cdot \frac{dT_w(t)}{dt} &= 0; \\ m_i &= \frac{\int_a^b [J_0(\mu_i \cdot r) \cdot Y_0(\mu_i \cdot a) - Y_0(\mu_i \cdot r) \cdot J_0(\mu_i \cdot a)] \cdot r \cdot dr}{\int_a^b [J_0(\mu_i \cdot r) \cdot Y_0(\mu_i \cdot a) - Y_0(\mu_i \cdot r) \cdot J_0(\mu_i \cdot a)]^2 \cdot r \cdot dr} \end{aligned} \right\} \quad (4.32)$$

Розв'язок (4.32) має вигляд:

$$a_i(t) = -m_i \cdot \int_0^t \exp[-k_2 \cdot \mu_i^2 \cdot (t - \tau)] \cdot \frac{dT_w(\tau)}{d\tau} \cdot d\tau + \left. \begin{array}{l} \\ + a_{i,0} \cdot \exp(-k_2 \cdot \mu_i^2 \cdot t) \end{array} \right\} \quad (4.33)$$

Для того, щоб задовільнити початкову умову $T_1(r, 0) = T_0$, підставимо в (4.33) $t = 0$ і, в подальшому, отриману таким чином суму прирівняємо до початкової температури T_0 . Отримаємо:

$$T_1(r, 0) = T_w(0) + \sum_{i=0}^{\infty} a_{i,0} \cdot J_0\left(\mu_i \cdot \frac{r}{a}\right) = T_0,$$

звідки:

$$\sum_{i=0}^{\infty} a_{i,0} \cdot [J_0(\mu_i \cdot r) \cdot Y_0(\mu_i \cdot a) - Y_0(\mu_i \cdot r) \cdot J_0(\mu_i \cdot a)] = T_0 - T_w(0). \quad (4.34)$$

Далі помножимо обидві частини рівності (4.34) на множник $r \cdot [J_0(\mu_i \cdot r) \cdot Y_0(\mu_i \cdot a) - Y_0(\mu_i \cdot r) \cdot J_0(\mu_i \cdot a)]$ та проінтегруємо отриманий таким чином вираз на інтервалі $r \in (a, b)$. Маємо:

$$\begin{aligned} a_{i,0} \cdot \int_0^a [J_0(\mu_i \cdot r) \cdot Y_0(\mu_i \cdot a) - Y_0(\mu_i \cdot r) \cdot J_0(\mu_i \cdot a)]^2 \cdot r \cdot dr = \\ = [T_0 - T_w(0)] \cdot \int_0^a [J_0(\mu_i \cdot r) \cdot Y_0(\mu_i \cdot a) - Y_0(\mu_i \cdot r) \cdot J_0(\mu_i \cdot a)] \cdot r \cdot dr \end{aligned}$$

Звідки:

$$a_{i,0} = [T_0 - T_w(0)] \cdot \frac{\int_0^a [J_0(\mu_i \cdot r) \cdot Y_0(\mu_i \cdot a) - Y_0(\mu_i \cdot r) \cdot J_0(\mu_i \cdot a)] \cdot r \cdot dr}{\int_0^a [J_0(\mu_i \cdot r) \cdot Y_0(\mu_i \cdot a) - Y_0(\mu_i \cdot r) \cdot J_0(\mu_i \cdot a)]^2 \cdot r \cdot dr} = \left. \begin{array}{l} \\ = m_i \cdot [T_0 - T_w(0)] \end{array} \right\} \quad (4.35)$$

З врахуванням (4.35) функції (4.33) приймуть вигляд:

$$a_i(t) = m_i \cdot \left\{ \begin{array}{l} [T_0 - T_w(0)] \cdot \exp(-k_2 \cdot \mu_i^2 \cdot t) - \\ - \int_0^t \exp[-k_2 \cdot \mu_i^2 \cdot (t - \tau)] \cdot \frac{dT_w(\tau)}{d\tau} \cdot d\tau \end{array} \right\}. \quad (4.36)$$

Враховуючи (4.36), знаходимо кінцевий розподіл температури в прилеглому до енергетичної палі ґрунті:

$$\left. \begin{array}{l} T_1 = T_w(t) + \sum_{i=0}^{\infty} a_i(t) \cdot \psi_i(r); \quad m_i = \int_0^a \psi_i(r) \cdot r \cdot dr \bigg/ \int_0^a \psi_i^2(r) \cdot r \cdot dr; \\ a_i(t) = m_i \cdot \left\{ \begin{array}{l} [T_0 - T_w(0)] \cdot \exp(-k_2 \cdot \mu_i^2 \cdot t) - \\ - \int_0^t \exp[-k_2 \cdot \mu_i^2 \cdot (t - \tau)] \cdot \frac{dT_w(\tau)}{d\tau} \cdot d\tau \end{array} \right\}; \\ \psi_i(r) = J_0(\mu_i \cdot r) \cdot Y_0(\mu_i \cdot a) - Y_0(\mu_i \cdot r) \cdot J_0(\mu_i \cdot a). \end{array} \right\}. \quad (4.37)$$

Практичний інтерес представляє випадок, коли температура теплоносія T_w не змінюється в часі. В цьому випадку (4.37) прийме вигляд:

$$\left. \begin{aligned}
 T_1 &= T_w + \sum_{i=0}^{\infty} a_i(t) \cdot \psi_i(r); \\
 a_i(t) &= m_i \cdot (T_0 - T_w) \cdot \exp(-k_2 \cdot \mu_i^2 \cdot t); \\
 m_i &= \int_0^a \psi_i(r) \cdot r \cdot dr \bigg/ \int_0^a \psi_i^2(r) \cdot r \cdot dr; \\
 \psi_i(r) &= J_0(\mu_i \cdot r) \cdot Y_0(\mu_i \cdot a) - Y_0(\mu_i \cdot r) \cdot J_0(\mu_i \cdot a).
 \end{aligned} \right\} \quad (4.38)$$

Враховуючи, що $\sum_{i=0}^{\infty} m_i \cdot \psi_i(r) = 1$, із (4.38) знайдемо:

$$\left. \begin{aligned}
 T_1 &= \sum_{i=0}^{\infty} m_i \cdot \left\{ T_w \cdot \left[1 - \exp(-k_2 \cdot \mu_i^2 \cdot t) \right] + T_0 \cdot \exp(-k_2 \cdot \mu_i^2 \cdot t) \right\} \psi_i(r); \\
 m_i &= \int_a^b \psi_i(r) \cdot r \cdot dr \bigg/ \int_a^b \psi_i^2(r) \cdot r \cdot dr; \\
 \psi_i(r) &= J_0(\mu_i \cdot r) \cdot Y_0(\mu_i \cdot a) - Y_0(\mu_i \cdot r) \cdot J_0(\mu_i \cdot a).
 \end{aligned} \right\} \quad (4.38)$$

Ряд (4.38) зводиться дуже швидко. Тому для виконання практичних розрахунків достатньо розглянути лише перший доданок (4.25). Маємо:

$$a_1 = T_w \cdot \left[1 - \exp(-k_2 \cdot \mu_1^2 \cdot t) \right] + T_0 \cdot \exp(-k_2 \cdot \mu_1^2 \cdot t). \quad (4.39)$$

При вирішенні практичних задач важливо знати, за який час температура основи буде рівна нулю. Цей час приблизно може досягатись при виконанні умови $a_1 = 0$, звідки:

$$t_{крит} = -\frac{1}{k_1 \cdot \mu_1^2} \cdot \ln\left(\frac{T_w}{T_w - T_0}\right). \quad (4.40)$$

Тут $t_{крит}$ - критичний час, після якого починається промерзання основи енергетичних паль, а μ_1 – перший (тобто найменший по модулю) корінь рівняння $-x \cdot J_1(x \cdot b) \cdot Y_0(x \cdot a) + x \cdot Y_1(x \cdot b) \cdot J_0(x \cdot a) = 0$.

Рівності (4.27) і (4.40) дозволяють визначити критичний час, при якому починається промерзання основи. Протягом цього часу можлива від’ємна температура теплоносія в колекторі теплового насосу.

4.2. Методика визначення несучої здатності енергетичних паль.

У даному підрозділі викладено методику визначення несучої здатності енергетичних паль.

Змістом цієї методики є наступне.

1. Визначення несучої здатності енергетичних паль необхідно виконувати з використанням рекомендацій діючих у даний час на території України державних будівельних норм [15].

При цьому слід враховувати наведені нижче рекомендації.

2. Допускається визначення несучої здатність за даними натурних випробувань паль та розрахунковим шляхом.

При цьому натурні випробування паль є основними.

3. При проведенні натурних випробувань паль слід забезпечити можливість контрольованого заморожування та відтаювання основи.

Можливі два варіанти випробувань.

3.1. У першому випадку слід провести проектну кількість циклів заморожування – відтаювання, а далі визначити несучу здатність палі за методикою діючих у даний час на території України державних будівельних норм [13-24]. На цьому етапі слід визначити несучу здатність палі $F_{d,t}$.

Крім того, для порівняння результатів, потрібно провести випробування палі в основі з природною температурою. На цьому етапі слід визначити несучу здатність палі F_d .

Коефіцієнт зниження несучої здатності $k_{зн}$ слід розраховувати як співвідношення несучих здатностей палі після проведення проектної кількості циклів заморожування – відтаювання $F_{d,t}$ до визначеної в ході випробувань палі в основі з природною температурою несучої здатності F_d

за формулою $k_{зн} = \frac{F_{d,t}}{F_d}$, а несучу здатність палі – за формулою:

$$F_{d,t} = k_{зн} \cdot F_d. \quad (4.41)$$

Якщо кількість випробуваних палі перевищує 2, то для визначення коефіцієнту $k_{зн}$ слід використовувати рекомендовані у нормативних документах методи математичної статистики.

Коефіцієнт $k_{зн}$ слід використовувати при розрахунку енергетичних палі за першою групою граничних станів.

3.2. В другому випадку потрібно провести випробування декількох палі згідно з методикою, представленою в пункті 3.1 та на основі цих даних в системі координат «Несуча здатність палі – кількість циклів заморожування – відтаювання» визначити тенденцію зміни несучої здатності палі (рис. 4.3).

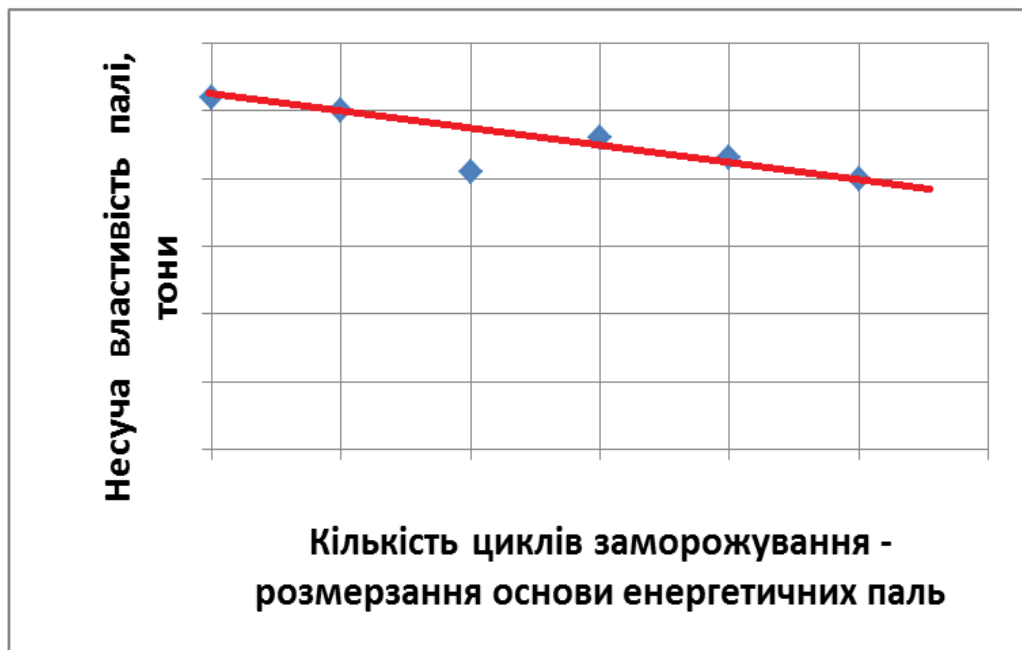


Рис. 4.3. Залежність несучої здатності палі від кількості циклів заморожування – відтаювання (схема).

На основі цих даних за допомогою методів математичної статистики необхідно отримати аналітичну залежність несучої здатності палі від кількості циклів заморожування – відтаювання $F_{dt}(n)$.

Допускається використання функціональної залежності $F_{dt}(n)$ для екстраполяції результатів випробувань на половину десятичного порядку.

У даному випадку коефіцієнт зниження несучої здатності енергетичних палей по ґрунту необхідно розраховувати за формулою $k_{zn} = \frac{F_{d,t}(n)}{F_d}$, а несучу

здатність палі – за допомогою формули:

$$F_{d,t}(n) = k_{zn} \cdot F_d \quad (4.42)$$

Тут k_{zn} - 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.

Коефіцієнт $k_{зн}$ слід використовувати при розрахунку енергетичних паль за першою групою граничних станів.

4. Розрахунок несучої здатності енергетичних паль потрібно виконувати за першою групою граничних станів.

4.1. Для того, щоб визначити, за якою схемою необхідно розраховувати несучу здатність палі по матеріалу і ґрунту, попередньо необхідно оцінити час промерзання основи.

4.1.1. Критичний час промерзання матеріалу слід визначати за допомогою формули:

$$t_{крит} = -\frac{0,1724 \cdot a^2}{k_1} \cdot \ln\left(\frac{T_w}{T_w - T_0}\right), \quad (4.43)$$

де a - діаметр круглої або сторона квадратної палі; T_0 - проектна температура основи; T_w - проектна температура теплоносія.

Якщо виконується умова $t_{кр,mat} \leq 0$, то розрахунок несучої здатності палі по матеріалу необхідно виконувати за звичайною методикою [13-15, 64, 69-71].

4.1.2. Критичний час промерзання основи слід визначати за допомогою формули:

$$t_{кр.зр} = -\frac{1}{k_1 \cdot \mu_1^2} \cdot \ln\left(\frac{T_w}{T_w - T_0}\right), \quad (4.44)$$

де μ_1 - найменший (за модулем) корінь рівняння $-x \cdot J_1(x \cdot b) \cdot Y_0(x \cdot a) + x \cdot Y_1(x \cdot b) \cdot J_0(x \cdot a) = 0$; a - діаметр круглої або сторона квадратної палі; b - відстань між сусідніми палями в осях; T_0 - проектна температура основи; T_w - проектна температура теплоносія.

Якщо виконується умова $t_{кр,зр} \leq 0$, то розрахунок несучої здатності палі по ґрунту необхідно виконувати за звичайною методикою [13-15, 69-71].

5. Під час розрахунку за першою групою граничних станів необхідно виконати умову:

$$F \leq F_u, \quad (4.45)$$

де F – навантаження, яке діє на основу чи фундамент, а F_u – її граничне значення.

5.1. Як розрахункові, треба приймати розрахункові характеристики ґрунту, визначені в інтервалі ймовірності $\alpha = 0,95$.

5.2. Визначення міцнісних характеристик ґрунту необхідно проводити з врахуванням їх зниження під час заморожування - відтаювання ґрунту.

Для цього необхідно використовувати експериментальні залежності міцності ґрунту на зсув від кількості циклів заморожування – відтаювання ґрунту.

5.3. Під час визначення несучої здатності висячих палей F_d необхідно враховувати зниження їх несучої здатності по її бічній поверхні та під вістрям під час заморожуванням - відтаювання ґрунту. Для цього потрібно використовувати схему на рис. 3.4 та таку модифіковану формулу ДБН [15]:

$$F_d = \gamma_c \cdot \left\{ k_{zn,R} \cdot \gamma_{cR} \cdot R \cdot A + U \cdot \sum_{i=1}^n k_{znf,i} \cdot \gamma_{cf,i} \cdot f_i \cdot h_i \right\}, \quad (4.46)$$

де γ_c - коефіцієнт умов роботи палей в ґрунті;

R - розрахунковий опір ґрунту під нижнім кінцем палей, кПа;

A - площа опирання палей на ґрунт, м²;

U - зовнішній периметр поперечного перерізу палей, м;

f_i - розрахунковий опір i -го шару ґрунту основи на бічній поверхні палей, кПа;

h_i - товщина i -го шару ґрунту, дотичного з бічною поверхнею палей, м;

n - кількість ґрунтових шарів з різними властивостями на інтервалі глибин від вістря до голови палей;

γ_{cR} та γ_{cf} - коефіцієнти умов роботи ґрунту відповідно під нижнім кінцем і на бічній поверхні палей, що враховують вплив способу занурення

палі на розрахункові опори ґрунту.

Тут $k_{зн,R}$ - коефіцієнт зниження несучої здатності ґрунту під вістрям палі, обумовлений циклічним заморожуванням - відтаюванням прилеглого до нього ґрунту; $k_{знf,i}$ - коефіцієнт зниження несучої здатності i -того шару ґрунту по боковій поверхні палі, обумовлений циклічним заморожуванням - відтаюванням прилеглого до неї ґрунту.

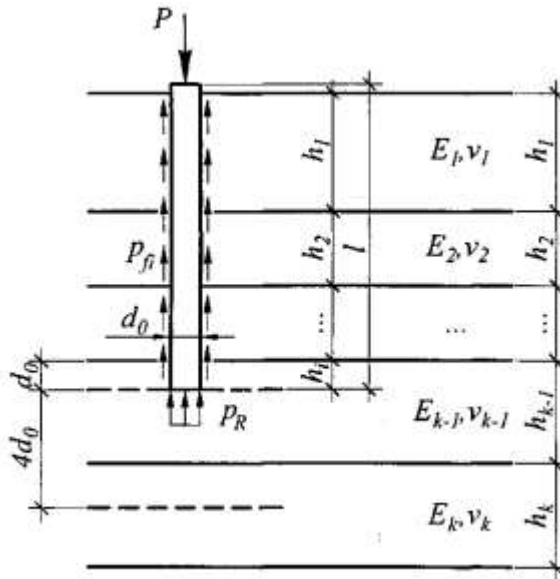


Рис. 4.4.. Розрахункова схема для визначення несучої здатності та осідання
одиначної палі

Коефіцієнти $k_{зн,R}$ та $k_{знf,i}$ слід визначати за наведеною у другому розділі методикою та розраховувати за емпіричними формулами:

$$k_{зн} = \begin{cases} a + b \cdot n, \\ \text{або} \\ a_1 \cdot \exp(-b_1 \cdot t). \end{cases}, \quad (4.47)$$

де a, b, a_1 та b_1 - емпіричні коефіцієнти, які потрібно визначати за наведеною на рис. 4.5 схемою.

Для попередніх розрахунків несучої здатності палі розрахунковий опір i -го шару ґрунту основи на бічній поверхні палі f_i допускається приймати за таблицею 4.1 даного розділу.

З цією метою також допускається використовувати критерій міцності Кулона – Мора:

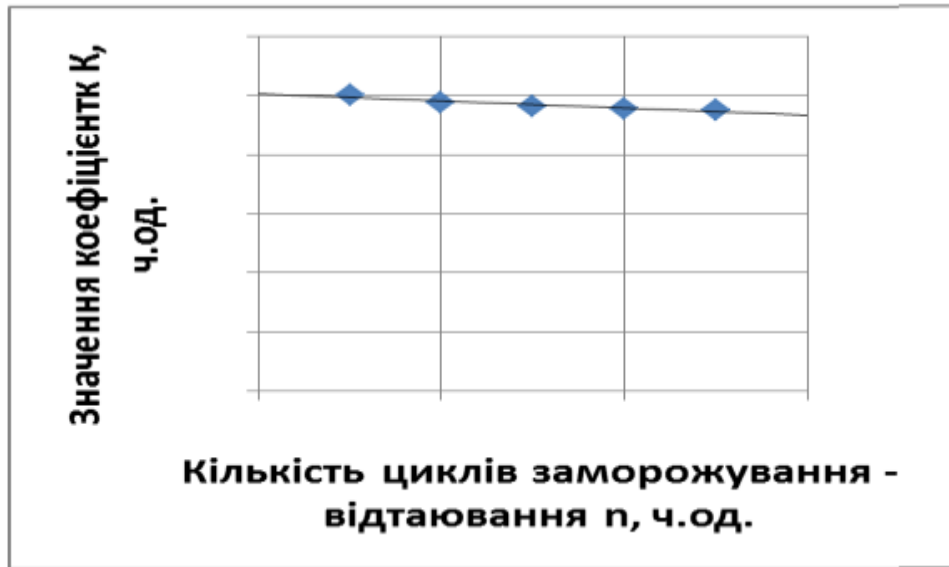


Рис. 4.5. Схема до визначення залежностей (4.47).

Примітка.

Окремі значення коефіцієнту K – це відношення міцності ґрунту після n циклів заморожування – відтаювання до міцності ґрунту в природному стані.

Таблиця 4.1.

Розрахунковий опір ґрунту по бічній поверхні палі

Середня глибина розташування шару ґрунту, м	Розрахункові опори на бічній поверхні забивних паль і паль-оболонки f_i , кПа								
	піщаних ґрунтів середньої щільності								
	крупних і середньої крупності	дрібних	пилуватих	–	–	–	–	–	–
	глинистих ґрунтів при показнику текучості I_L								
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1	35	23	15	12	8	4	4	3	2
2	42	30	21	17	12	7	5	4	4
3	48	35	25	20	14	8	7	6	5
4	53	38	27	22	16	9	8	7	5
5	56	40	29	24	17	10	8	7	6
6	58	42	31	25	18	10	8	7	6
8	62	44	33	26	19	10	8	7	6
10	65	46	34	27	19	10	8	7	6
15	72	51	38	28	20	11	8	7	6
20	79	56	41	30	20	12	8	7	6
25	86	61	44	32	20	12	8	7	6
30	93	66	47	34	21	12	9	8	7
35	100	70	50	36	22	13	9	8	7

Таблиця 4.2.

Розрахунковий опір ґрунту під вістрям палі

Глибина занурення нижнього кінця палі, м	Розрахункові опори під нижнім кінцем забивних палей і палей-оболонки, що занурюються без виймання ґрунту, R, кПа						
	піщаних ґрунтів середньої щільності						
	гравелистих	крупних	–	середньої крупності	дрібних	пилувати х	–
	глинистих ґрунтів при показнику текучості I_L						
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
3	7500	6600	3000	3100	2000	1100	600
		4000		2000	1200		
4	8300	6800	3800	3200	2100	1250	700
		5100		2500	1600		
5	8800	7000	4000	3400	2200	1300	800
		6200		2800	2000		
7	9700	7300	4300	3700	2400	1400	850
		6900		3300	2200		
10	10500	7700	5000	4000	2600	1500	900
		7300		3500	2400		
15	11700	8200	5600	4400	2900	1650	1000
		7500		4000			
20	12600	8500	6200	4800	3200	1800	1100
				4500			
25	13400	9000	6800	5200	3500	1950	1200
30	14200	9500	7400	5600	3800	2100	1300
35	15000	10000	8000	6000	4100	2250	1400

Примітка 1. Значення R над рискою наведені для піщаних ґрунтів, під рискою – для глинистих.

$$f_i = \sigma_i \cdot \operatorname{tg}(\varphi_i) + c_i \quad (4.48)$$

Тут σ_i - тиск спокою посередині i - того шару ґрунту; φ_i та c_i - міцнісні константи критерію міцності Кулона – Мора (кут внутрішнього тертя та питоме зчеплення відповідно).

Тиск спокою слід визначати за формулою:

$$\sigma_i = \frac{\nu_i}{1 - \nu_i} \cdot \sigma_{z,i} \quad (4.49)$$

де $\sigma_{z,i}$ - вертикальний тиск від власної ваги ґрунту та навантаження на даній поверхні i - того шару ґрунту; ν_i - коефіцієнт Пуассона i - того шару ґрунту.

Для більш точних розрахунків необхідно використовувати поліноміальний критерій міцності ґрунту у вигляді:

$$f_i = a_{0,i} + a_{1,i} \cdot \sigma + a_{3,i} \cdot \sigma^2, \quad (4.50)$$

де $a_{0,i}$, $a_{1,i}$ та $a_{3,i}$ - матеріальні константи поліноміального критерію міцності.

6. У разі заморожування основи необхідно враховувати зниження коефіцієнта фільтрації, внаслідок чого можливе підняття рівня підземних вод і додаткове обводнення основи.

7. У випадку розміщення колекторів теплових насосів всередині залізобетонних фундаментів та їхніх елементів, для сприйняття додаткових зусиль, зумовлених різницею коефіцієнтів температурного розширення, необхідно встановити додаткові арматурні каркаси.

8. Допускається виконувати сумісний розрахунок напружено-деформованого стану системи «основа, в якій розміщений колектор теплового насосу – фундамент – надфундаментна споруда».

Для цього доцільно використовувати стандартні програмні комплекси, наприклад, «Ліра », «СКАД» тощо, призначені для врахування температурних деформацій, або інші методи розрахунку [2, 3, 10, 11, 12, 29, 45, 46, 55].

4.3. Результати перевірки результатів досліджень на адекватність експерименту.

Наведена у підрозділі 4.2 методика визначення несучої здатності паль потребує підтвердження експериментальними та теоретичними дослідженнями.

На це і спрямовані викладені у даному підрозділі матеріали досліджень.

Спочатку було виконано перевірку представлену в пункті 4, методику врахування несучої здатності паль при циклічному заморожуванні –

відтаюванні ґрунту та представлені в розділі 3 експериментальні дані (табл. 3.4).

Результати перевірки наведені в табл. 4.3 та на рис. 4.6 і 4.7.

Таблиця 4.3

Фактичні та розрахункові значення несучої здатності палі, визначені за допомогою польових випробувань

№ З.п.	Кількість циклів заморожування- відтаювання, одиниці	0	1	2	3	4	5
1	Фактична несуча здатність палі, тонни	2,52	2,50	2,41	2,46	2,43	2,40
2	Несуча здатність, розрахована за формулою 4.41: $\left(k_{zn} = 1 - \frac{2,52 - 2,40}{5} \cdot n \right)$, тонни	2,52	2,46	2,40	2,34	2,28	2,22
3	Несуча здатність, розрахована за формулою 4.42 і лінійною залежністю (4.6), тонни	2,51	2,49	2,46	2,44	2,42	2,40
4	Несуча здатність, розрахована за формулою 4.42 і лінійною залежністю (4.7), тонни	2,51	2,48	2,46	2,44	2,42	2,40
5	Відносна похибка між даними в рядках 1 і 2, відсотки	0,00	1,62	0,45	4,94	6,25	7,60
6	Відносна похибка між даними в рядках 1 і 3, відсотки	0,49	0,56	2,25	0,71	0,38	0,04
7	Відносна похибка між даними в рядках 1 і 4, відсотки	0,52	0,62	2,17	0,80	0,48	0,14

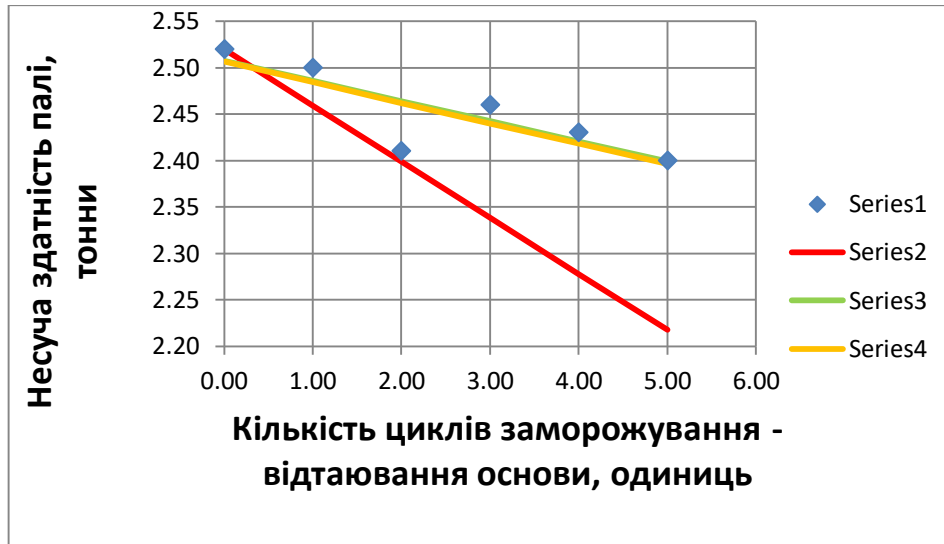


Рис. 4.6. Залежності несучої здатності палі від кількості циклів заморожування – відтаювання.

Примітки.

На рис. 4.6 прийняті такі позначення. Ряд 1 – дослід; 2 – розрахунок за формулою (4.41); ряд 3 – за формулою (4.42) і лінійною залежністю (4.6); ряд 4 – за формулою (4.42) і лінійною залежністю (4.7).

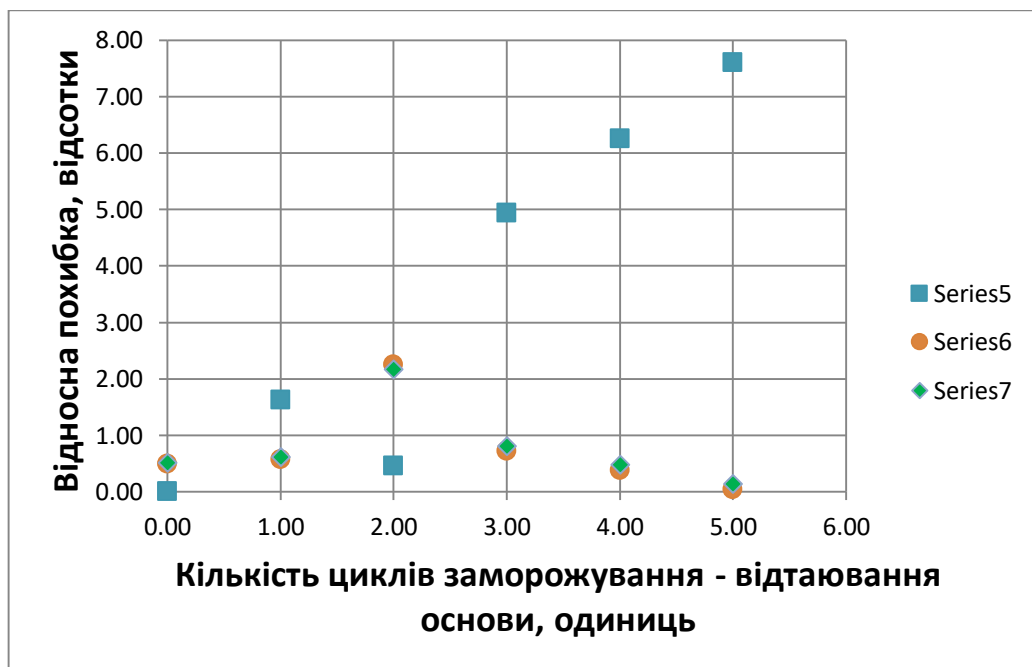


Рис. 4.7 Розбіжність між фактичною і розрахунковою несучою здатністю палі.

Примітки.

1. Даний рисунок необхідно розглядати спільно із табл. 4.3.
2. На рис. 4.7. прийнято такі позначення.

Ряд 2 – Відносна похибка між даними в рядках 1 і 2; ряд 6 – те саме, між даними в рядках 1 і 3; ряд 7 – те саме, між даними в рядках 1 і 4.

Представлені в табл. 4.3, а також на рис. 4.7 і 4.8 дані дозволили зробити висновок про те, що найбільш точним є викладений в підрозділі 4.2 варіант визначення несучої здатності палі.

Після цього було виконано перевірку запропонованої нами розрахункової методики визначення несучої здатності палі при циклічному заморожуванні – відтаюванні ґрунту (формули (4.46)-(4.50) і наведені в розділі 3 експериментальні дані (табл. 3.4)).

Результати перевірки наведені в табл. 4.4 та на рис. 4.8 і 4.9.

Таблиця 4.4

Фактичні та розрахункові значення несучої здатності палі, визначені за допомогою польових випробувань

№ З.п.	Кількість циклів заморожування- відтаювання, одиниці	0	1	2	3	4	5
1	Фактична несуча здатність палі, тонни	2,52	2,50	2,41	2,46	2,43	2,40
2	Несуча здатність, розрахована за формулами (4.46) – (4.49) і залежності (4.4), тонни	2,70	2,65	2,60	2,54	2,49	2,44
3	Несуча здатність, розрахована за формулою (4.50) і лінійною залежністю (4.4), тонни	2,40	2,35	2,31	2,26	2,21	2,17
4	Відносна похибка між даними в рядках 1 і 2, відсотки	7,14	5,92	7,71	3,40	2,53	1,64
5	Відносна похибка між даними в рядках 1 і 3, відсотки	4,76	5,85	4,26	8,09	8,86	9,65

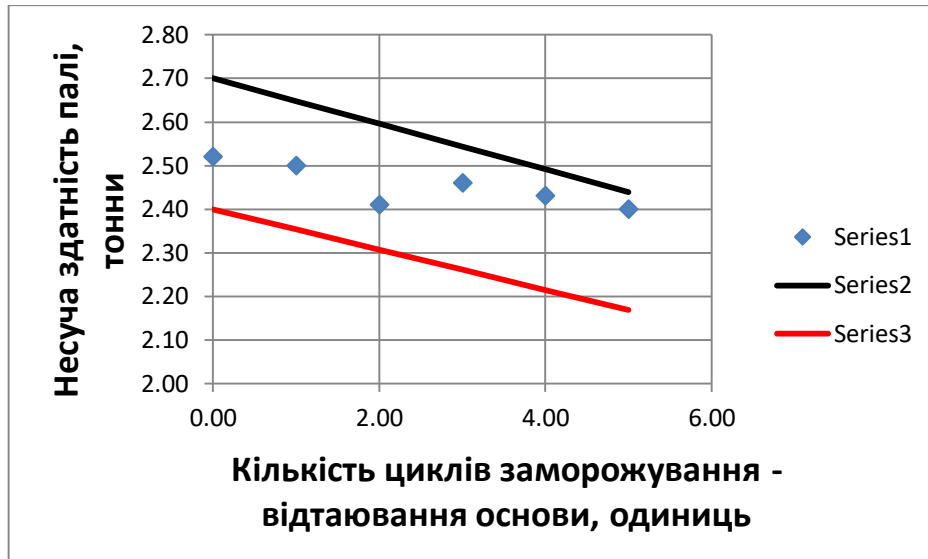


Рис. 4.8. Залежності несучої здатності паль від кількості циклів заморожування – відтаювання.

Примітки.

На рис. 4.8 прийнято такі позначення.

Ряд 1 – дослід; 2 – розрахунок за методикою ДБН; ряд 3 – те саме, із врахуванням нелінійності міцнісних властивостей ґрунту.

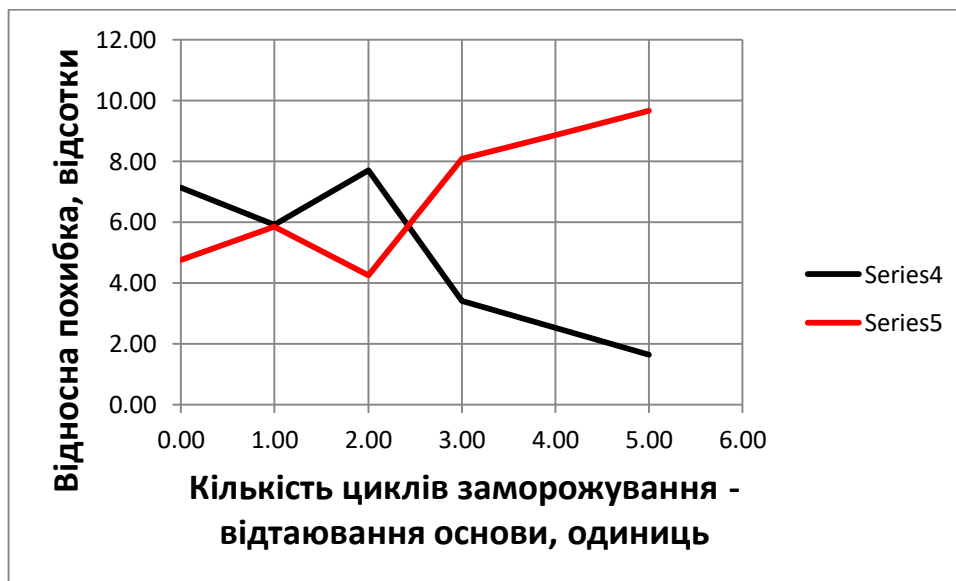


Рис. 4.9 Розбіжність між фактичною та розрахунковою несучою здатністю паль.

Примітки.

1. Даний рисунок необхідно розглядати спільно із табл. 4.4.

2. На рис. 4.9 прийнято такі позначення.

Ряд 4 – відносна похибка між даними в рядках 1 і 2; ряд 5 – те саме, між даними в рядках 1 і 3.

Наведені в табл. 4.4, а також на рис. 4.8 і 4.9 дані дозволяють зробити висновок про те, що відмінність між несучою здатністю паль, розрахованою із врахуванням та без врахування фізичної нелінійності ґрунту, виявились близькими за значенням.

При цьому, представлені у даному розділі матеріали досліджень дозволяють зробити висновок про те, що заснована на польових випробуваннях паль методика дозволяє отримати точніші значення несучої здатності паль, ніж розрахункові методи.

Останній результат відповідає сучасним поглядам про різні методи визначення міцності та несучої здатності основ і фундаментів.

4.4. Висновки за розділом 4.

Представлені в даному розділі матеріали досліджень дозволили зробити такі висновки:

1. Отримано аналітичний розв'язок задачі про розподіл температури в основі енергетичних паль. На основі цього отримано формули, необхідні для визначення критичного часу замерзання основи.

2. Розроблена польова методика визначення несучої здатності енергетичних паль при циклічному заморожуванні – відтаюванні основи.

3. Уточнена розрахункова методика визначення несучої здатності енергетичних паль при циклічному заморожуванні – відтаюванні основи.

4. Виконана перевірка запропонованих нами методик на адекватність експериментальним даним. Зроблено висновок про задовільну відповідність експериментальних та теоретичних даних.

5. Впровадження результатів досліджень щодо поєднання колектора теплового насоса з пальовим фундаментом з висячих паль було виконано на ТзОВ «ЛЬВІВКОМПЛЕКСБУД» (м. Львів, вул. Авіаційна, 7) та ТзОВ «ЗАВОД ЕЛЕКТРОНПОБУТПРИЛАД» (м. Львів, вул. Зелена, 251) (Додаток А, Б).

ВИСНОВКИ ЗА РОБОТОЮ

1. Показано, що застосування енергетичних паль в якості несучих конструкцій і елементів опалювальних приладів одночасно є перспективним. Про це свідчать світові тенденції будівництва та експлуатації будівель і споруд.

2. Під час випробовувань ґрунту встановлено наступне:

2.1. Для врахування фізичної нелінійності міцнісних властивостей ґрунту найбільш доцільним є поліноміальний критерій міцності.

2.2. 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.

2.3. 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. Розроблено 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 високий рівень відповідності із результатами натурних випробувань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бартоломей Л. А. Прогноз осадок сооружений с учетом совместной работы основания, фундамента и надземных конструкций : автореф. д.т.н. : 05.23.02 / Бартоломей Леонид Адольфович. – Пермь, 2003. – 32 с.
2. Беляев Н.М. Термодинамика. - Киев: Вища школа, 1987. - 344 с.
3. Бенерджи П. К. Метод граничных элементов в прикладных науках : пер. с англ. / П. К. Бенерджи, Р. Баттерфилд. – М. : Мир, 1984. – 494 с.
4. Бойко И. П. Теоретические основы проектирования свайных фундаментов на упруго-пластическом основании / И. П. Бойко // Основания и фундаменты. – К. : Будівельник, 1985. – № 18. – С. 11–18.
5. Бойко И. П. Напряженно-деформированное состояние упругопластического, дилатирующего основания свайных фундаментов / И. П. Бойко // Основания и фундаменты.– К. : Будівельник, 1986. Вып. 19. – С. 7–9. 19.
6. Бреббия К. Методы граничных элементов / К. Бреббия, Ж. Телес, Л. Вроубел ; пер. с англ. Л. Г. Корнейчука под ред. Э. И. Григолюка. – М. : Мир, 1987. – 524 с.
7. Васильев, Г. П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев земли : монография / Г. П. Васильев. М. : Изд. дом «Граница», 2006. - 176 с.
8. Веселов, В. В. Методика расчета теплоизолированных фундаментов на сезонно промерзающих грунтах : дис. канд. техн. наук : 05.23.02 / В. В. Веселов ; Урал.гос.
9. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов. (Основные компоненты грунта и их взаимодействие) / М. Н. Гольдштейн. – Москва : Стройиздат, 1971. – 375 с
10. Городецкий А. С. Компьютерные модели конструкций / А. С. Городецкий, И. Д. Евзеров. – К. : Факт, 2005. – 344 с.

11. Городецкий А. С. Метод конечных элементов: теория и численная реализация. Программный комплекс “ЛІРА-Windows” / А. С. Городецкий, И. Д. Евзеров, Е. Б. Стрелец-Стрелецкий и др. – К. : ФАКТ, 1997. – 138 с.
12. Городецкий А. С. Метод конечных элементов: теория и численная реализация. Программный комплекс “ЛІРА-Windows” / А. С. Городецкий, И. Д. Евзеров, Е. Б. Стрелец-Стрелецкий и др. – К. : ФАКТ, 1997. – 138 с
13. ДБН В.2.1-10:2018 Основи і фундаменти будівель та споруд
14. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. Основні положення
15. ДБН В.2.1-10-2009 зміна №1 Основи та фундаменти будинків і споруд. Основні положення проектування.
16. ДБН В.2.6-98:2009 Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. проектування
17. ДБН А.2.1-1-2014 Інженерні вишукування для будівництва
18. ДБН В.2.6-31:2016 Теплова ізоляція будівель
19. ДСТУ Б В.2.1-6-2000 (ГОСТ 30672-99) ґрунти. Польові випробування загальні положення
20. ДСТУ Б В.2.1-27:2010 Сваи. Определение несущей способности по результатам полевых исследований.
21. ДСТУ Б В.2.1-2-96. Ґрунти. Класифікація.
22. ДСТУ Б В.2.1-17-2009. Ґрунти. Методи лабораторного визначення фізичних властивостей.
23. ДСТУ Б.В.2.1-4-96. Ґрунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформованості.
24. ДСТУ Б В.2.1-5-96. Ґрунти. Метод статистичної обробки результатів визначення характеристик.
25. Дудов М.Х. Собственные электростанции промышленных предприятий, малые ГЭС и ГАЭС: методические указания к практическим занятиям студентов направления подготовки 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения /Дудов М.Х. – Черкесск: БИЦ СевКавГГТА, 2014. – 198 с.

26. Закон України №30 від 01.07.94 “Про енергозбереження”.
27. Закон України №1869-IV від 24.06.2004 “Про загальнодержавну програму реформування і розвитку ЖКГ на 2004-2008 роки”
28. Захаров, А. В. Применение геотермальной энергии грунта для отопления зданий в климатических и инженерно-геологических условиях Пермского края / А. В. Захаров // Вестник гражданских инженеров. 2010. - № 2 (23). -С. 85-89.
29. *Зоценко М. Л. Сучасні проблеми пального фундаментобудування / Микола Леонідович Зоценко // Будівельні конструкції : збірник наукових праць НДІБК. – К. : 2004. – Випуск 61, т. 2. – С. 33–39.
30. Инженерно-геологические изыскания : справ, пособие / Н. Ф. Арипов и др.. М. : Недра, 1989. - 288 с.
31. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. I. Общие правила производства работ : СП 11-105-97. Введ. 1998-03-01. - М. : ПНИИИС Госстроя России, 1997.
32. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения : СНиП 11-02-96. Взамен СНиП 1.02.07-87 ; введ. 1996-11-01. - М. : ГУП ЦПП, 1997.
33. *Калинин М.И. Эффективное использование приповерхностных геотермальных ресурсов в геолого-климатических условиях центральных регионов России / М.И. Калинин, Б.Н. Хахаев, Е.П. Кудрявцев // Вестник Ярославского регионального отделения РАЕН. 2007. Т. 1. № 1. С. 20-26.
34. *Калинин М.И. Методы расчета и рекомендации по эффективному использованию приповерхностных геотермальных ресурсов в центральных регионах России / М.И. Калинин, Е.П. Кудрявцев, А.В. Баранов // Новости теплоснабжения. 2007. № 10. С. 26-33.
35. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. - М.: Высш.шк., 1985. - 480 с.
36. Корн Г. и Корн Т. Справочник по математике. - М.: Наука, 1974. - 840 с.

37. Крутов, В. И. Техническая термодинамика: учебник для вузов / В. И. Крутов. 2-е изд., перераб. и доп. -М. : Высш. шк., 1981. - 439 с.
38. Курнышев, В. И. Техническая термодинамика и теплопередача : учебник для вузов / В. И. Курнышев, В. И. Лебедев, В. А. Павленко. М. : Строй-издат, 1986.-464 с.
39. 4. Литвинский Г.Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов. - Монография/ДонГТУ. -Донецк: Норд-Пресс, 2008. - 207 с.
40. Лысков, А. В. Тепломассообмен : справочник / А. В. Лысков. 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Энергоиздат, 1978. - 480 с.
41. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. М. : Высш. шк., 1967.-599 с.
42. Маслов, Н. Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов : учебник для вузов / Н. Н. Маслов. М. : Высш. шк., 1982. - 511 с.
43. Математические методы и планирование эксперимента в грунтоведении и инженерной геологии / Кнатько В. М., Руднева И. Е., Баринов Е. Н., Чижевский Ю. С. Л. : Ленингр. ун-т, 1983. - 112 с.
44. Мейз Дж. Теория и задачи механики сплошных сред / Дж. Мейз. – М. : Мир, 1974. – 318 с. 67.
45. Моргун А. С. Застосування методу граничних елементів у розрахунку паль в пластичному середовищі ґрунту : монографія / А. С. Моргун. – Вінниця : Універсум-Вінниця, 2001. – 64 с.
46. *Моргун А. С. Комп'ютерні технології розрахунку фундаментних конструкцій на основі методу граничних елементів : монографія / А. С. Моргун, І. М. Меть, А. В. Ніцевич. – Вінниця : ВНТУ, 2009. – 162 с.
47. Моркляник Б. В. Закономірності деформування геомеханічної системи "фундамент - ґрунтовий масив" в зоні дії колектора теплового насоса [Текст] : автореф. дис.... д-ра техн. наук : 05.15.09 / Моркляник Богдан Васильович ; Держ. ВНЗ "Нац. гірн. ун-т". - Дніпропетровськ, 2015. - 32 с. : рис.

48. Наказ Держкомбуду України №5 від 10.01.1995 “Про реалізацію заходів про впровадженню у проектуванні та житлово – цивільному будівництві енергоефективних огорожуючих споруд”.
49. Наказ Держкомітету України з енергозбереження №10 від 06.03.96 “Про типові положення про підрозділ з енергозбереження в галузевому міністерстві і відомстві”.
50. Наказ Мінохорони навколишнього природного середовища та ядерної безпеки України №55 від 07.06.95 “Про затвердження інструкції про здійснення державної екологічної експертизи”
51. Наказ Державного комітету України з знергозбереження №78 від 15.09.1999 “Про затвердження порядку організації та проведення енергетичних обстежень бюджетних установ, організацій та казенних підприємств”
52. Наказ Держкомбуду України №131 від 26.09.1998 “Про створення центру з енергозбереження в будіндустрії і промисловості будівельних матеріалів при Держбуді України”
53. Невзоров, А. Л. Фундаменты на сезоннопромерзающих грунтах : учеб.пособие / А. Л. Невзоров. М. : Изд-во АСВ, 2000. - 156 с.
54. Новацкий В. Теория упругости. - М.: Мир, - 1975. - 872 с.
55. Одэн Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред / Дж. Одэн. – М. : Мир, 1976. – 464 с
56. Пономарев А.Б., Атаманов А.А. Энергетические фундаменты.// Строительная наука и техника.- 2008. -№4, с. 57-61.
57. Популярная механика, №8 (70). - М., 2008. - с. 78...81.
58. Популярная механика, №7 (45). - М., 2006. - с. 28-30.
59. Популярная механика, №5 (67). - М., 2008. - с. 89-91.
60. Применение тепловых насосов в многоэтажном строительстве. Электронный ресурс <http://www.geotherm.com.ua/overview/65-high-house.html>

61. Применение тепловых насосов в зданиях на свайных фундаментах. Электронный ресурс <http://www.geotherm.com.ua/overview/45-pile-foundations.html>
62. Применение тепловых насосов в логистических комплексах. Электронный ресурс <http://www.geotherm.com.ua/overview/64-logistics.html>
63. *6. Применение тепловых насосов на ТЭЦ. Электронный ресурс <http://www.geotherm.com.ua/overview/44-use-of-heat-pumps-in-chp.html>
64. Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01-83) / НИИОСП им. Герсеванова М. : Стройиздат, 1986. - 415 с.
65. Рішення НТР №49 від 15.10.2004 “Про проект середньострокових пріоритетних напрямків в будівельній галузі України на 2004-2007 роки”
66. Руководство по проектированию тепловых насосов. Viessmann Werke, Allendorf (Eder) Redaktion & Gestaltung solarcontact, Hannover – 140 с. техн. ун-т. Екатеринбург : Изд-во УГТУ-УПИ, 2003. - 148 с.
67. Семенов б. А., Соловьёв в. А. Проблемы и особенности использования грунтовых тепловых насосов для автономного теплоснабжения объектов в центральных регионах России. Электронный ресурс <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-i-osobennosti-ispolzovaniya-gruntovyh-teplovyh-nasosov-dlya-avtonomnogo-teplosnabzheniya-obektov-v-tsentralnyh-regionah>
68. Синюгин В.Ю., Магрук В., Родионов В. Гидроаккумулирующие электростанции в современной электроэнергетике. ЭНАС, 2018 – 352 с.
69. СНиП 2.02.01-83*. Основания зданий и сооружений. Взамен СНиП II-15-74, СН 475-75 ; введ. 1985-01-01. - М. : Гос. ком. СССР по делам стр-ва, 1984.- 125 с.
70. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты. Взамен СНиП II-17-77 ; введ. 1987-01-01.-М. : Госстрой, 1986.-44 с.
71. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах.- Взамен СНиП II-18-76 ; введ. 1990-01-01. М. : Госстрой СССР, 1990. - 51 с.

72. Указ Президента Украины от 08.11.2007 “О мероприятиях по строительству доступного жилья в Украине и улучшению обеспечения граждан жильем”.
73. Ухов С.Б. Механика грунтов, основания и фундаменты. С.Б. Ухов, В.В. Семенов, В.В. Знаменский и др.; Под ред. С.Б. Ухова. - 4-е изд., стер. - М.: Высш. шк., 2007. - 566 с.: ил.
74. Химическая энциклопедия. Том. 5. –М.: Издательство «Большая российская энциклопедия», - 1998, с.55-56.
75. Цытович, Н. А. Механика грунтов (краткий курс): учебник для вузов / Н. А. Цытович. 3-е изд., доп. - М. : Высш. шк., 1979. - 272 с.
76. Цытович, Н. А. Экспериментальные основы прикладной геомеханики в строительстве / Н. А. Цытович, З. Г. Тер-Мартиросян. М. : Высш. шк., 1981. - 318с.
77. Цытович, Н. А. Механика мерзлых грунтов : учеб.пособие / Н. А. Цытович. М.: Высш. шк., 1973. - 448 с.
78. Черная К. В. Использование конструкций фундаментов глубокого заложения при извлечении геотермальной энергии. //Світ геотехніки. №1, 2006, с. 27...31.
79. Шаповал В.Г., Моркляник Б.В., Шаповал А.В. О целесообразности использования грунтовых оснований в качестве накопителей тепла. //Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). Вип. 22. Полтава, 2008 – с. 138-142.
80. Шаповал В.Г. Прогноз осадок и кренов фундаментов на пылевато – глинистом основании, находящихся под воздействием статической и циклической нагрузки: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. - Днепропетровск, 1996. - 350 с
81. Шаповал, В. Г. Температура поля в грунтових основах теплових Насосів : монографія / В. Г. Шаповал, Б. В. Моркляник. Дніропетровськ : Пороги, 2011.- 123 с.

82. Шаповал, В. Г. Тепловые насосы, энергоэффективные основания и фундаменты (часть 1) / В. Г. Шаповал, Б. В. Моркляник // Світ геотехніки. - 2009.-№ 1.-С. 27-29.
83. Шаповал, В. Г. Тепловые насосы, энергоэффективные основания и фундаменты (часть 2) / В. Г. Шаповал, Б. В. Моркляник // Світ геотехніки. - 2009. № 2. - С. 28-29.
84. Шаповал, В. Г. Тепловые насосы, энергоэффективные основания и фундаменты (часть 3) / В. Г. Шаповал, Б. В. Моркляник // Світ геотехніки. - 2009.-№3.-С. 24-26.
85. Шаповал, В. Г. Тепловые насосы, энергоэффективные основания и фундаменты (часть 4) // В. Г. Шаповал, Б. В. Моркляник // Світ геотехніки. - 2009.-№4.-С. 32-33.
86. Шаповал В. Г. Основания и фундаменты тепловых насосов / В. Г. Шаповал, Б. В. Моркляник. – Львов : Сполом, 2009. – 64 с.
87. Шаповал В. Г., Иванова Г. П., Жилінська С. Р., Іваськевич О. М., Лавренюк В. М. Методика визначення нормативних та розрахункових матеріальних констант, які входять у критерій міцності О. М. Шашенка. Proceedings of the XVIII International Scientific and Practical Conference International Trends in Science and Technology October 31, 2019, Warsaw, Poland, s. 24-29.
88. Шашенко О.М., Сдвижкова О.О., Гапеев С.М. Ш 32 Деформованість та міцність масивів гірських порід: Монографія. - Д.: Національний гірничий університет, 2008. - 224 с. - Рос. мовою.2. Шашенко А. Н., Пустовойтенко В. П., Сдвижкова Е. А. Геомеханика. - К.: Новый друк, 2016
89. Энергетические сваи. Электронный ресурс <https://сахара.ua/ru/produkcija/teplo-i-vodopostachannya/uponog/geotermalni-sistemi/energetichni-svaji>
90. Энергетические сваи – тепловые насосы. Электронный ресурс <http://www.geotherm.com.ua/about/closedloop/energypiles.html>
91. Юдаев, Б. Н. Теплопередача / Б. Н. Юдаев. М. : Высш. шк., 1981. -319 с.

92. Фартушний А. С. Моделювання деформацій основи, спричинених роботою ґрунтових теплових насосів / Б. В. Моркляник, А. С. Фартушний, Т. В. Рабочая // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – Кременчук : КРНУ, 2014. – Вип. 2 (14). – С. 180–186.
93. Adam, D. Dynamische und thermomechanische Vorgänge im Boden // Theoretische und experimentelle Untersuchungen / D. Adam ;Habilitationsschrift, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität. Wien, 2002.
94. Asrar, G., Estimating thermal diffusivity near the soil surface using Laplace transform: Uniform initial conditions / G. Asrar, E. T. Kanemasu // Soil Sei. Soc. Am. J. 1983. - № 47. - P. 397-401. Преобр. Лапласа=Т
95. Brandl, H. Energy foundation and other thermo – active ground structures. Geotechnique 56. – 2006. - №2. – pp. 81-122.
96. Brandl, H. Energy piles and diaphragm walls for heat transfer from and into the ground. Proceeding of the 3-th international Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles. Ghent. Technical University, Vienna, Austria – 1998 – pp. 38-60.
97. Brandl, H. Ground-Sourced Energy Wells for Heating and Cooling of Buildings / Brandl H., Adam D., Markiewicz R. // Acta Geotechnica Slovenica. 2006. -Vol. 3,2006/1.-P. 5-27.
98. Energy pile foundation simulation for different configurations of ground source heat exchanger. https://translate.googleusercontent.com/translate_c?anno=2&depth=1&hl=ru&rurl=translate.google.com&sl=en&sp=nmt4&tl=ru&u=http://www.academia.edu/25803105/Energy_pile_foundation_simulation_for_different_configurations_of_ground_source_heat_exchanger&xid=17259,15700023,15700186,15700190,15700248,15700253&usg=ALkJrhjJIs6Rqz5kmOjY_m1UcqDdk6OzUQ різні типи теплообменників.
99. Investigation of Construction Specification Effects on Energy Pile Efficiency. https://translate.googleusercontent.com/translate_c?depth=1&hl=ru&prev=search&rurl=translate.google.com&sl=en&sp=nmt4&u=http://www.academia

edu/37193526/Characterisation_of_Ground_Thermal_and_Thermo-
_Mechanical_Behaviour_for_Shallow_Geothermal_Energy_Applications&xid=17
259,15700023,15700186,15700190,15700248,15700253&usg=ALkJrhIU2NC0VT
kDeA1Hf2OTHAfoKw1Iwx

100. Johansen, O. Thermal Conductivity of Soils / O. Johansen. Trondheim, Norway, 1977.

101. Johnston, G. H. Engineering Characteristics of Frozen and Thawing Soils. Permafrost Engineering Design and Construction / Johnston G. H., Ladanyi B., Morgenstern N. R. 1981.

102. Calibration of a Geothermal Energy Pile Model.
[https://translate.googleusercontent.com/translate_c?depth=1&hl=ru&prev=search
&rurl=translate.google.com&sl=en&sp=nmt4&u=http://www.academia.edu/10545
174/Calibration_of_a_Geothermal_Energy_Pile_Model&xid=17259,15700023,15
700186,15700190,15700248,15700253&usg=ALkJrhhR_SRzfinELIyMjFivAnCzt
tsbGg](https://translate.googleusercontent.com/translate_c?depth=1&hl=ru&prev=search&rurl=translate.google.com&sl=en&sp=nmt4&u=http://www.academia.edu/10545174/Calibration_of_a_Geothermal_Energy_Pile_Model&xid=17259,15700023,15700186,15700190,15700248,15700253&usg=ALkJrhhR_SRzfinELIyMjFivAnCzttsbGg)

103. Katzenbach, R. Geothermics as an Element of Developed and Sustainable Energy Supply to Prevent the World Climate Change / Katzenbach R., Waberseck 76. T. // Geotechnical Problems of the 21st Century in the Construction of Buildings and Foundations Perm, 2007, p. 39-45

104. Kimball, B. A. Soil heat flux determination: A null-alignment method / Kimball B. A., Jackson R. D. // Agric. Meteorol. 1975. - № 15. - P. 1-9.

105. Lam, H. N. Geothermal heat pump system for air conditioning in Hong Kong / Lam H. N., Wong H. M. // Proceedings World Geothermal Congress 24-29 April 2005 Antalya, Turkey: - 2005. - Paper No. 1475. - P. 1-4.

106. Sanner, B. Shallow geothermal energy / B. Sanner // GHC Bulletin. 2001. - P. 17-25.

107. Sanner, B. Larger geothermal heat pump plants in the central region of Germany / Sanner B., Mands E., Sauer M. K. // Geothermics. 2003. - № 32. -P. 589-602.

108. Rybach L. Ground-Source Heat Pump Systems the European Experience / L. Rybach, B. Sanner // Geo-Heat Center Quarterly Bulletin. 2000. Vol. 21. № 1. P. 16-26.
109. Sanner B. Examples of Ground Source Heat Pumps (GSHP) from Germany / B. Sanner, O. Kohlsch // International Summer School on Direct Application of Geothermal Energy. Bad Urach, 2001. P. 81-94.
110. Sikora, E. Thermal conductivity and diffusivity estimations of uncompacted and compacted soils using computing methods / Sikora E., Kossowski J. // Polish J. Soil Sci. 1993. - № 26 (1). - P. 19-26.
111. Shapoval, V., Shashenko, O., Hapiciev, S., Khalymendyk, O., & Andrieiev, V. (2020). Stability assessment of the slopes and side-hills with account of the excess pressure in the pore liquid. *MiningofMineralDeposits*, 14(1), 91-99. <https://doi.org/10.33271/mining14.01.091>
112. Usowicz, B. Statistical physical model of thermal conductivity in soil / Usowicz B. // Pol. J. Soil Sci. - 1992. - № XXV/1. - P. 25-34.
113. Usowicz, B. A method for the estimation of thermal properties of soil / Usowicz B. // Int. Agrophysics. 1993. - № 7 (1). - P. 27-34.
114. Usowicz, B. Evaluation of methods for soil thermal conductivity calculations / Usowicz B. // Int. Agrophysics. 1995. - № 9 (2). - P. 109-113.
115. Why Energy Foundations (Energy Piles) are the talk of the town. Электронный ресурс <https://www.gienergyus.com/blog/energy-foundations-energy-piles-talk-town/>
116. Моркляник Б.В., Проценко П.О. Вплив аварійного замерзання/розморожування колектора теплового насосу на несучу здатність палі по бічній поверхні// Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво).- Вип. 83: В2-х кн.: Книга 2.- Київ, ДП НДІБК, 2016 С. 567-570.
117. Моркляник Б. В., Проценко П. О., Іваськевич О. М. Розрахунок несучої здатності одиночної висячої палі при циклічному замерзанні-розмерзанні

грунту основи при роботі теплового насоса // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. - 2017. - Вип. 8. - С. 172-183.

118. 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.

119. 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.

120. 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.

121. Shapoval V., Protsenko P., Golovko S., Ponomarenko I. Anent the nonlinear dependence of the strength of loamy soil on normal pressure// Art and Science Multilingual scientific journal. Vol. 1 - 2021 - P. 16-25.

122. 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.

123. 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

124. 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.

125. 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.

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

ДОДАТКИ

**Товариство з обмеженою відповідальністю
«ЛЬВІВКОМПЛЕКСБУД»**

р/рUA 351005000002 6009312949600 в ПАТ „УкрСиббанк”, МФО 351005, ЗКПО 33358875, пл.
сдиного податку св. № 683732- 5%, м. Львів, вул. Авіаційна 7. , 79040

Акт впровадження

Вирішення питання щодо поєднання колектора теплового насоса з паливим фундаментом з висячих палей пов'язане з поширенням та зміною температурних полів в ґрунтовій основі. Саме тому виникає необхідність у розробці методики визначення додаткового осідання основ, в яких розміщено вертикальні колектори теплових насосів, зумовлених фазовими переходами при замерзанні-відтаюванні ґрунтової основи внаслідок роботи колектора теплового насоса, а також вирішенні задачі та розробці методики оцінки несучої здатності ґрунту основи, в якій розміщені вертикальні колектори теплового насосу.

У зв'язку з цим є актуальними проведення досліджень напружено-деформаційного стану ґрунтових основ навколо колекторів теплових насосів.

До того ж, проектування колекторів теплових насосів здійснюється за відсутності нормативної бази.

Дисертаційна робота Проценка Павла Олександровича «Закономірності взаємодії висячої палі, що містить колектор теплового насосу з ґрунтовою основою» 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» є актуальною, а поставлені у ній задачі виконано. Робота має чіткі рекомендації щодо проектування колекторів теплових насосів.

За результатами виконаної роботи отримано наступні результати:

1. Розроблено практичні рекомендації і доповнення до розрахунку і проектування паливих фундаментів, в яких розміщено вертикальні колектори ґрунтового теплового насосу.

2. Використано експериментальний стенд для дослідження впливу роботи колектора теплового насоса на міцність і деформативність ґрунтової основи.
3. Запропоновано методику визначення деформацій ґрунту у зоні впливу вертикального колектора теплового насоса.

Виконана дисертаційна робота Проценка П.О. має як теоретичне, так і практичне значення, і її основні положення рекомендуються для впровадження у реальних умовах.

Директор ТзОВ
«ЛЬВІВКОМПЛЕКСБУД»



 Григорців Я.Ф.

**ТЗОВ «ЗАВОД
ЕЛЕКТРОНПОБУТПРИЛАД»**



79035, Україна, м. Львів, вул. Зелена, 251
Р/р UA85339500000026008932052003
у АТ «ТАСКОМБАНК»
код ЄДРПОУ: 30650679, МФО 339500
свид. №100299798, ІПН 306506713041
тел. (032) 270-41-41, факс (032) 270-91-83
(032) 270-41-52
E-mail: office@epp.electron.ua

**ООО «ЗАВОД
ЭЛЕКТРОНБЫТПРИБОР»**

79035, Украина, г. Львов, ул. Зеленая, 251
Р/с UA85339500000026008932052003
в АО «ТАСКОМБАНК»
г. Львова, ОКПО 30650679, МФО 339500
свид. №100299798, ИНН 306506713041
тел. (032) 270-41-41, факс (032) 270-91-83
(032) 270-41-52
E-mail: office@epp.electron.ua

«28» січня 2021р. № 39/5

Акт впровадження

Використання теплових ґрунтових насосів у містах з великою щільністю забудови викликає низку негативних наслідків щодо стійкості будівель і споруд, які розташовані поряд з місцями влаштування колекторів теплових насосів.

При цьому в Україні відсутні нормативні документи, що дозволяють виконувати проектування колекторів теплових насосів в умовах щільної міської забудови.

Саме за цих причин дослідження напружено-деформаційного стану ґрунтових основ навколо колекторів теплових насосів є актуальною науково-технічною проблемою.

Дисертаційна робота Проценка Павла Олександровича «Закономірності взаємодії висячої палі, що містить колектор теплового насосу з ґрунтовою основою» 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» є актуальною, а поставлені у ній задачі виконано. Робота має чіткі рекомендації щодо проектування колекторів теплових насосів.

За результатами виконаної роботи отримано наступні результати:

1. Поставлено і вирішено задачу поширення теплових полів в, зумовлених взаємодією колекторів теплових насосів та основ.
2. Використано експериментальний стенд для дослідження впливу роботи колектора теплового насоса на міцність і деформативність ґрунтової основи.
3. Запропоновано методику визначення деформацій ґрунту у зоні впливу вертикального колектора теплового насоса.

Результати дисертаційної роботи Проценка П.О. є доцільними для використання при проведенні відповідних робіт.

Директор ТзОВ
«Завод Електронпобутприлад»



Ждиняк З.І.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні наукові результати дисертації опубліковано в наступних працях.

Фахові видання

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 НДІБК, 2016 С. 567-570.

2. Моркляник Б. В., Проценко П. О., Іваськевич О. М. Розрахунок несучої здатності одиночної висячої палі при циклічному замерзання-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. Anent the nonlinear dependence of the strength of loamy soil on normal pressure// Art and Science Multilingual scientific journal. Vol. 1 - 2021 - P. 16-25.

Збірники доповідей та тез, що засвідчують апробацію

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