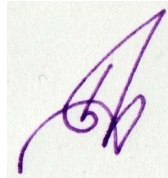


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

МОРКЛЯНИК БОГДАН ВАСИЛЬОВИЧ



УДК 624.13:624.15

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ ГЕОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ
«ФУНДАМЕНТ–ГРУНТОВИЙ МАСИВ» В ЗОНІ ДІЇ КОЛЕКТОРА
ТЕПЛООВОГО НАСОСА**

Спеціальність 05.15.09 – «Геотехнічна і гірнична механіка»

**Дисертація на здобуття вченого ступеня
доктора технічних наук**

**Науковий консультант
доктор технічних наук, професор
Шашенко Олександр Миколайович**

Львів – 2015

ЗМІСТ

	<i>Стр.</i>
ВСТУП	7
Розділ 1. Аналітичний огляд літературних джерел	15
1.1. Глобальна проблема людства – нестача ресурсів	15
1.2. Перспективи використання різних відновлюваних джерел теплової енергії	34
1.3. Принципи функціонування теплових насосів. Методи оцінювання ефективності їхньої роботи	39
1.4. Режими експлуатації теплових насосів	48
1.5. Мета, основні задачі та методи досліджень	69
Висновки	71
Розділ 2. Ґрунтові теплові насоси та їхні колектори. Сучасні методи розрахунку теплових полів і напружено-деформованого стану гірських порід	72
2.1. Види колекторів ґрунтових теплових насосів	72
2.1.1. Плоскі ґрунтові колектори	73
2.2. Ґрунтові зонди	75
2.3. Способи і варіанти розміщення колекторів теплових насосів у різних середовищах	77
2.4. Механізми і рівняння тепломасопереносу. Граничні і початкові умови	89
2.5. Механізми формування полів напружень і деформацій у ґрунтових основах, зумовлених температурними полями і об’ємними деформаціями, зумовленими заморожуванням порової рідини	98
Висновки	124
Розділ 3. Експериментальні дослідження з визначення температурних полів у ґрунтових основах	127
3.1. Експериментальні закономірності сезонної зміни температури в різних областях України	128

3.2. Експериментальні закономірності сезонної зміни температури в ґрунтовій товщі	151
3.3. Експериментальні закономірності розподілу температури в основі джерела тепла циліндричної форми	157
Висновки	162
Розділ 4. Експериментальні дослідження впливу знакозмінного заморожування-розморожування на властивості ґрунту і матеріалу будівельних конструкцій	163
4.1. Вплив циклічного заморожування-розморожування на міцнісні та деформаційні властивості ґрунту	165
4.1.1. Якісний експеримент	165
4.1.2. Міцносні властивості	170
4.1.3. Деформаційні властивості	178
4.2. Вплив циклічного заморожування-розморожування на міцнісні та деформаційні властивості бетону	183
4.2.1. Якісний експеримент	183
4.2.2. Міцносні властивості	188
4.3. Визначення несучої здатності моделі пального фундаменту під час циклічного заморожування-розморожування ґрунту	195
4.4. Вплив деформацій, зумовлених морозним здиманням, на деформації розташованих на ґрунтовій основі будівель і споруд	199
4.5. Аналіз результатів досліджень	205
Висновки	211
Розділ 5. Теоретичні дослідження закономірностей розподілу температурних полів у ґрунтових основах	213
5.1. Теоретичні закономірності сезонної зміни температури в ґрунтовій товщі	214
5.2. Визначення температурного поля в основі плоского колектора теплового насоса	221
5.3. Рішення для визначення температурних полів у основі	

<i>U</i> -подібного колектора	228
5.4. Аналіз розмірностей, отриманих фундаментальних рішень	235
5.4.1. Температурне поле в основі плоского колектора теплового насоса кінцевих розмірів	243
5.4.2. Температурне поле в основі <i>U</i> -подібного колектора теплового насоса кінцевих розмірів	251
5.5. Облік нелінійних ефектів	257
Висновки	260
Розділ 6. Теоретичні дослідження закономірностей деформування гірських порід, зумовлених їхнім заморожуванням-розморожуванням за рахунок теплообміну з колекторами теплових насосів	261
6.1. Сучасні методи визначення деформацій здимання ґрунту, зумовлених заморожуванням-розморожуванням основи за рахунок теплообміну з колекторами теплових насосів. Їхні переваги і недоліки	262
6.2. Напружено-деформований стан півпростору, всередині якого розташоване точкове джерело тиску	265
6.3. Методика і результати складання розрахункових таблиць	273
6.4. Рекомендована методика визначення деформацій здимання	280
6.4.1. Розрахунок деформацій, зумовлених заморожуванням частини ґрунту для точки денної поверхні, що розташована над центром замерзлої ділянки	280
6.4.2. Розрахунок деформацій, зумовлених заморожуванням частини ґрунту для точки денної поверхні, що перебуває над центром замерзлої ділянки	282
Висновки	289
Розділ 7. Методика та приклади визначення напружено-деформованого стану геомеханічної системи «фундамент-ґрунтовий масив» у зоні дії колектора теплового насоса	290
7.1. Методика визначення напружено-деформованого	

стану геомеханічної системи «фундамент-грунтовий масив» у зоні дії колектора теплового насоса	290
7.2. Приклади визначення напружено-деформованого стану основ і розташованих у них конструкцій	295
7.3. Впровадження результатів досліджень	305
Висновки	306
ВИСНОВКИ	307
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	309
ДОДАТКИ	344
Додаток А. Матеріали впровадження	345
Додаток Б. Акт впровадження	347
Додаток В. Акт про впровадження результатів дисертаційного дослідження к.т.н. Моркляника Б.В. «Закономірності деформування геомеханічної системи «фундамент-грунтовий масив» в зоні дії колектора теплового насоса»	349
Додаток Г. Довідка про впровадження результатів дисертаційної роботи Моркляника Богдана Васильовича	350

ВСТУП

Актуальність теми. Залежність національної економіки від імпортованих енергоресурсів змушує шукати нові шляхи зниження витрат на опалювання взимку і кондиціонування влітку. У зв'язку з цим значний інтерес зумовлює інноваційна технологія, що ґрунтується на використанні так званих теплових насосів.

Ця технологія вигідна, хоч би з того погляду, що для вироблення тієї самої кількості тепла тепловий насос споживає в 2,5-4,5 разів електричної енергії менше, ніж будь-який інший електричний нагрівальний прилад.

Суть цієї технології полягає в тому, що в опалювальний період на обігрівання будівель і споруд витрачається низькопотенційне природне тепло ґрунтової товщі, а під час кондиціонування надлишок тепла не розсіюється в атмосфері, а відводиться в ґрунтову основу (якщо система працює в реверсному режимі, то накопичується теплова енергія).

Варто зазначити, що теплові насоси отримали значне поширення у бідних природними вуглеводневими ресурсами, але водночас промислово розвинених країнах (Австрія, Швеція, Японія), та, крім того, мають високу екологічну культуру.

Останнє побічно свідчить про те, що під час використання теплових насосів практично не виникає проблем забруднення навколишнього середовища.

Колектори ґрунтових теплових насосів розміщують в основах, а також елементах будівель і споруд (зокрема в палях, фундаментах неглибокого залягання, підземних тунелях та ін.).

Такі основи і фундаменти прийнято називати суміщеними.

Експлуатація ґрунтових теплових насосів призводить до підігрівання основ (якщо насос працює в режимі кондиціонування) або їх охолодження (якщо насос працює в режимі опалювання).

Крім того, за наявності в основі підземних ґрунтових вод можливе їхнє заморожування, що призводить до морозного здимання та зміни фільтраційних

властивостей ґрунтових основ (в інженерній практиці відомі методи облаштування протифільтраційних завіс шляхом їх заморожування).

Також під час розміщення колекторів теплових насосів у залізобетонних елементах конструкцій, у яких, відповідно, виникають змінні температурні напруження.

У зв'язку з цим, вивчення чинників і встановлення закономірностей деформування геомеханічної системи «фундамент-ґрунтовий масив» в зоні дії колектора теплового насоса та розробка наукових принципів розрахунку напружено-деформованого стану є актуальною науково-технічною проблемою для економіки України з позиції підвищення її ресурсо- та енергозбереження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. 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 мостів та будівельної механіки Національного університету «Львівська політехніка».

Мета роботи – визначення закономірностей деформування геомеханічної системи «фундамент-ґрунтовий масив» у зоні дії колектора теплового насоса.

Ідея роботи полягає в урахуванні впливу теплових полів та промерзання ґрунту в зоні дії колектора теплового насоса на деформації геомеханічної системи «фундамент–ґрунтовий масив».

Об'єктом досліджень є температурні і силові поля, зумовлені роботою теплових насосів, які виникають у ґрунтових основах та розташованих у них елементах будівель і споруд.

Предметом досліджень є температурний і напружено-деформований стан системи «колектор ґрунтового теплового насоса – ґрунтова основа – фундамент (або фундаменти) – надфундаментна споруда».

Відповідно до поставленої мети, сформульовані та вирішені такі **задачі досліджень**:

1) виявити особливості технології обігрівання приміщень і кондиціонування повітря з використанням ґрунтових теплових насосів та визначити додаткові навантаження і впливи на геомеханічну систему «фундамент-ґрунтовий масив»;

2) проаналізувати актуальні фізичні та математичні моделі, призначені для прогнозування температурних полів та напружено-деформованого стану ґрунтової основи в зоні дії теплового насоса і запропонувати такі, що адекватні геомеханічній системі, яка досліджується;

3) експериментальним шляхом дослідити залежність міцнісних та деформаційних властивостей водонасиченого ґрунту за знакозмінних температур;

4) розробити математичну модель геомеханічної системи «фундамент-ґрунтовий масив», яка дасть змогу під час розрахунку її деформацій врахувати вплив:

- температурних полів;
- фазових переходів порової рідини;
- особливостей розташування колектора ґрунтового теплового насоса в основі або фундаменті;

5) розробити методику визначення деформацій геомеханічної системи «фундамент-ґрунтовий масив» у зоні дії колектора теплового насоса» з урахуванням таких впливів, як:

- охолодження та нагрівання ґрунту;
- заморожування та розморожування ґрунту;

6) дослідити деформативність, міцність і тріщиностійкість елементів конструкцій фундаментів із композитних матеріалів за циклічного заморожування і розморожування;

7) розробити практичні рекомендації щодо визначення деформацій геомеханічної системи «фундамент-ґрунтовий масив» у зоні дії колектора теплового насоса.

Методи досліджень. Методологічною основою вирішення поставлених задач досліджень є комплексний підхід, що передбачає використання таких чинників:

- 1) аналізу та узагальнення літературних і статистичних даних щодо:
 - перспективності використання ґрунтових теплових насосів в умовах різних регіонів України;
 - сезонної зміни температурних полів у ґрунтовій основі в різних регіонах України;
 - аналітичних та чисельних методів визначення температурних полів у ґрунтових основах та розташованих у них елементах будівель і споруд;
 - аналітичних та чисельних методів визначення напружено-деформованого стану ґрунтових основ і влаштованих у них елементів будівель та споруд, зумовлених температурними полями та фазовими переходами порової рідини під час її заморожування-розморожування;
- 2) експериментальних досліджень під час визначення умов руйнування залізобетонних елементів з полімерними елементами колекторів теплових насосів, за рахунок різних значень коефіцієнтів температурного розширення бетону та полімерного матеріалу;
- 3) експериментальних досліджень для визначення умов руйнування залізобетонних елементів, у яких розташовані елементи колекторів теплових насосів під час заморожування-розморожування рідини, яка в них циркулює;
- 4) математичного моделювання температурних полів у породах, зумовлених роботою теплових насосів;
- 5) математичного моделювання для визначення зон заморожування порової рідини в породах, зумовлених роботою теплових насосів;
- 6) чисельного моделювання породних масивів для визначення їх НДС, зумовленого заморожуванням порової рідини в породах, унаслідок роботи теплових насосів;

7) чисельного моделювання НДС елементів будівель і споруд, розташованих у ґрунтових масивах, під час зміни температурного режиму, зумовленого роботою теплових насосів.

Основні наукові положення, що захищаються в роботі.

1. На території України залежність середньомісячної температури на денній поверхні основи від часу описується поліномом четвертого ступеня, що дає змогу ураховати зовнішнє температурне поле під час визначення напружено-деформованого стану ґрунту в зоні впливу колектора теплового насоса.

2. Розподіл температури в напівпросторі, зумовлений дією точкового джерела тепла і зовнішніх факторів, є нелінійною функцією координат, часу та теплофізичних властивостей гірської породи і, як наслідок, температура в довільній точці напівпростору прямо пропорційна інтенсивності джерела і зворотно пропорційна густині гірської породи, помноженій на її теплоємність, що дає змогу визначати температурне поле, зумовлене теплообміном між ґрунтом та колекторами теплових насосів складної форми.

3. Переміщення в напівпросторі, зумовлені фазовим переходом порової рідини в твердий стан під час заморожування і розморожування гірської породи в довільній її точці, є нелінійною функцією координат, коефіцієнта об'ємного розширення та деформаційних властивостей замерзлої та незамерзлої породи, що дає змогу на основі цього розраховувати деформації системи «фундамент-надфундаментна конструкція».

Наукова новизна отриманих результатів:

- 1) експериментально доведено, що:
 - під час циклічного заморожування і розморожування елементів фундаментів із композитних матеріалів (тобто бетонних елементів фундаментів із замоніченим фрагментом пластикового колектора теплового насоса) з'являються тріщини, а за певних умов – повністю руйнується бетон;
 - під час заморожування циркулювальної рідини в елементах фундаментів із композитних матеріалів відбувається руйнування бетону;

2) вперше отримано аналітичне рішення задачі про визначення теплового поля в основі, зумовлене сезонними змінами температури на її поверхні.

3) вперше отримано аналітичне рішення задачі про визначення теплового поля в основі плоского теплового насоса.

4) вперше отримано аналітичне рішення задачі про розподіл температурних полів у ґрунтовій основі, зумовлених роботою точкового температурного джерела. Ці результати узагальнені на випадок плоского та U-подібного колектора ґрунтового теплового насоса;

5) вперше розроблена фізична модель, що дає змогу розрахувати температурні поля в основах теплових насосів під час врахування фазових переходів порової рідини (тобто її заморожування-розморожування).

6) вперше отримано рішення фундаментальної задачі про напружено-деформований стан ґрунтової основи від точкового джерела тиску.

7) розроблена модель основи, яка залежно від розташування колектора ґрунтового теплового насоса в основі або фундаменті дасть змогу врахувати у розрахунках на додаткові осідання основ фундаментів: температурні поля; заморожування; розморожування.

Наукове значення роботи полягає у встановленні закономірностей деформування геомеханічної системи «фундамент-ґрунтовий масив» у зоні дії колектора теплового насосу та розробленні на підставі цього наукових принципів розрахунку їхнього НДС.

Практичне значення роботи полягає у розробленні принципів розрахунку і проектування суміщених основ і фундаментів теплових насосів, зокрема:

1) запропоновано методику визначення теплових полів, зумовлених взаємодією колекторів ґрунтових теплових насосів і ґрунтових основ;

2) розроблено методику додаткових осідань основ, у яких розміщено колектори ґрунтових теплових насосів, зумовлених фазовими переходами в разі заморожування-розморожування ґрунту під час роботи теплових насосів, у межах схеми роздільного розрахунку;

3) запропоновано методику визначення несучої здатності ґрунту основи, в якій розміщено колектори теплових ґрунтових насосів, у межах схеми роздільного розрахунку;

4) розроблено методику визначення додаткових осідань основ, зумовлених фазовими переходами в разі заморожування-розморожування ґрунту під час роботи теплових насосів, а також деформацій і напружень, розміщених у ній конструкцій, у межах схеми сумісного розрахунку;

5) запропоновано методику визначення додаткових напружень, які виникають в елементах конструкцій фундаментів, що одночасно є несучими конструкціями споруди і колекторами теплових насосів;

6) розроблено практичні рекомендації із розрахунку і проектування основ і фундаментів, у яких розміщено колектори теплових ґрунтових насосів.

Обґрунтованість і ймовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується: відповідністю розроблених теоретичних положень фундаментальним законам механіки суцільних середовищ, геотехнічної, гірничої механіки та механіки ґрунтів, достатнім обсягом достовірних експериментальних результатів отриманих під час випробування залізобетонних елементів конструкцій, високою збіжністю (близько 95 %) результатів прогнозування розрахунковим методом з фактичними результатами руйнування елементів залізобетонних фундаментів, суміщених з частинами колекторів теплових насосів.

Реалізація результатів роботи. Результати досліджень використано: під час розробки нормативних документів, які регламентують вимоги до проектування систем, що використовують низько потенційне тепло ґрунтів основи для опалення МІНРЕГІОНБУДом; під час проектування і будівництва житлових комплексів за адресою Львів, пл. Кн. Святослава, 5 та в Києві, вул. Маршала Рибалка, 3а; під час реалізації програм розвитку альтернативної енергетики й енергозбереження у Львівській області.

Особистий внесок здобувача. Автор самостійно сформулював мету, ідею, завдання досліджень та наукові положення, розробив математичні моделі і методики досліджень, проаналізував результати натурних, лабораторних та

чисельних експериментів, розробив та видав рекомендації щодо методик і принципів розрахунку та проектування суміщених основ та фундаментів теплових насосів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи викладено в доповідях і обговорено на: Міжнародній науково-технічній конференції, присвяченій 50-річчю БашНИИИстроя (Уфа, 2006), Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених (Дніпропетровськ: НГУ, 2007), 5-й Міжнародній конференції молодих вчених ГАС (Львів, 2013), Міжнародній науково-практичній конференції «Форум гірників» (Дніпропетровськ, 2013), 9-й Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених, аспірантів та студентів «Перспективи розвитку будівельних технологій» (Дніпропетровськ: НГУ, 2015), Міжнародній науково-технічній конференції «Энергетика. Экология. Человек» (Київ, 2013, 2015), Міжнародній студентській науково-технічній конференції «Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений» (Донецьк, 2015), Всеукраїнського міжвузівського наукового семінару «Залізобетон минулого і майбутнього» (Львів, 2015).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 38 наукових праць, з яких 5 монографій, 22 статті у спеціалізованих фахових виданнях (з них 4 – в зарубіжних виданнях, 5 – в журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз), 11 тез та доповідей у збірниках матеріалів конференцій. 6 наукових праць опубліковано одноосібно.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 349 найменувань на 36 сторінках і 4 додатків на 6 сторінках. Містить 268 сторінок машинописного тексту, 160 рисунків і 55 таблиць. Загальний обсяг дисертації становить 350 сторінок.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1. Глобальна проблема людства – нестача ресурсів

Останнім часом чітко спостерігаємо тенденцію зростання кількості людей на планеті Земля. Згідно з [13] під кількістю населення розуміють сукупність людей, що проживає на Землі в цей момент часу загалом. Зараз населення планети становить понад 7,5 млрд. осіб. Цікавою є динаміка зростання людства. Згідно з [13] до 1970-х років кількість населення світу зростала за законом гіперболи, проте конкретно в цей час темпи зростання уповільнюються. Але загалом кількість населення продовжує невпинно збільшуватися.

За даними ООН, в 1994-2014 рр. кількість людей віком понад 60 років подвоїлася, причому в цей час (2014-2015) літніх людей у світі більше, ніж дітей у віці до п'яти років [14]. Найбільшою державою за кількістю населення в світі є Китай, на другому – Індія (після 2025 року, можливо, вона вийде на перше місце), далі йдуть США (300 млн ос.), Індонезія, Бразилія, Пакистан, Бангладеш, Нігерія тощо.

У початку 2014 року на 47-й сесії Комісії ООН з народонаселення і розвитку в доповіді генерального секретаря ООН Пан Гі Муна заявлено, що кількість населення Землі досягла 7,2 млрд осіб.

Тому цікавий прогноз щодо кількості населення в світі (рис. 1.1 та 1.2).

Для прогнозу вихідними даними ми використали дані ООН [13, 14] і відомий метод вирівнювання кривих [22, 37, 74, 134, 249, 316, 319]. Виявилось, що в розглянутому інтервалі часів (тобто в 1850-2014 роках) залежність кількості жителів Землі N від часу t можна апроксимувати залежністю:

$$N = \exp[20,606 \cdot \ln(t) - 148,07], \quad t \in 1850, \dots, 2100. \quad (1.1)$$

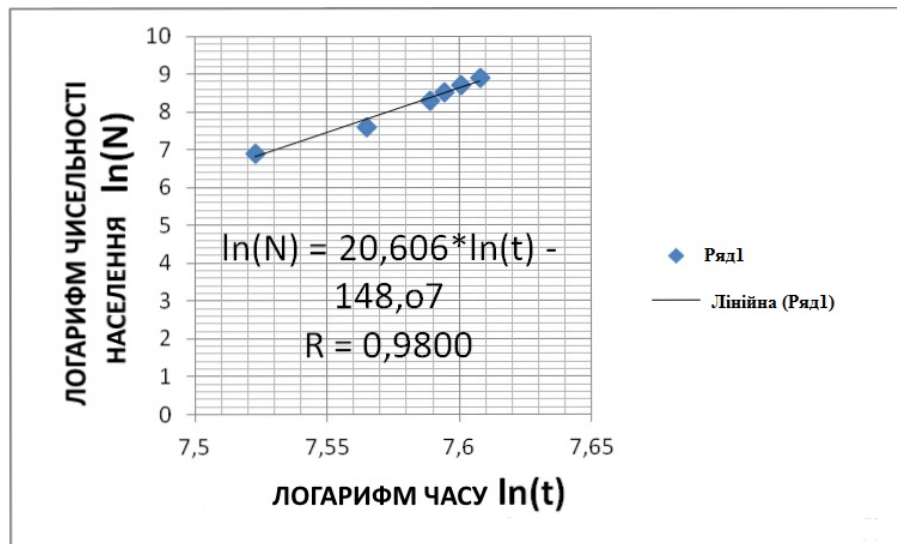


Рис. 1.1. До визначення аналітичної залежності (екстраполяції) кількості населення на планеті Земля N від часу t ; Ряд 1 – фактичні дані; суцільна лінія – тренд

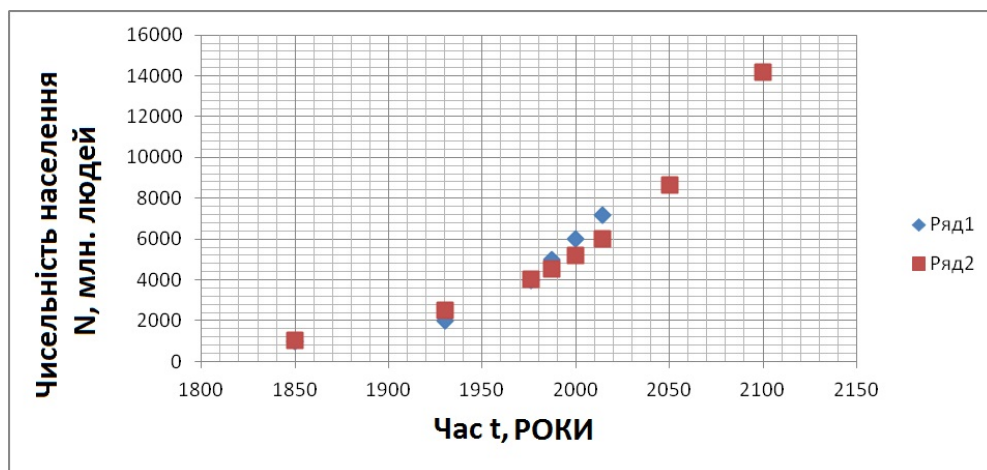


Рис. 1.2. Прогноз кількості населення на планеті Земля

Виявилося, що населення планети Земля в 2050 році сягне позначки 9 млрд. а в 2100 році прогнозують 14 млрд. осіб. До аналогічних висновків дійшов відомий академік С. П. Капіца, який у статті «Модель зростання населення Землі» показав, що до 2100 року кількість населення планети становитиме 12–14 млрд. осіб. Ці дані мають добру відповідність з результатами прогнозу ООН і Вашингтонського університету (2050 – 9,5 млрд. а 2100 – 11 млрд. осіб). Згідно з даними ООН і Вашингтонського університету допустима межа населення Землі 10–12 млрд. осіб [120].

Отже, враховуючи викладене можна зробити висновок про те, що населення нашої планети до 2050 року наблизиться до максимально допустимої межі. Своєю чергою, це вплине на тенденції споживання таких життєво необхідних для існування людства ресурсів: 1) продовольчих; 2) водних; 3) енергетичних.

Найважливішою є проблема продовольчого забезпечення. У цей час за твердженням ФАО (2012) кожна сьома людина в світі страждає від хронічного голоду і недоїдання [220, 265, 266]. До прикладу, від масштабного масового голоду в Східній Африці тільки в 2011 році померли від 50 до 100 тисяч осіб. Відомо, що південніше від Сахари недоїдає кожен четвертий з 856-мільйонного населення [116]. Кожну хвилину від голоду вмирає 11 дітей, 16000 – в день, 6 мільйонів – у рік [119]. За даними продовольчої та сільськогосподарської організації ООН на вересень 2010 року, кількість людей, які страждають від хронічного голоду, становила 925 млн., що більше, ніж у 2008 році, на 98 млн. осіб. З них 578 млн. живуть в Азійсько-Тихоокеанському регіоні, 239 мільйонів – в Африці (на південь від Сахари), 108 мільйонів – в інших країнах (табл.1.1).

Таблиця 1.1

Кількість тих, хто голодує у світі

Країна	Кількість тих, хто голодує (млн. ос.)	Частка від загальної кількості населення країни
Ефіопія	32,7	46 %
Філіппіни	14,6	18 %
Танзанія	16,4	44 %
Таїланд	13,8	22 %
Судан	8,7	26 %
Північна Корея	7,6	33 %
Пакистан	37,5	24 %

Країна	Кількість тих, хто голодує (млн. ос.)	Частка від загальної кількості населення країни
Нігерія	11,4	9 %
Мозамбік	8,3	44 %
Мексика	5,3	5 %
Мадагаскар	6,6	38 %
Колумбія	5,9	13 %
Китай	153,7	12 %
Кенія	9,9	31 %
Ємен	7,6	38 %
Індонезія	13,8	6 %
Індія	209,5	20 %
Зімбабве	6,0	47 %
Замбія	5,0	46 %
Демократична республіка Конго	39,0	74 %
Гаїті	–	58 %
В'єтнам	13,0	16 %
Всього в світі	850	13 %
Бразилія	13,1	7 %
Бангладеш	44,0	30 %

Наприклад, у грудні 2005 року кількість тих, хто голодують у всьому світі, за даними ООН перевищила 960 млн осіб. Більшість тих, хто голодує (907 млн осіб), проживає в країнах, що розвиваються. За офіційною статистикою 65 % з

них живуть в Індії, Китаї, Конго, Бангладеші, Індонезії, Пакистані та Ефіопії [205], [333].

Важливим показником, що ілюструє проблему, є динаміка виробництва основних продуктів харчування. Як вихідні дані ми використали зазначені в роботах [220] та [197] матеріали (рис. 1.3-1.5).

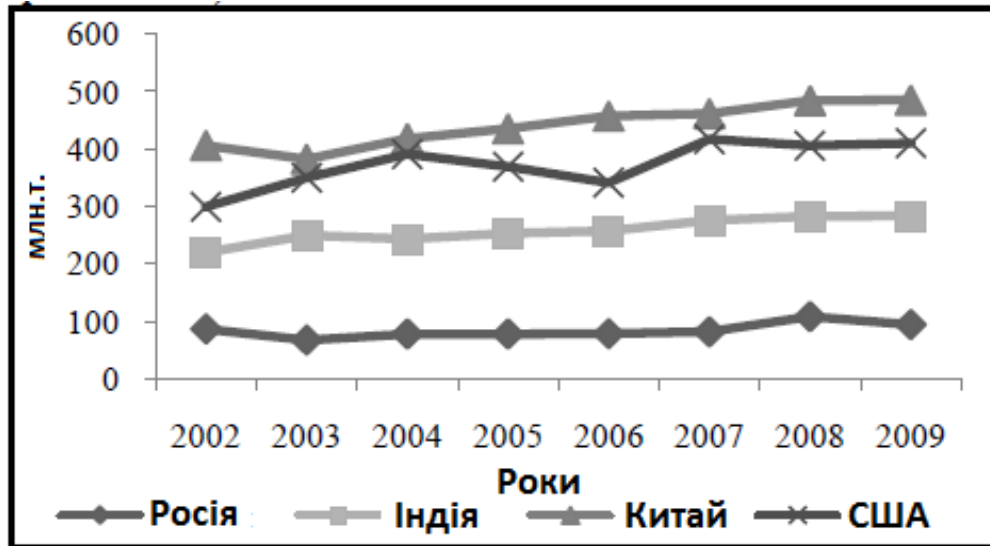


Рис. 1.3. Динаміка виробництва зерна передовими країнами [114]

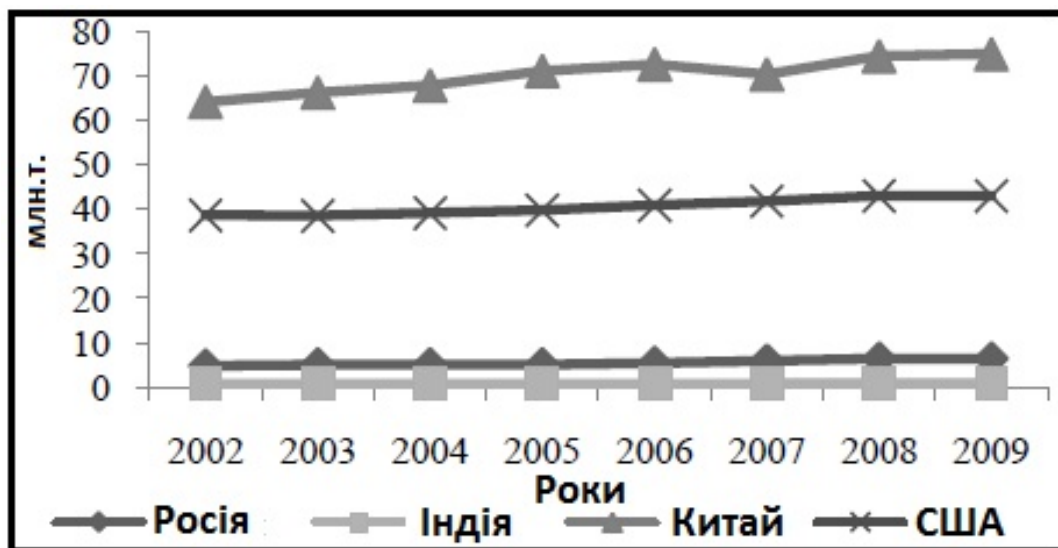


Рис. 1.4. Динаміка виробництва м'яса і птиці передовими країнами [114]

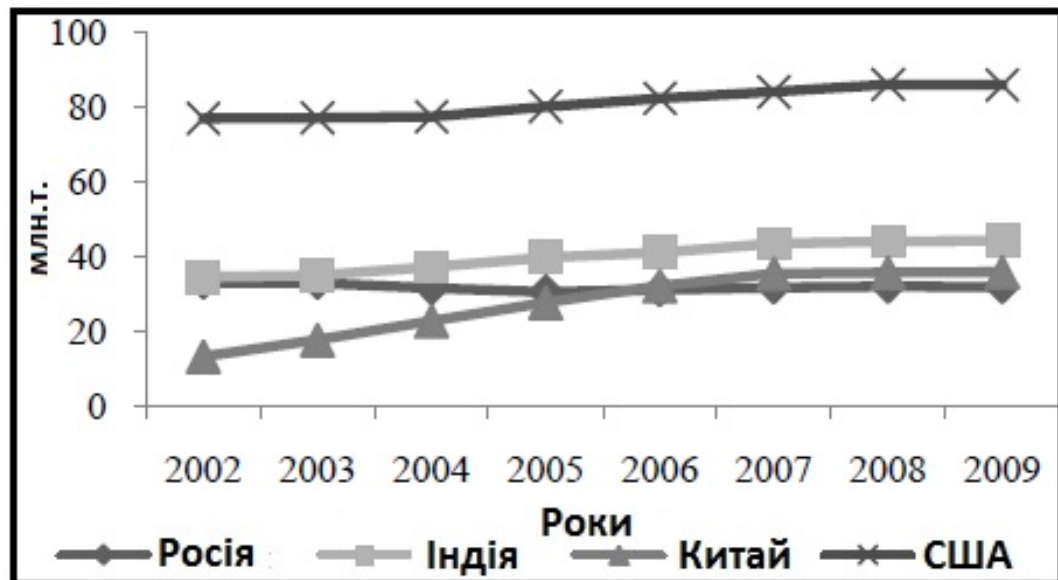


Рис. 1.5. Динаміка виробництва молока провідними країнами [114]

Для прогнозування як вихідні дані використано подані на рис. 1.6-1.8 дані і відомий метод вирівнювання кривих [22, 37, 74, 134, 249, 316, 319]. Встановлено, що на розглянутому інтервалі часів наявні такі залежності:

- 1) виробництво зерна провідними країнами підпорядковується лінійній залежності:

$$Y_1 = 15,787 \cdot t - 30593, \quad t \in 2002, \dots, 2009 \quad (1.2)$$

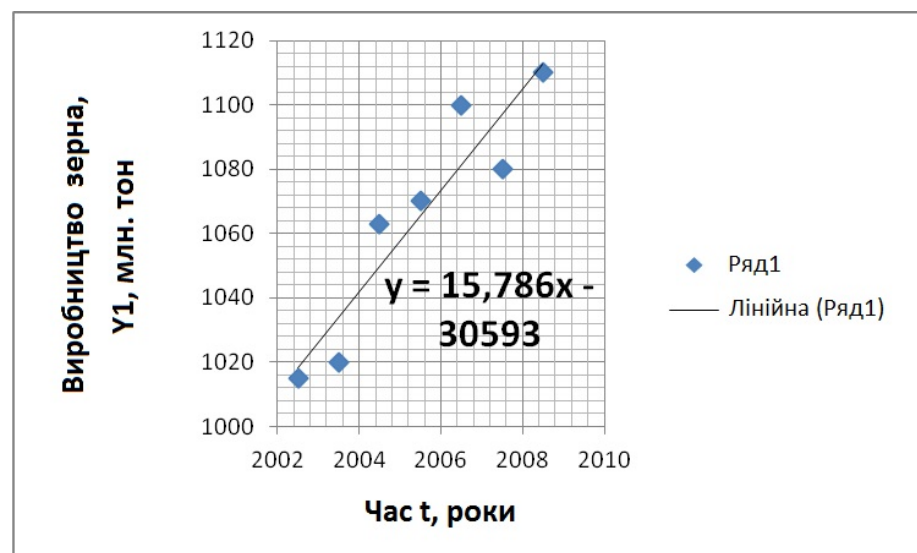


Рис. 1.6. Динаміка сукупного виробництва зерна провідними країнами. Примітки: 1) суцільна лінія – це лінія тренду; 2) на рисунку подано рівняння тренду

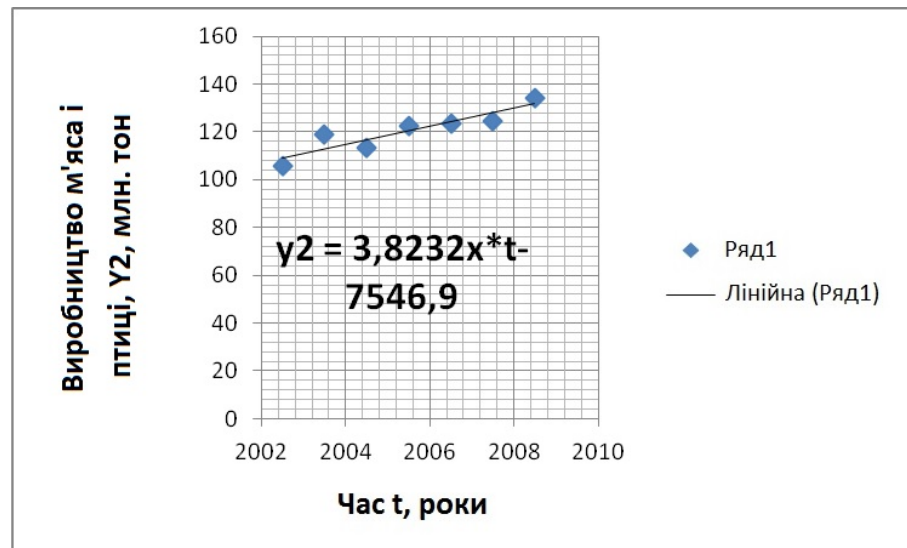


Рис. 1.7. Динаміка сукупного виробництва м'яса і птиці провідними країнами. Примітки: 1) суцільна лінія – це лінія тренду; 2) на рисунку подано рівняння тренду

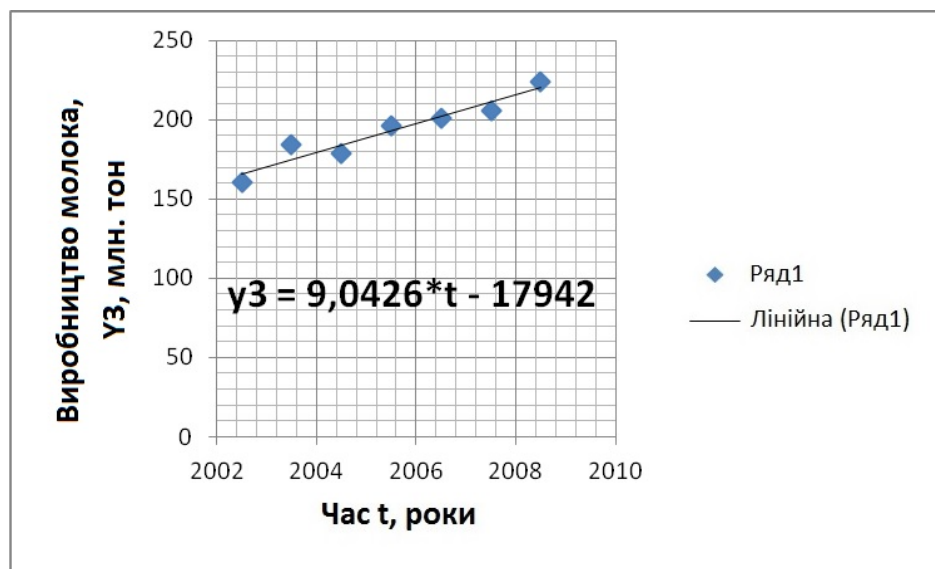


Рис. 1.8. Динаміка сукупного виробництва молока провідними країнами. Примітки: 1) суцільна лінія – це лінія тренду; 2) на рисунку наведено рівняння тренду

2. Виробництво м'яса та птиці провідними країнами підпорядковується лінійній залежності:

$$Y_2 = 3,8232 \cdot t - 7546,9, \quad t \in 2002, \dots, 2100 \quad (1.3)$$

3. Виробництво молока провідними країнами підпорядковується лінійній залежності:

$$Y_3 = 9,0426 \cdot t - 17942, \quad t \in 2002, \dots, 2100 \quad (1.4)$$

Далі знайдемо тенденцію виробництва продуктів харчування на особу Землі в період 2010-2100 роки. Для цієї цілі знайдемо відношення аналітичних залежностей (1.3-1.5), які відображають динаміку виробництва продуктів харчування провідними країнами світу, до залежності (1.1), яка відображає динаміку світового зростання населення. Маємо:

1. Для виробництва на одну людину зерна:

$$z_1 = \frac{Y_1}{N} = \frac{15,786 \cdot t - 30593}{\exp[20,606 \cdot \ln(t) - 148,07]}, \quad t \in 2002, \dots, 2100 \quad (1.5)$$

2. Для виробництва на одну людину м'яса та птиці:

$$z_2 = \frac{Y_2}{N} = \frac{3,8232 \cdot t - 7546,9}{\exp[20,606 \cdot \ln(t) - 148,07]}, \quad t \in 2002, \dots, 2100 \quad (1.6)$$

3. Для виробництва на одну людину молока:

$$z_3 = \frac{Y_3}{N} = \frac{9,0426 \cdot t - 17942}{\exp[20,606 \cdot \ln(t) - 148,07]}, \quad t \in 2002, \dots, 2100 \quad (1.7)$$

У графічній формі залежності (1.5-1.7) подані на рис. 1.9-1.11.

Аналіз поданих на рис. 1.9-1.11 залежностей і відповідних до них ліній тренду дає змогу зробити такі висновки:

1) виробництво зерна, м'яса і птиці на одну людину за незмінних тенденцій зростання населення і випуску цих продуктів у діапазоні 2015-2100 років має стійку тенденцію до зниження;

2) виробництво молока на одну людину за незмінних тенденцій зростання населення і випуску цих продуктів у діапазоні 2015-2100 років має стійку тенденцію до зростання.

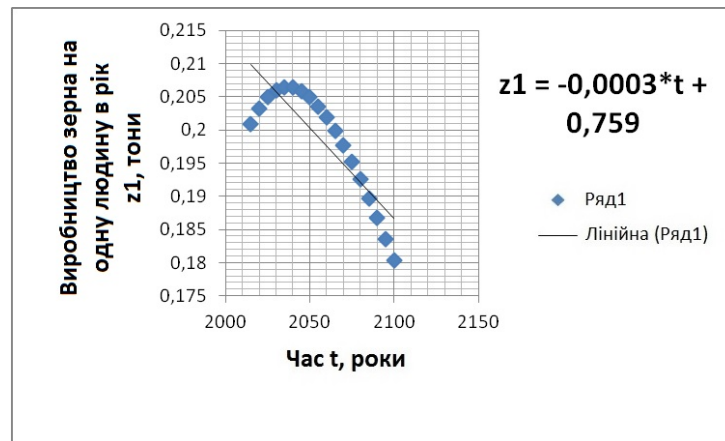


Рис. 1.9. Виробництво зерна провідними країнами на одну людину (прогноз). Примітки: 1) суцільна лінія – це лінія тренду; 2) на рисунку наведено рівняння тренду

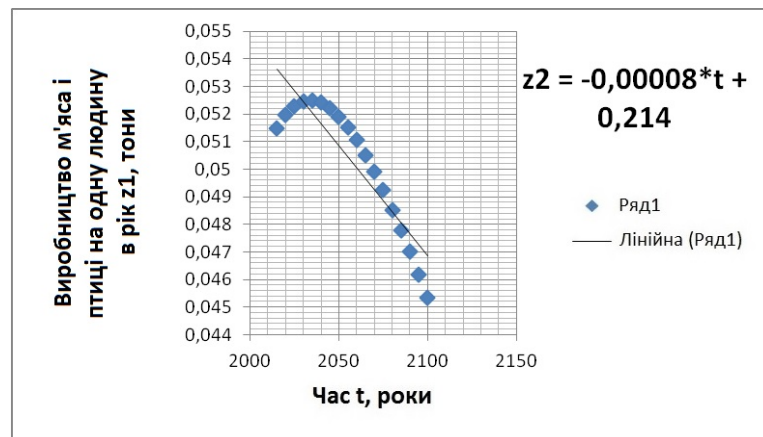


Рис. 1.10. Виробництво м'яса і птиці провідними країнами на одну людину (прогноз). Примітки: 1) суцільна лінія – це лінія тренду; 2) на рисунку зображено рівняння тренду

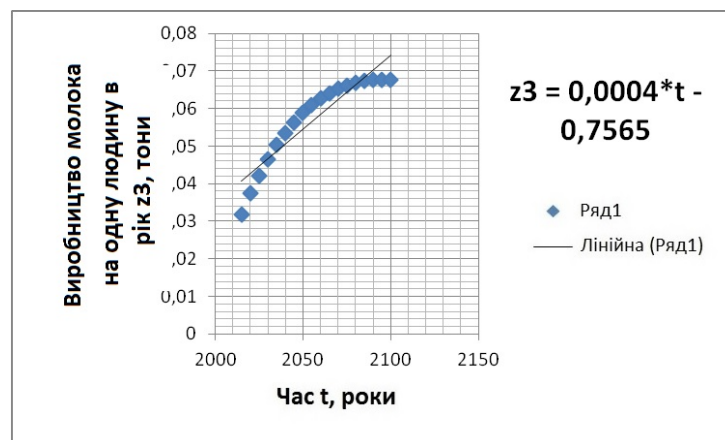


Рис. 1.11. Виробництво птиці та м'яса провідними країнами на одну людину (прогноз). Примітки: 1) суцільна лінія – це лінія тренду; 2) на рисунку наведено рівняння тренду

Так, виконаний аналітичний огляд літературних джерел дав змогу зробити висновок про те, що в майбутньому людству доведеться зіткнутися з нестачею продовольства.

Далі розглянемо проблему нестачі води [114]. Зазначимо, що для використання в промисловості, сільському господарстві і побуті придатна прісна вода.

Основними джерелами прісної (зокрема питної) води є річки і прісні озера.

Треба також зазначити, що запаси питної води в різних країнах поширені вкрай нерівномірно. Так, у Європі та Азії, де проживає 70 % населення, зосереджено лише 39 % світових запасів річкових вод. У Європі, де проживає майже 20 % населення планети, запаси прісної води становлять лише 7 % усіх світових запасів води.

Брак прісної води відзначається вже зараз у багатьох країнах світу, загалом його відчуває 1/3 населення планети. Разом з проблемою загального дефіциту прісної води в багатьох регіонах світу значною є проблема чистої прісної води. Є відомості про те, що 1,5 млрд. людей не мають чистої води.

Так, проблема водопостачання стала однією з найважливіших у житті і розвитку людського суспільства.

Далі зупинимося на тенденціях, що наявні під час видобутку мінеральних ресурсів. Розглянемо такі їхні основні види: 1) дорогоцінні метали (золото); 2) залізна руда; 3) боксити (алюмінієва руда).

Згідно з [114] у 2011 р видобуток золота в світі становив близько 2750 т. Порівняно з 2010 р він збільшився на 78 т (2,8 %). Саме велике збільшення золотодобування в 2011 р відзначено в Африці (51 т). Воно відбулося, незважаючи на скорочення обсягів у найбільшій золотодобувній країні цього континенту – ПАР (рівень впав на 5 т). Водночас в інших африканських країнах були побудовані і введені в експлуатацію нові рудники, що забезпечило позитивне зростання виробництва.

Для оцінки динаміки світового видобутку золота ми використали подані в табл. 1.2 дані [114], які в графічній формі наведені на рис. 1.12 і відомий метод вирівнювання кривих [22, 37, 74, 134, 249, 316, 319].

Динаміка виробництва золота по країнам з 2005 до 2011 року

Країни (за алфавітом)	Видобуток золота за роками, т							
	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Австралія	296	263	247	245	211	224	261	259
Гана	74	64	70	75	83	92	81	91
Індонезія	140	167	116	147	93	160	140	115
Канада	155	119	104	101	94	96	91	108
Китай	172	224	247	280	288	324	351	369
Мексика	25	31	39	44	51	62	79	85
Папуа – Нова Гвінея	76	69	60	61	67	71	70	67
Перу	133	208	202	170	175	182	185	178
Росія	143	175	173	169	183	205	203	214
США	355	262	252	239	234	221	229	233
Узбекистан	88	79	75	75	77	73	71	71
ЮАР	428	297	296	270	232	220	203	198
Разом 12 країн	2060	1958	1881	1876	1788	1930	1964	1988
Інші країни	506	564	598	568	621	654	745	824
Разом у світі	2591	2522	2479	2444	2409	2584	2709	2812

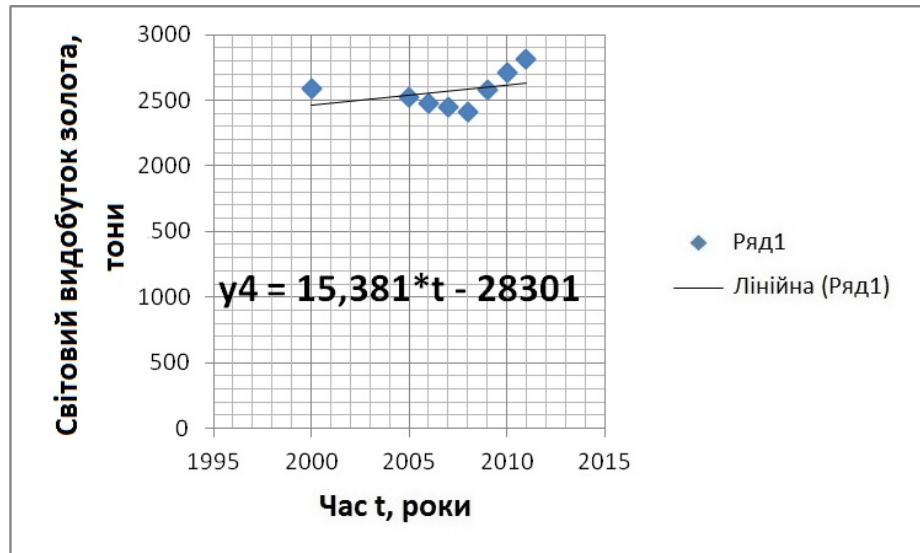


Рис. 1.12. Динаміка світового виробництва золота. Примітки: 1) суцільна лінія – це лінія тренду; 2) на рисунку наведено рівняння тренду

Встановлено, що на розглянутому інтервалі часів наявна залежність:

$$Y_4 = 15,381 \cdot t - 28301, \quad t \in 2000, \dots, 2012 \quad (1.8)$$

Для виявлення тенденції видобутку золота в перерахунку на одного жителя Землі ставлення аналітичних залежностей (1.8) до залежності (1.1), яка відображає динаміку світового зростання населення. Маємо:

$$z_4 = \frac{Y_4}{N} = \frac{15,381 \cdot t - 28301}{\exp[20,606 \cdot \ln(t) - 148,07]}, \quad t \in 2002, \dots, 2100. \quad (1.9)$$

У графічній формі залежність (1.9) наведена на рис. 1.13. Її аналіз, а також аналіз лінії тренду свідчить про те, що наявна чітка тенденція зниження видобутку золота на одну людину, що, своєю чергою, свідчить про вичерпання його світових запасів.

Видобуток залізної руди – одна з найважливіших галузей гірничо-видобувної промисловості. Згідно з [197] світове виробництво залізної руди залежить насамперед від потреби металургійної промисловості. Рис. 1.14, що показує динаміку світового видобутку товарних залізної руди, свідчить про те, що цей попит не завжди був однаково високим.

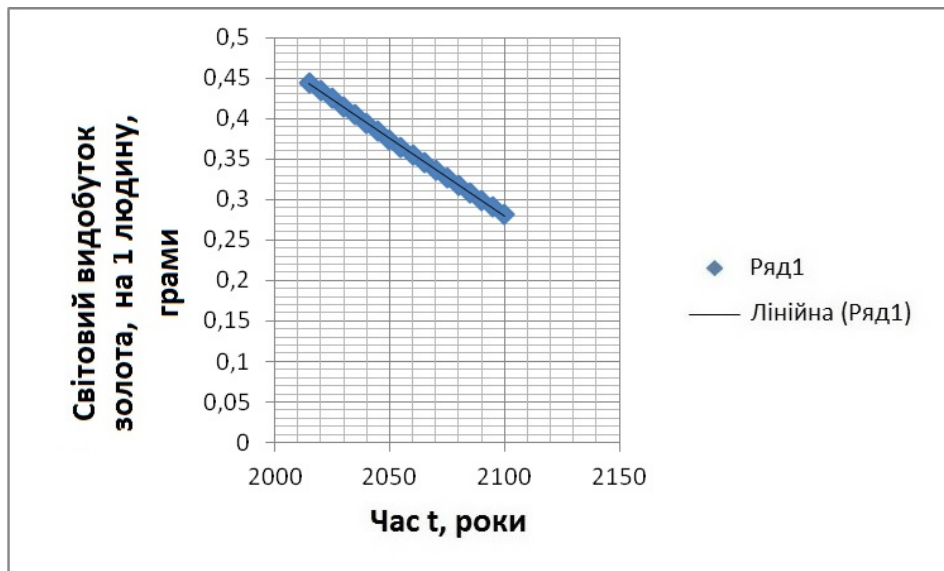


Рис. 1.13. Виробництво золота на одну людину (прогноз). Примітки: 1) суцільна лінія – це лінія тренду; 2) на рисунку наведено рівняння тренду

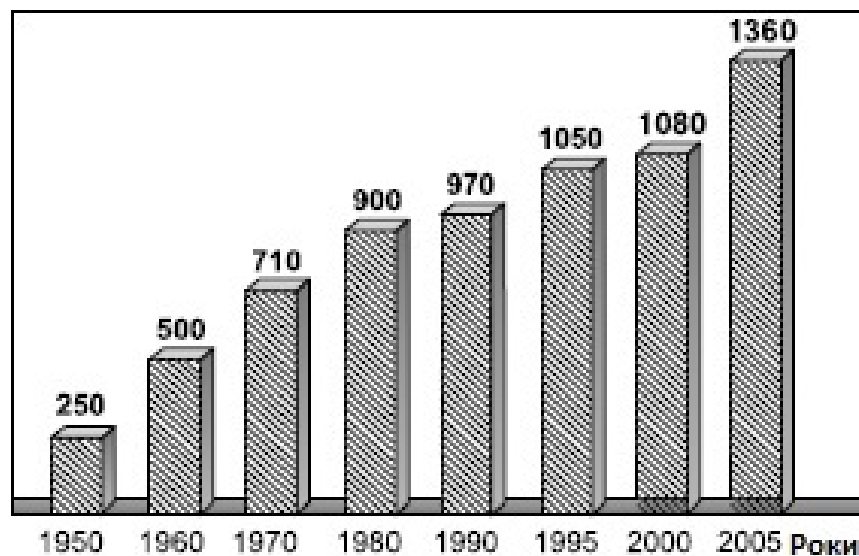


Рис. 1.14. Динаміка світового видобутку залізної руди, млн т

Для оцінки динаміки світового видобутку залізної руди ми використали дані, зазначені на рис. 1.15, і відомий метод вирівнювання кривих [22, 37, 74, 134, 249, 316, 319]. Встановлено, що на розглянутому інтервалі часів наявна залежність:

$$Y_4 = 17,507 \cdot t - 33833, \quad t \in 1950, \dots, 2005 \quad (1.10)$$

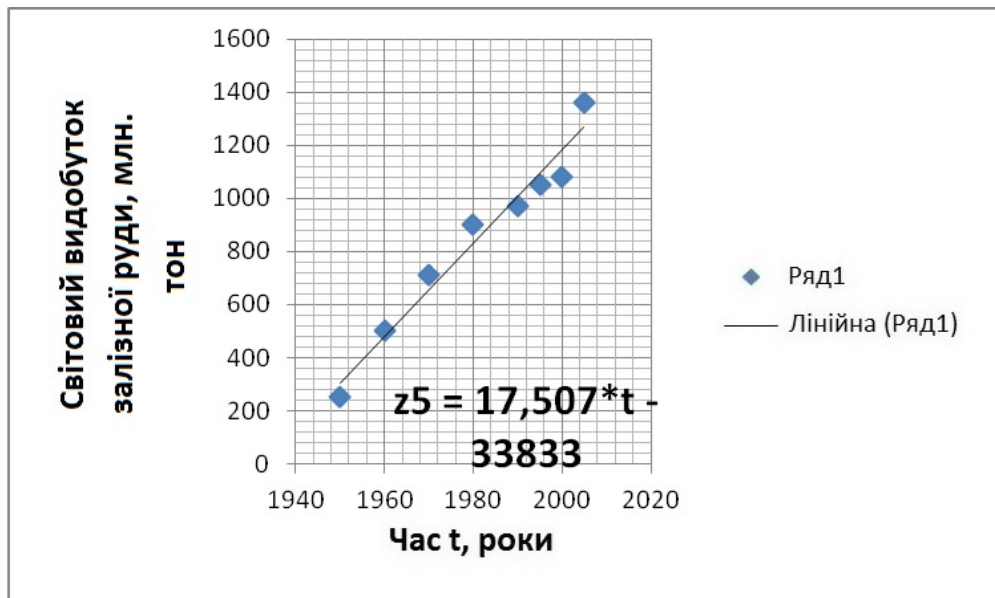


Рис. 1.1.15. Динаміка світового виробництва залізної руди. Примітки: 1) суцільна лінія – це лінія тренду; 2) на рисунку наведено рівняння тренду

Для виявлення тенденції видобутку залізної руди в перерахунку на одного жителя Землі відношення аналітичних залежностей (1.10) до залежності (1.1), яка відображає динаміку світового зростання населення, маємо:

$$z_4 = \frac{Y_4}{N} = \frac{17,507 \cdot t - 33833}{\exp[20,606 \cdot \ln(t) - 148,07]}, \quad t \in 2002, \dots, 2100. \quad (1.11)$$

У графічній формі залежність (1.11) наведено на рис. 1.16.

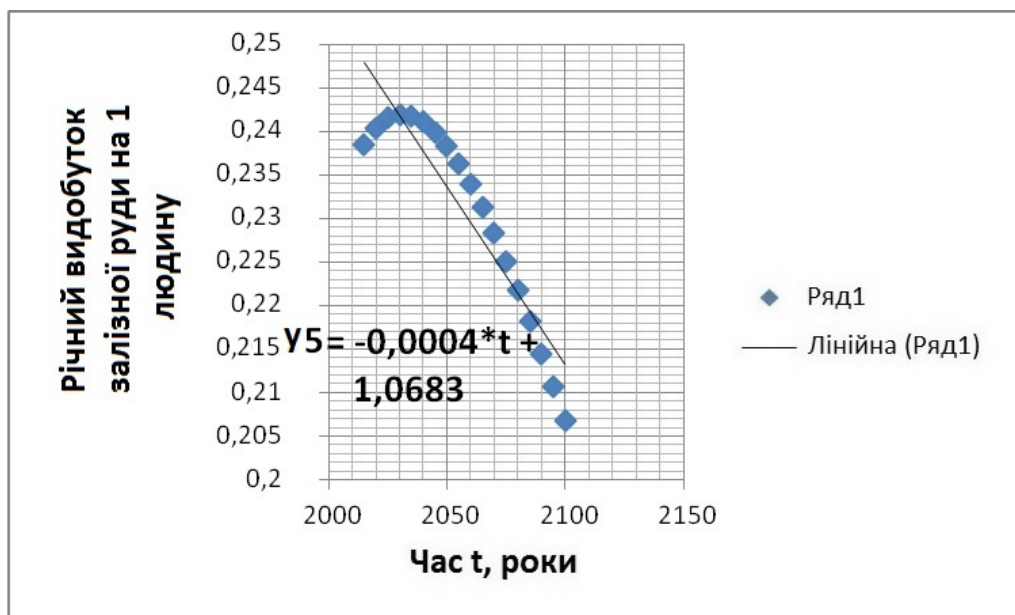


Рис. 1.16. Виробництво залізної руди на одну людину (прогноз). Примітки: 1) суцільна лінія – це лінія тренду; 2) на рисунку наведено рівняння тренду

Аналіз залежності (1.11), а також аналіз лінії тренду дав нам змогу зробити висновок про те, що наявна чітка тенденція зниження видобутку залізної руди в перерахунку на одну людину, що, своєю чергою, свідчить про вичерпування світових запасів залізної руди.

Алюміній застосовують практично у всіх галузях техніки і виробництва. Як конструкційний матеріал його широко використовують у машинобудуванні, особливо транспортному і військовому, в атомній енергетиці, в будівництві.

Для економічної географії господарства вивчення алюмінієвої промисловості становить особливий інтерес, оскільки в ній, мабуть, найяскравіше проявився внутрішньогалузевий міжнародний географічний розподіл праці [113].

Згідно з [113] найбільш всеосяжним показником світових тенденцій в алюмінієвій промисловості є виплавка первинного алюмінію (рис. 1.17).

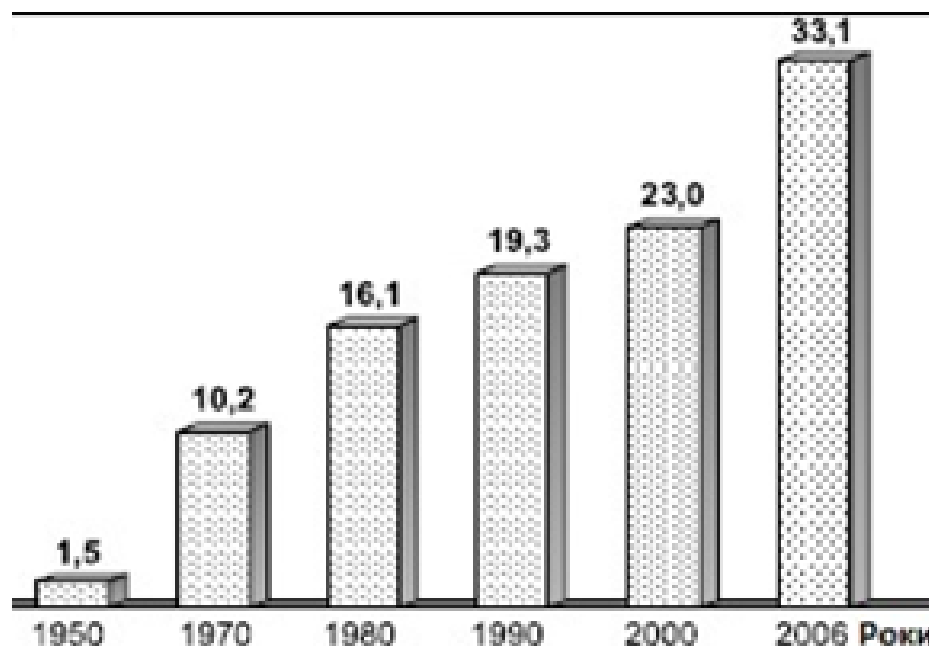


Рис. 1.17. Динаміка світової виплавки первинного алюмінію, млн. т

Щоб оцінити динаміку світової виплавки первинного алюмінію, ми використали дані, наведені на рис. 1.17, і відомий метод вирівнювання кривих [22, 37, 74, 134, 249, 316, 319]. Встановлено (рис. 1.18), що на розглянутому інтервалі часів наявна залежність:

$$Y_6 = 0,5105 \cdot t - 994,97; \quad t \in 1950, \dots, 2006 \quad (1.12)$$

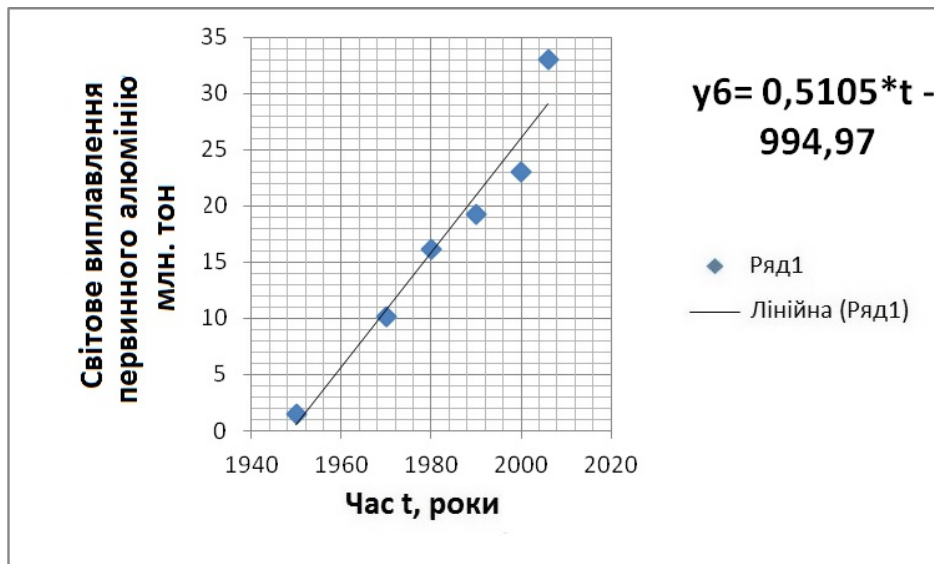


Рис. 1.18. Динаміка світового виробництва первинного алюмінію. Примітки: 1) суцільна лінія – це лінія тренду; 2) на рисунку наведено рівняння тренду

Щоб виявити тенденцію виплавлення первинного алюмінію в перерахунку на одного жителя Землі, наведено аналітичну залежність (1.15), яку зіставлена з (1.1), що відображає динаміку світового зростання населення. Маємо

$$z_6 = \frac{Y_6}{N} = \frac{0,5105 \cdot t - 994,97}{\exp[20,606 \cdot \ln(t) - 148,07]}, \quad t \in 2002, \dots, 2100. \quad (1.13)$$

У графічній формі залежність (1.13) подана на рис. 1.19.

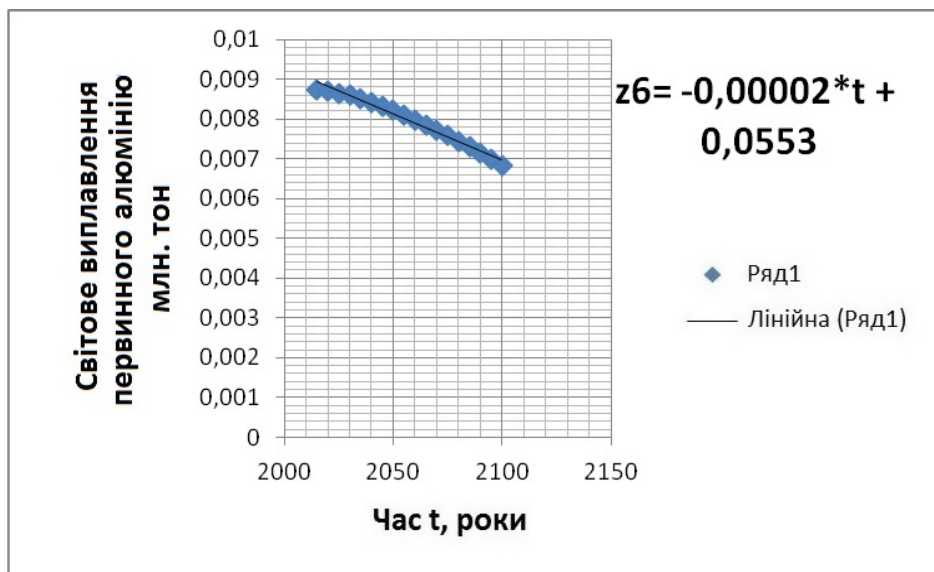


Рис. 1.19. Виробництво первинного алюмінію на одну людину (прогноз). Примітки: 1) суцільна лінія – це лінія тренду; 2) на рисунку наведено рівняння тренду

Аналіз залежності (1.13), а також аналіз лінії тренду дав нам змогу зробити висновок про те, що наявна чітка тенденція зниження виплавлення первинного алюмінію в перерахунку на одну людину, що, своєю чергою, свідчить про вичерпання світових запасів алюмінієвих руд/

Існування світової економіки і людства неможливо без вирішення енергетичної проблеми [13].

У цей час людство споживає такі її джерела: 1) нафта; 2) вугілля; 3) газ; 4) енергія води; 5) атомна енергія.

Залежності світового споживання енергії від часу наведені на рис. 1.1.19 (дані [13, 115]).

Оскільки в цьому разі для всіх видів енергії використовують одну одиницю виміру, то для аналізу тенденцій її споживання доцільно проаналізувати споживання сумарне енергії згідно з роками (рис. 1.1.20).

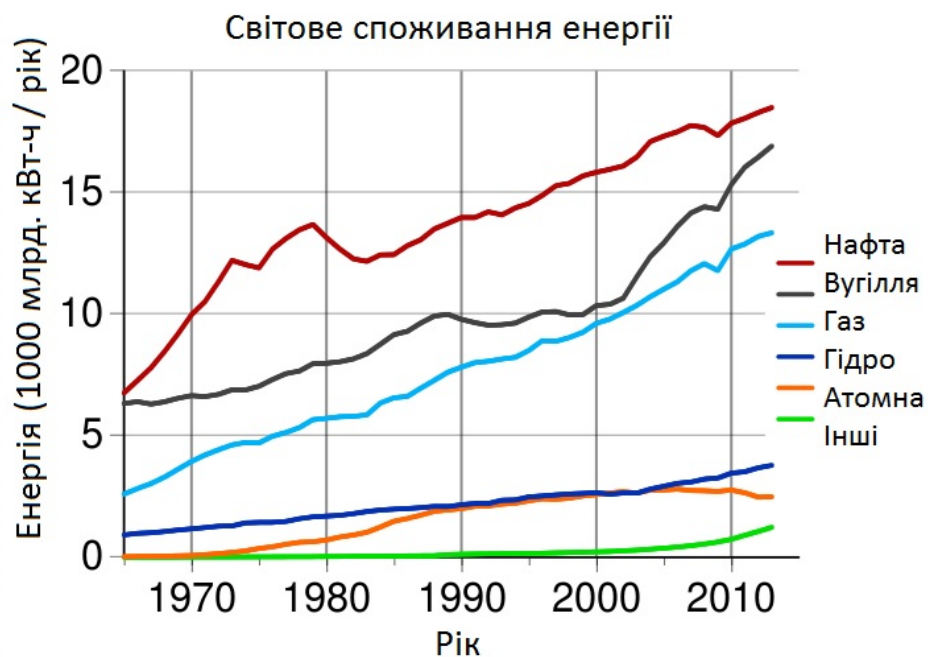


Рис. 1.20. Світове споживання різних джерел енергії

Щоб оцінити динаміку світового споживання енергії, ми використали зазначені на рис. 1.20 дані і відомий метод вирівнювання кривих [22, 37, 74, 134, 249, 316, 319]. Встановлено (рис. 1.21), що на розглянутому інтервалі часів наявна залежність:

$$Y_7 = 0,8209 \cdot t - 1595,6; \quad t \in 1960, \dots, 2020 \quad (1.14)$$

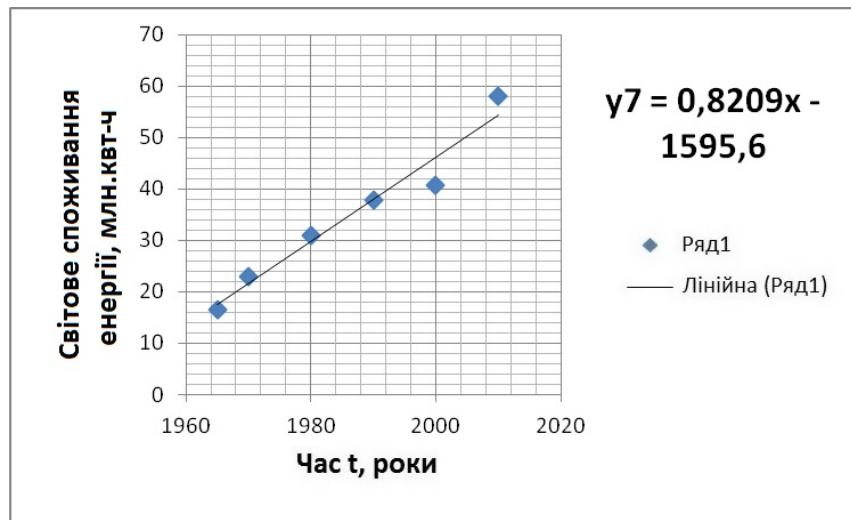


Рис. 1.21. Загальне світове виробництво енергії. Примітки: 1) суцільна лінія – це лінія тренду; 2) на рисунку наведено рівняння тренду

Для виявлення тенденції споживання енергії в перерахунку на одного жителя Землі ставлення аналітичних залежностей (1.14) до залежності (1.1), яка відображає динаміку світового зростання населення. Маємо:

$$z_7 = \frac{Y_7}{N} = \frac{0,8209 \cdot t - 1595,6;}{\exp[20,606 \cdot \ln(t) - 148,07]}, \quad t \in 2015, \dots, 2100. \quad (1.15)$$

У графічній формі залежність (1.15) наведена на рис. 1.22.

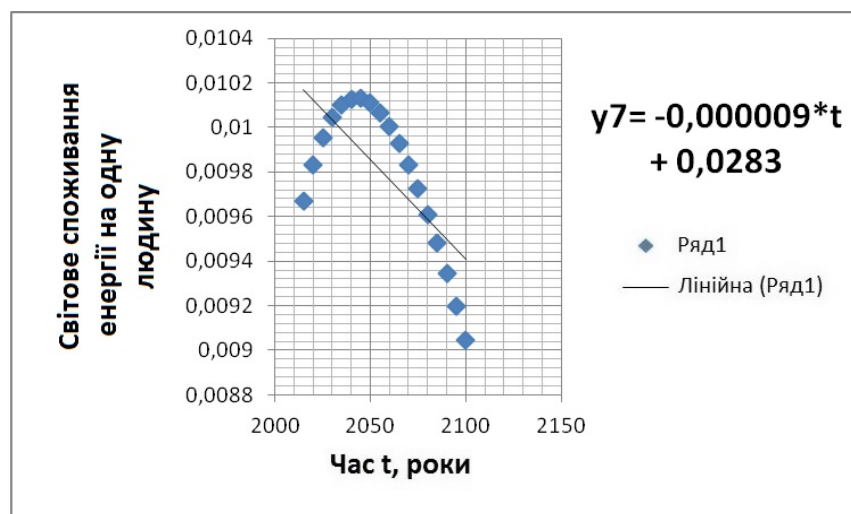


Рис. 1.22. Виробництво первинного алюмінію на одну людину (прогноз). Примітки: 1) суцільна лінія – це лінія тренду; 2) на рисунку наведено рівняння тренду

Аналіз залежності (1.15), а також аналіз лінії тренду на рис. 1.22 дав нам змогу зробити висновок про те, що наявна чітка тенденція зниження споживання енергії в перерахунку на одну людину, що, своєю чергою, свідчить про вичерпання світових запасів енергоносіїв.

Загалом викладені в цьому розділі матеріали досліджень дали нам змогу зробити такі висновки (див. рис. 1.1.23):

- 1) наявна чітка світова тенденція зростання кількості населення планети Земля;
- 2) наявна чітка тенденція зниження в майбутньому виробництва продуктів харчування в перерахунку на одного жителя планети Земля;
- 3) наявна стійка тенденція зниження видобутку мінеральних руд і їхньої первинної переробки в перерахунку на одного жителя планети Земля;
- 4) наявна стійка тенденція зниження споживання енергії в перерахунку на одного жителя планети Земля.

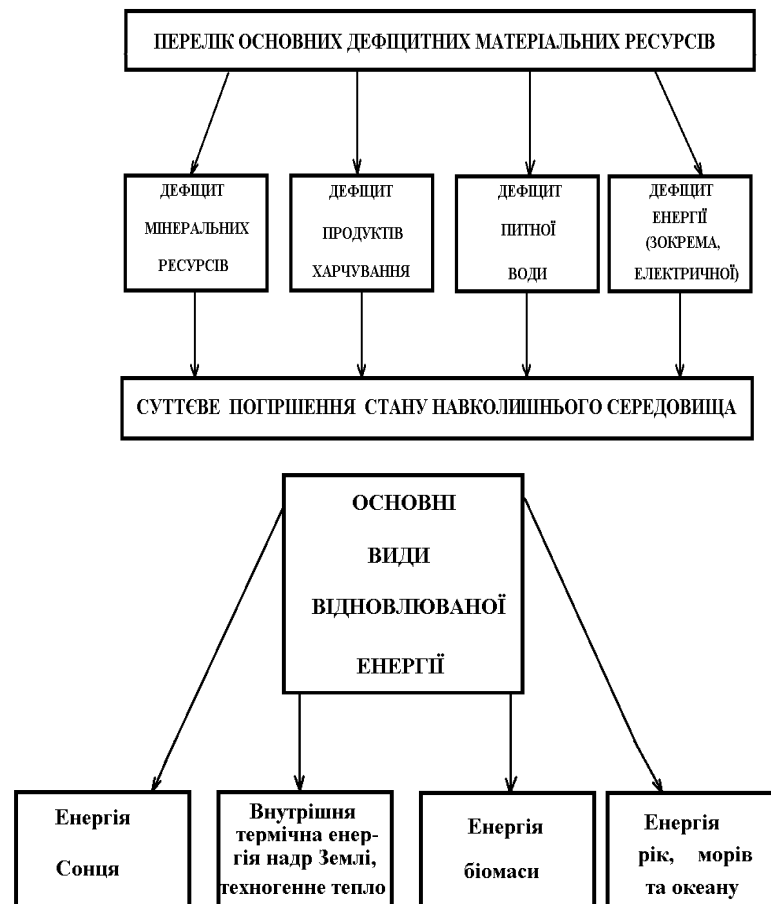


Рис. 1.23. Основні проблеми людства та шляхи їх вирішення

Інакше кажучи, в перспективі ми стикнемося з кризою, зумовленою вичерпанням основних мінеральних ресурсів, а також з продуктовим, водним та енергетичним дефіцитом. На вирішення останньої енергетичної проблеми і спрямовані наведені в цій роботі матеріали досліджень.

Необхідно також зазначити, що отримані нами висновки подібні до висновків авторів роботи [219, 117, 273, 14, 118].

1.2. Перспективи використання різних відновлюваних джерел теплової енергії

У сумарному енергоспоживанні розвинутих країн (США, Німеччина, Японія тощо) частка теплової енергії, яка витрачається на обігрівання і кондиціонування для житлових будинків становить приблизно 86 % від загальної потреби в енергії. Тільки лише на опалення витрачається приблизно 75 % від загальної потреби енергії (рис. 1.24).

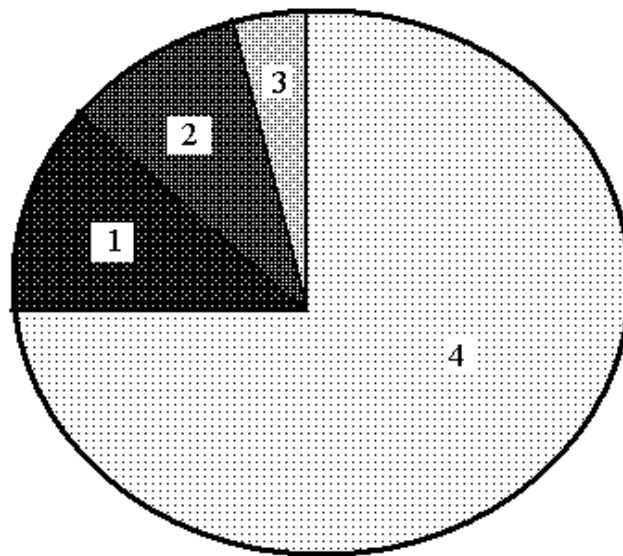


Рис. 1.24. Структура споживання енергії домогосподарствами в розвинутих країнах: 1 – гаряча вода для побутових потреб (11 %); 2 – побутові електричні прилади, зокрема кондиціонери (12 %); 3 – освітлення (2 %); 4 – тепло для обігрівання приміщень (75 %)

Сьогодні ця потреба покривається переважно за рахунок газу і нафти. Оскільки ресурс цих викопних енергоносіїв обмежений і вони належать до невідновлюваних, то їхня вартість постійно зростає. Отже, розвиток теплоенергетики відбувається у таких двох основних напрямках: зниження споживання енергії; використання поновлюваних (іноді їх називають альтернативними) джерел енергії.

У промислово-розвинених країнах зниження споживання енергії відбувається на законодавчому рівні. Наприклад, у Німеччині з 1977 року на державному рівні прийнято обов'язкове для всіх суб'єктів господарської діяльності «Положення про забезпечення енергозберігаючої теплового захисту та застосування енергозберігаючих приладів та обладнання в будівлях». Суть цього положення полягає в тому, що законодавчо створено єдиний збірник правил, що обмежує річні витрати первинної енергії на опалення і гаряче водопостачання (ГВП) – залежно від типу будівлі – від 80 до 140 кВт на 1 м² опалюваної корисної площі на рік (рис. 1.25).

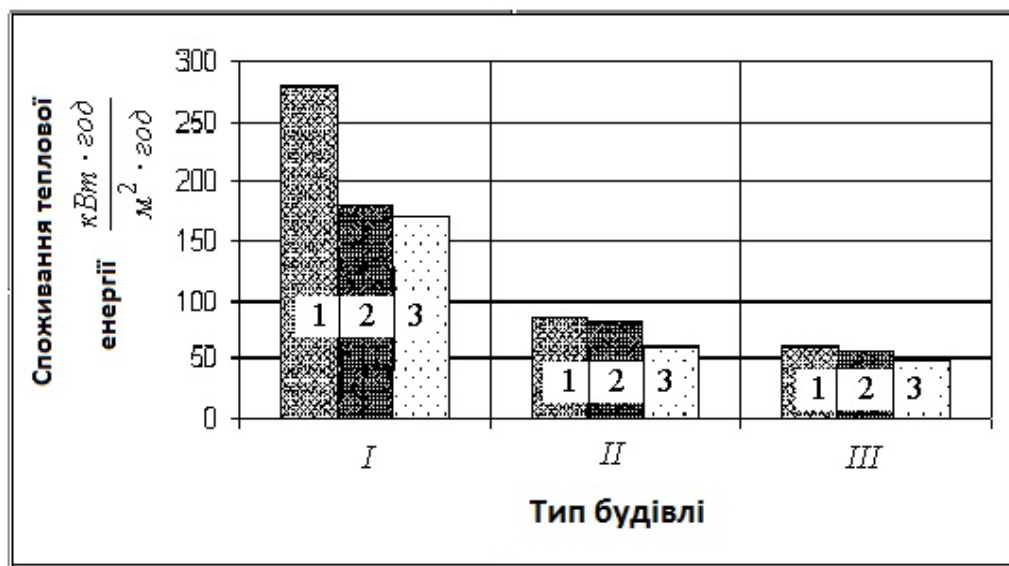


Рис. 1.25. Структура споживання теплової енергії в Німеччині. I – будинок рядової забудови; II – односімейний будинок; III – багатоквартирний будинок. Примітка: на рис. 1.2.2 прийняті такі позначення: 1 – житловий фонд; 2 – будівлі, спроектовані відповідно до вимог положення про теплозахисту; 3 – енергозберігаючий будинок

Далі проаналізуємо ефективність використання для потреб опалення основних регенеративних джерел енергії, які набули найбільшого поширення в цей час.

Основними поновлюваними джерелами в цей час енергії є: енергія випромінювання Сонця; енергія вітру; енергія рухомої води; тепла підземна енергія, зумовлена нагріванням верхньої частини земної кори енергією Сонця; тепла підземна енергія, зумовлена фізико-хімічними процесами, що відбуваються в нижній частині земної кори і мантії; енергія згоряння рослин.

Необхідно зазначити, для кожного з перерахованих джерел відновлюваної енергії відповідає та чи інша ділянка земної поверхні. Тому під час аналізу перспективності отримання того чи того джерела енергії вся територія України умовно була розбита на такі райони: Карпати; Крим; промислові райони; сільськогосподарські райони; узбережжя Азовського і Чорного морів.

Ці дані зведені в табл. 1.3, у якій зазначена коротка характеристика кожного зі зазначених районів України на предмет отримання відновлюваної енергії.

Таблиця 1.3

Характеристика різних районів України щодо наявності в них джерел відновлюваної енергії

№	Назва району	Характеристика району	
		Переваги	Недоліки
1	Карпати	Гірські річки; висока швидкість вітру; чиста атмосфера; починаючи визначеної глибини – цілорічно позитивна температура основи	Сезонні паводки; високий рівень опадів; не достатньо біологічної сировини, придатної для отримання енергії
2	Крим	Велика кількість сонячних днів, на узбережжі висока швидкість вітру; починаючи з визначеної глибини цілорічно позитивна температура основи	Не достатньо біологічної сировини, придатної для отримання енергії

3	Промислові райони	Починаючи з визначеної глибини цілорічно позитивна температура основи	Забруднена атмосфера, низька і середня швидкість вітру
4	Сільськогосподарські райони	Надлишок біологічної сировини, придатних для отримання енергії; починаючи з визначеної цілорічно позитивна температура основи	Низька і середня швидкість зростання вітру, порівняно невелика кількість сонячних днів
5	Узбережжя Азовського і Чорного моря	Висока швидкість вітру; чиста атмосфера; починаючи з визначеної глибини цілорічно позитивна температура основи	Недостатньо біологічної сировини, придатної для отримання енергії

Примітка: вказану таблицю розглядати з табл. 1.3.

На основі поданих у табл. 1.3. даних можна зробити висновок про те, що кожному з розглянутих районів за ефективного використання відповідає певне джерело відновлюваної енергії (табл. 1.3).

Для всіх розглянутих районів України спільним джерелом поновлюваної енергії є низькопотенційне тепло ґрунтів основи з використанням ґрунтових, теплових насосів. Це вказує на перспективність їх застосування на всій території України. Останній факт має непряме підтвердження в тому сенсі, що ґрунтові теплові насоси значно поширились у промислово-розвинених країнах, клімат яких є близьким до клімату України (Австрія, Німеччина, Словенія, південь Швеції та інші країни) див. табл. 1.4. Вагомий внесок у вивчення, розроблення та впровадження в практику застосування теплових насосів зробили такі відомі закордонні дослідники, як Н. Brandl, О. Johansen, R. Katzenbach, В. Sanner, В. Usowicz, Ху Вей та ін.

Далі розглянемо відомі на тепер способи отримання теплової енергії з верхньої частини земної кори, зокрема з використанням ґрунтових теплових насосів:

- пряме обігрівання будівель (як правило, промислових та складських приміщень) без використання теплових насосів за рахунок підземного тепла і циркуляції теплоносія;

Таблиця 1.4

Найперспективніші джерела поновлюваної енергії для різних районів України

№ з/п	Назва району	Джерело енергії
1	Карпати	Міні-гідроелектростанції; вітроелектростанції, теплові насоси
2	Крим	Міні-гідроелектростанції; сонячні батареї вітроелектростанції, теплові насоси
3	Промислові райони	Теплові насоси
4	Сільськогосподарські райони	Теплові електростанції, що працюють на рослинних рештках, реактори біогазу та синтез-газу, теплові насоси
5	Узбережжя Азовського і Чорного морів	Сонячні батареї, вітроелектростанції, теплові насоси

Примітка. Вказану таблицю розглядати з табл. 1.4.

- пряме кондиціонування будівель без використання теплових насосів за рахунок підземного холоду і циркуляції теплоносія;
- основне нагрівання води для побутових цілей з використанням теплового насоса;
- перехід на вищий температурний рівень з використанням теплового насоса (тобто попередній підігрівання води);
- використання теплових насосів для потреб опалення;
- використання теплових насосів для потреб кондиціонування;

- використання теплових насосів у реверсному режимі (тобто для потреб опалення та кондиціонування одночасно);
- використання для прямого опалення теплих стоків, річкової та морської води без застосування теплових насосів;
- використання для прямого охолодження річкової та морської води без застосування теплових насосів.

Залежно від схеми дії опалювальної системи, виду основи і температури ґрунтової води розрізняють такі варіанти відбору ґрунтового тепла:

- витяг геотермальної енергії з ґрунтової товщі безпосередньо, без використання теплових насосів (цей варіант опалення зазвичай використовують в країнах з високою вулканічною активністю, наприклад, в Ісландії);
- сезонне нагромадження теплової енергії з тим, щоб її використовувати в холодну пору року;
- збирання в основі холоду для того, щоб використовувати нагромаджену таким чином енергію для потреб кондиціонування;
- реверсне нагрівання та охолодження основи (в цьому разі нагромаджену теплову енергію влітку використовують взимку для потреб опалення будівлі, а охолодження за рахунок відбору теплової енергії для потреб опалення основи взимку застосовують для потреб кондиціонування влітку).

Для розуміння необхідності прогнозування теплових полів у ґрунтових основах розглянемо принципи функціонування теплових насосів. Ці дані подані в розділі 1.3.

1.3. Принципи функціонування теплових насосів. Методи оцінювання ефективності їхньої роботи

Для концентрації ґрунтового тепла використовують фізичне явище фазових переходів рідини в газоподібний стан і навпаки – газу в рідину [19, 201]. Як робоче тіло, що дає можливість здійснювати такі фазові переходи, використовують спеціальні рідини, які називають холодоагентами. Їхньою основною від-

мінністю від інших рідин є порівняно низька температура кипіння і перехід у рідкий стан за порівняно низьких значеннях тиску. Так, «серцем» теплового насоса є циркуляційний контур, заповнений холодоагентом, він містить конденсатор і компресор. Принципова схема теплового насоса ідентична контуру холодоагенту холодильників наведена на рис. 1.26.

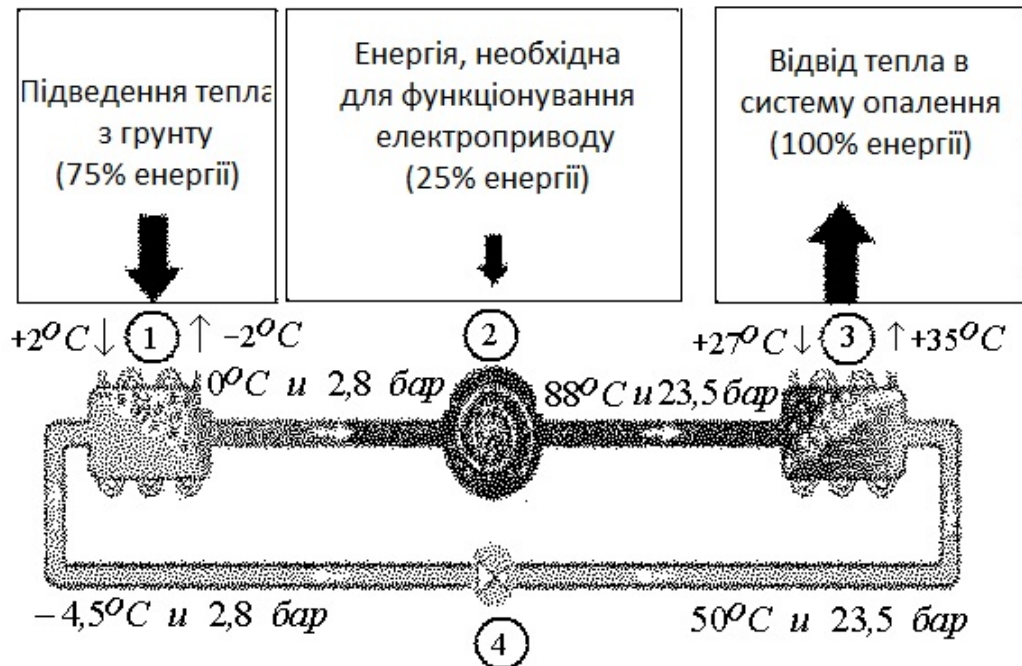


Рис. 1.26. Принципова схема теплового насоса, що працює на холодоагенті R407C: 1 – випарник; 2 – компресор; 3 – конденсатор; 4 – розширювальний клапан

У закритому контурі теплового насоса відбувається почергове випаровування, стиснення, конденсація (скраплення) і розширення робочого речовини-холодоагенту, що закипає вже за невисокої температури (рис. 1.26). Далі розглянемо основні елементи теплового насоса.

1. У випарнику (позиція 1 на рис. 1.26) розташований рідкий холодоагент під впливом низького тиску. Температура холодоагенту нижча, ніж температура джерела тепла (основи), тому тепло від джерела тепла передається холодоагенту, що призводить до його випаровування.

2. Газоподібний холодоагент з конденсатора надходить у компресор (позиція 2 на рис. 1.26). Там він стискається за рахунок високого тиску компресо-

ра) і настільки сильно нагрівається, що температура холодоагенту після компресії стає трохи вищою від температури, необхідної для опалення та гарячого водопостачання.

3. Дуже гарячий холодоагент високого тиску надходить у конденсатор (позиція 3 на рис. 1.26). Там він віддає все своє тепло в систему опалення, де газоподібний холодоагент сильно охолоджується і знову перетворюється на рідину.

4. Після проходження через розширювальний клапан (позиція 4 на рис. 1.26) холодоагент знову повертається у випаровувач. Цикл завершився.

Співвідношення між корисною тепловою потужністю теплового насоса, що витрачається на нагрівання, і використаною потужністю електроприводу компресора називають коефіцієнтом потужності. Його позначають символом « ε » і визначають з використанням такої емпіричної формули:

$$\varepsilon = 0,5 \cdot \frac{T}{T - T_0} = 0,5 \cdot \frac{T}{\Delta T} = 0,5 \cdot \frac{\Delta T + T_0}{\Delta T}, \quad (1.16)$$

де ε – коефіцієнт потужності теплового насоса; T – абсолютна температура приймача тепла (тобто обігрівається) в градусах Кельвіна; $[K]$; T_0 – абсолютна температура джерела тепла в градусах Кельвіна; $[K]$; ΔT – різниця між температурами приймача і джерела, 0,5 – емпіричний коефіцієнт пропорційності.

У графічній формі залежність коефіцієнта потужності від температури джерела тепла T_0 і температури приймача тепла T наведена на рис. 1.26. Цікавою є також залежність коефіцієнта потужності від різниці температур температури приймача тепла T і джерела тепла T_0 (рис. 1.27).

Далі проілюструємо формулу (1.16) і графіки на рис. 1.26 і 1.27 конкретними прикладами. У першому разі розглянемо варіант опалення будівлі з використанням радіатора (батареї) з температурою $50\text{ }^\circ\text{C}$ і температурою джерела тепла (основи) $0\text{ }^\circ\text{C}$.

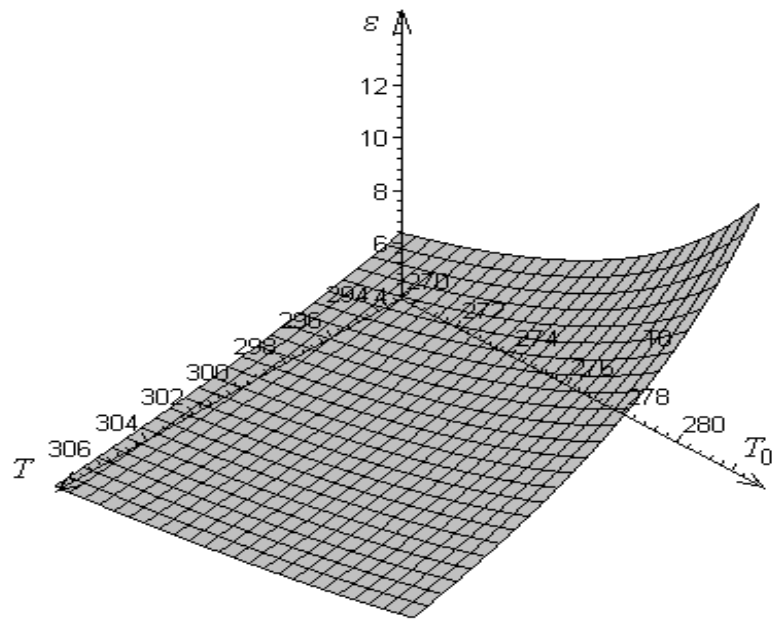


Рис. 1.26. Залежність коефіцієнта потужності від температури джерела

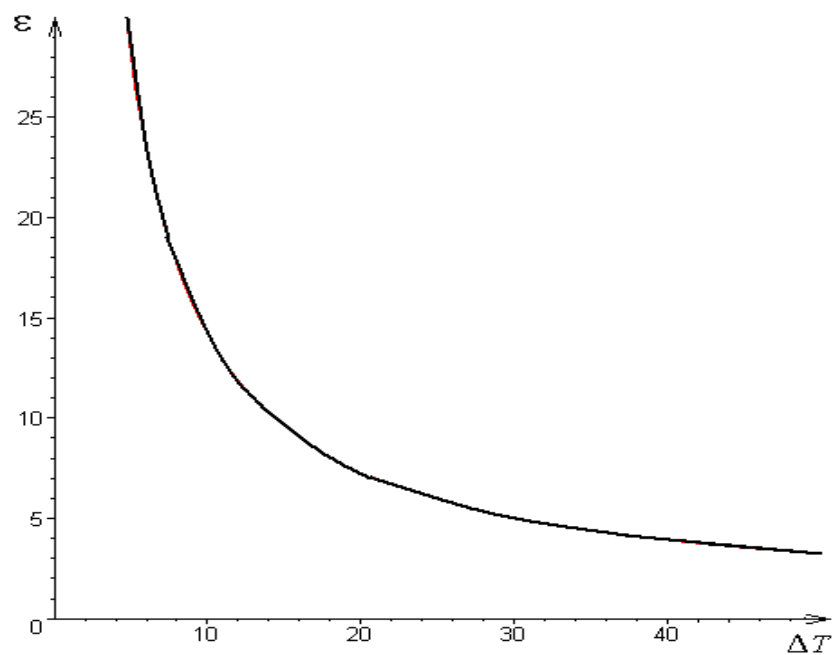


Рис. 1.27. Залежність коефіцієнта потужності від різниці температур споживача тепла T і джерела тепла T_0 $\Delta T = T - T_0$. Примітка. Під час побудови вказаного графіка як температура джерела тепла прийнята температура $T_0 = 273 \text{ K}$

Маємо:

$$T_0 = 273 + 0 = 273 \text{ K} ; T = 273 + 50 = 323 \text{ K} ,$$

$$\text{звідти } \Delta T = T - T_0 = 323 - 273 = 50 \text{ K}$$

$$\text{і } \varepsilon_1 = 0,5 \cdot \frac{\Delta T + T_0}{\Delta T} = 0,5 \cdot \frac{50 + 273}{50} = 3,23 .$$

Тож у цьому конкретному випадку на 1 кВт·год енергії, витраченої на роботу компресора за температури основи T_0 і температури споживача тепла T , вдалося «викачати» з основи 3,23 кВт·год теплової енергії.

У другому випадку розглянемо варіант опалення будівлі з використанням розподіленого джерела обігріву (тепла підлога) з температурою $35 \text{ }^\circ\text{C}$ і температурою джерела тепла (основи) $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Маємо:

$$T_0 = 273 + 0 = 273^\circ \text{ K} ; T = 273 + 35 = 308^\circ \text{ K} ,$$

$$\text{звідки } \Delta T = T - T_0 = 308 - 273 = 35^\circ \text{ K}$$

$$\text{і } \varepsilon_2 = 0,5 \cdot \frac{\Delta T + T_0}{\Delta T} = 0,5 \cdot \frac{35 + 273}{35} = 4,4 .$$

Так, у цьому конкретному випадку на 1 кВт·год енергії, витраченої на роботу компресора, вдалося «викачати» з основи 4,4 кВт·год теплової енергії.

Далі знайдемо відносну похибку між коефіцієнтами потужності, встановленими в першому і другому випадках. Маємо:

$$\Delta = \left| \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{3,23 - 4,4}{4,4} \right| \cdot 100\% = 36\% .$$

Так, опалення будівлі за схемою «тепла підлога» в цьому конкретному випадку виявилось на 36 % ефективніше, ніж радіаторне опалення.

У третьому випадку розглянемо варіант опалення будівлі з використанням розподіленого джерела обігріву (тепла підлога) з температурою $35 \text{ }^\circ\text{C}$ і температурою джерела тепла (основи) $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Маємо:

$$T_0 = 273 + 10 = 283 \text{ K}; T = 273 + 35 = 308 \text{ K},$$

$$\text{звідти } \Delta T = T - T_0 = 308 - 283 = 25 \text{ K}$$

$$\text{і } \varepsilon_3 = 0,5 \cdot \frac{\Delta T + T_0}{\Delta T} = 0,5 \cdot \frac{25 + 283}{25} = 6,16.$$

У цьому конкретному випадку на 1 кВт·год енергії, витраченої на роботу компресора, вдалося «викачати» з основи 6,16 кВт·год теплової енергії.

Далі знайдемо відносну похибку між коефіцієнтами потужності, встановленими в першому і третьому випадках.

$$\text{Маємо: } \Delta = \left| \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{3,36 - 6,16}{3,36} \right| \cdot 100\% = 83,3\%.$$

Так, опалення будівлі за схемою «тепла підлога» і підвищення температури основи в цьому конкретному випадку виявилось на 83,3 % ефективніше, ніж радіаторне опалення, за нижчої температури основи.

На завершення варто зазначити, що існує таке емпіричне (дослідне) правило: «зменшення температури джерела обігріву забезпечує збільшення його коефіцієнта потужності приблизно на 2,5 %».

Коефіцієнт потужності ε відображає співвідношення між корисною тепловою потужністю, що витрачається на нагрів, і використаної електричної потужності приводу компресора. Іноді його називають коефіцієнтом перетворення COP (від англ. Coefficient Of Performance), який визначають за формулами

$$\varepsilon = COP = 0,5 \cdot \frac{T}{T - T_0} = 0,5 \cdot \frac{T}{\Delta T} = 0,5 \cdot \frac{\Delta T + T_0}{\Delta T} = 0,5 \cdot \frac{P_h}{P_{el}}. \quad (1.17)$$

Тут ε, T, T_0 – див. пояснення до формули (1.3.1); COP – коефіцієнт перетворення енергії; P_h – потужність, яка використовується для обігріву; P_{el} – споживана електрична потужність.

Щоб мати можливість для зіставлення теплових насосів різних конструкцій, стандарт DIN EN 255 зумовлює такі параметри: від джерела тепла; еталонна температура джерела тепла; споживана потужність приводу допоміжних агрегатів; значення коефіцієнта перетворення.

Для характеристики теплових насосів використовують аббревіатури:

- BT_0 / WT – для розсільно-водяних теплових насосів;
- WT_0 / WT – для водо-водяних теплових насосів;
- AT_0 / WT – для повітряно-водяних теплових насосів.

Перша група символів (ліворуч від похилої риски) наведених вище аббревіатур характеризує вид теплоносія і його температуру, а друга група символів (праворуч від похилої риски) – вид теплоносія, задіяного в тепловому насосі, і його температуру. Літера «В» означає «розсіл» (від англ. Brine), літера «W» – «вода» (від англ. Water), літера «А» – «повітря» (англ. Air). Цифри вказують на відповідні температури в градусах Цельсія.

У табл. 1.5 наведено характеристики найпоширеніших видів теплових насосів, що використовують тепло ґрунту (1), води (2) і повітря (3).

Таблиця 1.5

Характеристики найпоширеніших теплових насосів

1. Розсільно-водяних теплових насосів		
B0/W35	B0/W50	B5/W50
2. Водо-водяних теплових насосів		
W10/W35	W10/W50	W15/W50
3. Повітряно-водяних теплових насосів		
A7/W35	A7/W50	A15/W50

Зокрема, аббревіатура B0/W35 свідчить про те, що відповідний їй розсільно-водяний тепловий насос використовує тепло розсолу за мінімальної його температури, що дорівнює $T_0 = 0^\circ C$ і в такому разі на виході температура, призначена для опалення води, дорівнює $T_0 = 35^\circ C$.

Абревіатура A7/W50 свідчить про те, що відповідний їй повітряно-водяний тепловий насос використовує тепло повітря за мінімальної його темпе-

ратури, що дорівнює $T_0 = 7^\circ C$ і на виході температура призначеної для опалення води дорівнює $T_0 = 50^\circ C$.

Як доповнення до коефіцієнта потужності потрібно також користуватись т. зв. коефіцієнтом ефективності, який характеризує ефективність роботи опалювального приладу за деякий час. На практиці, як правило, використовують річний коефіцієнт ефективності (англ. seasonal performance factor). Цей коефіцієнт відображає співвідношення між корисним теплом, виробленим тепловим насосом протягом одного року, до сумарної електричної роботи, витраченої на його функціонування. Його позначають символом « β » і розраховують за формулою

$$\beta = \frac{Q_{wp}}{W_{el}}, \quad (1.18)$$

де β – річний коефіцієнт ефективності; Q_{wp} – кількість теплоти, відданої тепловим насосом протягом одного року (вимірюється в [кВт·год]); W_{el} – кількість електричної енергії, спожитої тепловим насосом протягом одного року (вимірюється в [кВт·год]).

Відповідно до DIN V 4701-10 для теплового насоса необхідно також застосовувати методику енергетичної оцінки різних технологій і визначати так звані коефіцієнти витрат теплового насоса.

Ці коефіцієнти дають змогу визначити витрату невідновлюваної енергії, необхідної для вирішення того чи іншого завдання (в цьому разі завдання опалення будівлі або споруди).

Для теплового насоса річний коефіцієнт витратності e_g потрібно визначати за формулою

$$e_g = \frac{1}{\beta} = \frac{W_{el}}{Q_{wp}}, \quad (1.19)$$

де e_g – Коефіцієнт витрат; β – Річний коефіцієнт ефективності; Q_{wp} – кількість теплоти, відданої тепловим насосом протягом одного року (вимірюється в

[кВт·год]); W_{el} – кількість електричної енергії, спожитої тепловим насосом протягом одного року (вимірюється в [кВт·год]).

У цей час також є спеціальне програмне забезпечення, яке через імітаційні розрахунки дає змогу отримувати дуже точні результати.

Треба також зазначити, що ефективність опалення з використанням теплових насосів залежить від режимів їх експлуатації.

Теплові насоси, призначені для опалення приміщень залежно від різних факторів (наприклад, ґрунтових умов, зовнішньої температури тощо) можна експлуатувати найрізноманітнішими способами. Вибір режиму роботи потрібно орієнтувати, насамперед, на вже наявні в будівлі або проєктовані системи тепловіддачі і на вибране джерело тепла. У цьому зв'язку розрізняють такі режими експлуатації теплових насосів: моновалентний; бівалентний; моноенергетичний. У такому разі розрізняють такі джерела тепла [275, 301, 394]: ґрунтові основи; водні джерела (ріки, озера, моря, океани тощо); повітря.

За моновалентного режиму експлуатації теплового насоса він покриває всю потребу в теплі для опалення та гарячому водопостачанні. Оптимальними для цієї мети є такі джерела тепла, як ґрунт і ґрунтові води, оскільки ці джерела тепла мало залежать від зовнішньої температури повітря і за певних умов постачають цілком достатньо тепла навіть за негативних температур на поверхні основи.

За бівалентного режиму роботи систем опалення та гарячого водопостачання використовують два джерела тепла – власне тепловий насос і допоміжний генератор тепла (як правило, це рідкопаливний або газовий котел).

Цю систему зазвичай використовують, коли для опалення будівель і споруд застосовують повітряно-водні теплові насоси (під час їх експлуатації виникають проблеми за негативної температури зовнішнього повітря).

У цей час ці системи отримали незначне поширення. Це зумовлено тим, що для їх функціонування потрібні два теплогенератори, що підвищує вартість і призводить до підвищення складності системи опалення та гарячого водопостачання загалом.

За моноенергетичного режиму енергетичні піки перекриваються за допомогою додатково вбудованого термоелектричного нагрівача (тена). Параметри тена треба вибирати так, щоб в разі пікових навантажень забезпечувалася як потреба гарячої витратної води, так і потреба опалення.

Моноенергетичний вид роботи зарекомендував себе як найекономічніший різновид експлуатації теплових насосів, оскільки в цьому разі можна істотно знизити потужність теплового насоса, а отже, знизити вартість відповідного теплового насоса.

На наш погляд, основна перевага теплового насоса порівняно з іншими джерелами тепла, що використовують невідновлювані джерела енергії, полягає в можливості його функціонування в реверсному режимі. Інакше кажучи, у цьому разі йдеться про довготривале використання безкоштовного тепла навколишнього середовища, яке регенерується.

Як джерело тепла можна використовувати повітря, ґрунтову основу та воду. Як джерело тепла в реверсному режимі можна використовувати лише ґрунт. Отже, враховуючи специфіку цієї наукової роботи, надалі джерелом тепла розглядатимемо тільки ґрунтову основу.

1.4. Аналіз досліджень щодо напружено-деформованого стану ґрунтових основ та фундаментних конструкцій

Колектор теплового насосу розміщують або безпосередньо у ґрунтовій основі, або у фундаментних конструкціях (блоках, палях). Оскільки сам тепловий насос працює або як працює або як нагрівач, або як охолоджувач того тіла, з яким безпосередньо стискається, то у цих тілах (ґрунт, бетон) викликають додаткові температурні напруження і деформації. Вони накладаються на ті напруження і деформації, які викликані вагою фундаментна та над фундаментної конструкції і можуть суттєво впливати на цілісність сусідніх будинків і споруд.

Великий обсяг досліджень у сфері напружено-деформованого стану основ і фундаментних конструкцій був виконаний на протязі останніх 100 років.

У розвиток технології опалення з використанням ґрунтових теплових насосів значний внесок внесли Н. Brandl, О. Jjhansen, R. Catzenbach, В. Sanner, В. Usoviz, Ху Дей і інші дослідники [275, 325, 326].

В основному, в їх роботах відображені технологічні аспекти проблеми і матеріали досліджень, спрямованих на експериментальне і теоретичне визначення температурних полів у ґрунтових основах з використанням чисельних методів скінченних різниць та скінченних елементів. Проти такого підходу можна висунути заперечення, суть якого полягає в тому, що з використанням чисельних методів (за винятком методу граничних елементів) неможливо адекватно задовольнити граничним умовам на нескінченності [32, 108, 109].

При цьому при замерзанні-відтаванні водонасиченого ґрунту істотно змінюються його теплофізичні властивості. Тому в даному випадку визначення температурних чинників в ґрунтовій основі з використанням методів кінцевих різниць і кінцевих елементів практично не має альтернативи [140-141, 225, 226].

У цьому зв'язку нами був зроблений висновок про те, що для досягнення поставленої мети при написанні цієї роботи слід поєднувати чисельні та аналітичні методи розрахунку температурних полів у ґрунтових основах і гірських породах. При цьому аналітичні методи слід використовувати в тих випадках, коли теплофізичні властивості ґрунту слабо залежать від температури і в якості першого наближення при визначенні температурних полів з використанням процесу ітерації.

У країнах СНД проблемою розрахунку температурних полів у ґрунтових основах займалися такі дослідники, як С.С. Вялов, Ф.В. Захаров, А.Б. Пономарьов, А.Ф. Чудновський, В.Г. Шаповал, А.Н. Цитовіч та інші дослідники. Цими авторами використовувалися як чисельні, так аналітичні методи розрахунку [107, 290, 299, 300].

Колектори ґрунтових теплових насосів розташовані всередині ґрунтових основ і підземних частин будівель і споруд [325, 326, 329].

Через різницю температур колекторів і основи, а також коефіцієнтів температурного розширення матеріалу колекторів, матеріалу, з якого виготовлені конструкції, в яких розташовані колектори, а також ґрунту, мають місце температурні деформації і виникають температурні напруження [8, 192, 199].

Крім того, при циклічному замерзанні-відтаванні порової рідини має місце фазових переходів останньої з рідкого стану в твердий стан і навпаки [192, 267, 268]. При цьому при замерзанні порової рідини істотно (до 10%) збільшується її обсяг. Це явище носить назву морозного здимання і знайшло своє відображення в нормативних документах при визначенні глибини закладення підошви фундаменту [62, 89, 250].

При замерзанні порової рідини в зоні впливу колекторів ґрунтових теплових насосів мають місце такі відмінності від сезонного промерзання ґрунту:

1. Процес замерзання-відтавання носить циклічний характер, причому при функціонуванні ґрунтового теплового насоса в режимі кондиціонування відбувається перегрів основи, а в режимі опалення - переохолодження.

2. Зони замерзлого ґрунту можуть поширюватися на значні глибини (у разі U-образного колектора теплового насоса) і відстані (у разі плоского колектора теплового насоса).

На наш погляд, облік зазначеного явища слід виконувати так, як це роблять при розрахунку деформацій обдимання гірських порід (роботи А.Н. Шашенко та його учнів), а також деформацій набухання та усадки [89, 250, 267, 268].

Спроба обліку явища морозного здимання ґрунту в зоні впливу ґрунтового теплового насоса була зроблена авторами вітчизняних нормативних документів [202], які, однак, допустили ряд неточностей (див. Розділ 6.1 цієї роботи).

У цьому зв'язку доцільно познайомитися з сучасним підходом до моделювання напружено-деформованого стану ґрунтових основ.

Нами було встановлено, що в даний час при моделюванні напружено-деформованого стану основ будівель і споруд зазвичай надходять так:

1. Залежно від розв'язуваної задачі вибираються та чи інша модель і розрахункова схема ґрунтової основи.

2. Далі визначаються матеріальні константи ґрунту, що входять до моделі (наприклад, щільність, модуль загальної деформації, коефіцієнт Пуассона, кут внутрішнього тертя, питоме зчеплення і т.д.).

3. З використанням отриманих таким чином даних виконується розрахунок напружено-деформованого стану основи і далі вибір типу фундаменту, підбір його розмірів у плані і т.д.).

Зазвичай вибір тієї чи іншої моделі основи базується на даних експериментальних дослідженнях тих чи інших властивостей ґрунту (наприклад, його пружних, пластичних, фільтраційних або інших властивостей).

Розрахункова схема ґрунтової основи вибирається в ході аналізу геометрії завантаженої області. Наприклад, якщо відношення довжини подошви фундаменту L до його ширини b $\frac{L}{b} < 10$, то приймають розрахункову схему півпростору, а якщо $\frac{L}{b} \geq 10$, то приймають розрахункову схему півплощині.

Крім того, вибір розрахункової схеми основи також залежить від глибини залягання жорсткого підстилаючого шару ґрунту (наприклад, скелі). В даному випадку розрізняють розрахункові схеми півпростору або півплощини (скеля залягає на значній глибині або відсутній взагалі) і шару кінцевої товщини (скеля залягає поблизу від подошви фундаменту).

Основною їх відміною особливістю ґрунтових основ є несучільність (роздробленість, дискретність) їх будови.

Багатокомпонентний склад ґрунтів, їх пористість, вологість, структурний зв'язок між частинками, складна взаємодія різних компонент один з одним приводять до особливих властивостей цих матеріалів, істотно відмінними від властивостей конструкційних матеріалів (наприклад, сталі, бетону, цегли і т.д.).

Стан і властивості ґрунтів в основі добудованої споруди також може змінюватися в процесі його експлуатації.

Будівництво нових споруд поряд з існуючими, ведення підземних робіт, реконструкція старих споруд і т.п. також призводять до додаткових впливів на ґрунти і основи вже побудованих споруд. У результаті в ґрунтах можуть знову розвиватися процеси, що ускладнюють експлуатацію споруд.

У концентрованій формі викладене вище можна сформулювати так.

1. Ґрунти володіють особливими (тобто відмінними від властивостей інших конструкційних матеріалів) властивостями.

2. Ці властивості слід визначати на кожний новий майданчик будівництва.

3. Властивості ґрунтових основ постійно трансформуються в часі. При цьому основними причинами трансформації є:

- геологічні та інші процеси, що протікають в основі (їх, у свою чергу, підрозділяють на швидкі і повільні);

- різні зовнішні впливи.

4. Все це викликає необхідність розробки зовсім іншого підходу до досліджень, розрахунками та проектування основ, ніж це прийнято в інженерній практиці стосовно до конструкційних матеріалів.

При моделюванні розрізняють такі властивості ґрунту:

- міцностні;

- деформаційні;

- реологічні.

У цьому зв'язку в даний час використовуються такі моделі ґрунтових основ.

1. Моделі, що дозволяють виконувати розрахунок міцності і стійкості ґрунтових масивів.

2. Моделі, що дозволяють виконувати розрахунок ґрунтових масивів за деформаціями.

3. Моделі, що дозволяють прогнозувати зміну міцності, стійкості і деформації ґрунтових масивів в часі.

4. Комбіновані моделі.

Перша група моделей дозволяє виконувати прогноз міцності і стійкості ґрунтових основ.

З використанням другої групи моделей виконується прогноз міцності і стійкості ґрунтових основ.

Третя група моделей дозволяє враховувати трансформацію (тобто зміну) властивостей основ в часі.

В даний час ведуться дослідження з розробки моделей основ, що володіють комбінацією перерахованих властивостей, наприклад, деформаційних і міцнісних, деформаційних і реологічних і т.д. (т.зв. моделі четвертої групи).

Ґрунти та гірські породи можуть мати як безперервне будову (скеля), так і складатися з окремих частинок (пісок, щебінь).

У цьому зв'язку розрізняють такті дві основні групи моделей ґрунтових основ:

- модель дискретного середовища;
- модель суцільного середовища.

У першому випадку ґрунт інтерпретують як сукупність окремих частинок куль, дисків, балочок і т.д., які тим чи іншим чином взаємодіють між собою.

У другому випадку ґрунт інтерпретують як суцільну, що не має пор середу.

Реалізація на практиці першої групи моделей пов'язана з великими складнощами. Тому в даний час не існує закінченої теорії деформування ґрунтів. У цьому зв'язку сучасна механіка ґрунтів ґрунтується на уявленнях про ґрунти як про суцільне середовище.

При цьому, однак, необхідно виконання таких правил, обмежень і припущень.

1. Вводиться поняття елементарного об'єму ґрунту, тобто такого його обсягу, лінійний розмір якого в багато разів перевищує лінійний розмір частинок або агрегатів, що складають цей ґрунт.

2. Рахують, що діючі в ґрунтовій основі напруження і деформації відносяться вже не до точки (так поступають в механіці суцільного середовища), а до майданчиків, відповідним деякого елементарного об'єму.

3. При визначенні тих чи інших властивостей основи розміри зразка ґрунту повинні бути значно більше лінійного розміру елементарного об'єму.

4. Використання апарату механіки суцільного середовища для розрахунків напружень і деформацій в масиві ґрунту виявляється справедливим тоді і тільки тоді, коли розміри розрахункової області в цілому і розміри майданчиків, через які передаються навантаження, значно більше розміру елементарного об'єму ґрунту.

Необхідно відзначити, що для піщаних і пілувато-глинистих ґрунтів ці умови завжди виконуються. При цьому у разі великоуламкових і тріщинуватих скельних ґрунтів вже може знадобитися перехід до великомасштабних польових дослідів

При описі властивостей суцільного середовища розрізняють дві основні групи моделей заснування:

- модель ізотропного середовища;
- модель анізотропного середовища.

В основу першої групи моделей покладено уявлення про те, що властивості ґрунту однакові в усіх напрямках, а у другому-ні. Наприклад, при використанні моделі анізотропного ортотропної основи вважають, що її властивості в горизонтальному і вертикальному напрямку відрізняються один від одного.

Також розрізняють:

- лінійні моделі основ;
- нелінійні моделі основ.

У другому випадку вважають, що матеріальні константи (наприклад, модуль загальної деформації) залежать від напружено-деформованого стану ґрунтової основи, а в другому-ні.

В даний час більшість інженерних завдань вирішується з використанням лінійних моделей ґрунту. Це пояснюється тим, що при реалізації нелінійних моделей основ виникають значні математичні труднощі. При цьому проблемою є відсутність методик визначення вхідних у них матеріальних констант.

В даний час існують два основних види розрахунків основ – за міцністю і за деформаціями. Крім того, останнім часом все частіше використовується комбінований підхід, який реалізовано в сучасних програмних комплексах [37, 38, 61, 67, 154, 158, 159, 169, 250, 256 - 258, 310].

Система рівнянь, необхідна для розрахунку ґрунту і гірських порід на міцність і стійкість включає в себе дві групи рівнянь - рівняння рівноваги і рівняння стану (їх іноді називають критеріями міцності). Найбільш часто використовуються критерії Кулона-Мора (якщо породи залягають на невеликій глибині) і критерій А.Н. Шашенко (якщо породи залягають на значній глибині) [307, 311].

Значно рідше в якості рівнянь стану використовують критерії С.С. Вялова, Тріска-Хілла, Мізеса-Боткіна, Дж. Уетта, Рассказова та інші.

Критерій міцності Кулона-Мора при прогнозі міцності ґрунтів може враховувати як одновимірну, так і просторову роботу ґрунтів і гірських порід.

У одновимірному випадку він має вигляд:

$$\tau \leq (\sigma - U) \cdot \operatorname{tg}(\varphi) + c, \quad (1.20)$$

а просторовому –

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2 \cdot c \cdot \operatorname{ctg}(\varphi)} &\leq \sin(\varphi), \\ \sigma_1 &> \sigma_2 > \sigma_3. \end{aligned} \right\} \quad (1.21)$$

Тут τ і σ – діючі в деякій точці основи дотичне і нормальне напруження, U – тиск в поровій рідині (іноді його називають нейтральним); σ_1 , σ_2 и σ_3 головні напруження в точці, φ – кут внутрішнього тертя, а c – питоме зчеплення ґрунту.

Згідно (1.21) руйнування ґрунту відбувається тільки лише під впливом максимального і мінімального значень діючих в точці головних напружень.

Вважаючи в (1.20) и (1.21) $\varphi \neq 0$ і $c = 0$, ми отримаємо закон Кулона для сипучого ґрунту (піску), і, поклавши $c \neq 0$ і $\varphi = 0$, ми отримаємо закон Кулона для зв'язного ґрунту (жирні глини, або), нарешті, вважаючи в (1.20) $U = 0$ ми прийдемо до умові міцності Кулона для водонасиченого ґрунту.

Значний внесок у розвиток методів розрахунку ґрунтових основ і гірських порід на міцність і стійкість внесли такі дослідники, як С.С. В'ялов, М.Н. Гольдштейн, Ю.К. Зарецький, Г.К. Клейн, В.В. Соколовський, Л.Т. Роман, А.Я. Туровська, А.Н. Шашенко та інші автори [36, 39, 41, 42, 45, 106, 127, 128, 213, 215, 236].

Для розрахунку основ за деформаціями в якості рівняння стану використовують узагальнений закон Гука і його модифікації (див. Розділ 2) [9, 62, 192].

Необхідно відзначити, що в нормативні документи діючі в даний час закладена вимога, згідно з якої середній тиск під подошвою фундаменту не повинно перевищувати т.зв. розрахункового опору R , який має фізичний сенс такого максимального тиску, до перевищення якого діаграма «осідання-навантаження» має вигляд прямої лінії. Іншими словами, у практиці розрахунку основ за деформаціями зазвичай застосовується лінійна теорія пружності [89].

Це істотно спрощує задача, що вирішується, це визначення деформацій гірських порід у зоні дії колектора теплового насоса.

Значний внесок у становлення і розвиток методів розрахунку основ і гірських порід за деформаціями внесли такі автори, як Ю.Л. Винников, С.С. Вялов, М.Н. Гольдштейн, Б.І. Далматов, К.Є. Єгоров, С.Г. Кушнір, М.О. Малишев, Н.Н. Маслов, В.А. Флорін, А.Н. Шашенко.

Вода істотно впливає на властивості глинистих ґрунтів. Зокрема, міцнісні властивості обводнених основ істотно нижче, ніж неводонасичених [36, 39, 42, 45, 46, 58, 60, 61, 63, 104, 198, 216, 248].

При цьому істотно підвищується деформативність ґрунту [41, 58, 60, 85, 148, 216, 247].

Вода в порах ґрунту суттєво впливає на розвиток осідання основ. Цей вплив проявляється у вповільненому часі осідання побудованих на водонасичених основах фундаментів і носить назву фільтраційної консолідації.

Проблемою визначення напружено-деформованого стану водонасичених основ займалися такі автори, як Ю.М. Абелем, С. Баттон, С.І. Головка, М.В. Лятхер, В.Г. Шаповал, В.Б. Швець, М. Biot [18, 26, 281, 287, 288, 294, 296, 298, 308, 309, 312].

Явище запізнювання в часі деформацій, обумовлено віджатою з пор ґрунту води, дозволяє враховувати модель лінійної пружної ізотропної водонасиченої основи. Ця модель базується на таких припущеннях.

1. Ґрунтовий скелет основи має властивості лінійно ізотропного пружного середовища.

2. Напружено-деформований стан основи визначається взаємодією його твердої і рідкої фаз.

Поровий тиск залежить від напружено-деформованого стану ґрунтового скелета і навпаки - напружено-деформований стан ґрунтового скелета залежить від величини порового тиску.

3. Порова рідина підкоряється законам Архімеда і Паскаля.

4. Поровий тиск є об'ємною силою.

5. Порова рідина не пручається зрушенню.

Цим допущенням відповідають рівняння виду:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \frac{k\phi}{\gamma_w} \Delta P;$$

$$\sigma_x = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_x + \lambda \cdot e - P;$$

$$\sigma_y = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_y + \lambda \cdot e - P;$$

$$\sigma_z = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_z + \lambda \cdot e - P;$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = G \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right);$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = G \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right);$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = G \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right);$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial W}{\partial z};$$

$$e = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z};$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y};$$

$$\gamma_{xz} = \gamma_{zx} = \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x};$$

$$\gamma_{yz} = \gamma_{zy} = \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y};$$

$$e = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z}. \quad (1.22)$$

Тут $\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}$ і $G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$ – пружні константи Ламе; E и ν – технічні пружні константи (відповідно модуль пружності і коефіцієнт Пуассона ґрунту); σ_x, σ_y и σ_z – нормальні напруження; τ_{xy}, τ_{xz} и τ_{yz} – дотичні напружен-

ня; $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ и ε_z – нормальні лінійні відносні деформації; γ_{xy}, γ_{xz} и γ_{yz} – кутові деформації; U, V и W – лінійні переміщення в напрямку координатних осей

$0x, 0y$ и $0z$ відповідно; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа в декартовій системі координат.

Перше рівняння системи (1.22) називається рівнянням порового тиску.

Далі знайдемо проєкції порового тиску P на координатні осі $0x, 0y$ и $0z$.

Вони дорівнюють відповідно $\frac{\partial P}{\partial x}, \frac{\partial P}{\partial y}$ и $\frac{\partial P}{\partial z}$.

Тоді рівняння рівноваги переміщень в рамках моделі невагомої лінійної пружної ізотропної водонасиченої основи мають вигляд:

$$\begin{aligned} G \cdot \Delta U + (\lambda + G) \cdot \frac{\partial e}{\partial x} &= \frac{\partial P}{\partial x}; \\ G \cdot \Delta V + (\lambda + G) \cdot \frac{\partial e}{\partial y} &= \frac{\partial P}{\partial y}; \\ G \cdot \Delta W + (\lambda + G) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} &= \frac{\partial P}{\partial z}. \end{aligned} \quad (1.23)$$

Для обліку інерційних сил до правої частини (1.23) слід додати інерційні сили. У цьому випадку рівняння рівноваги водонасиченої основи приймуть вигляд:

$$\begin{aligned} G \cdot \Delta U + (\lambda + G) \cdot \frac{\partial e}{\partial x} &= \frac{\partial P}{\partial x} + \rho \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}; \\ G \cdot \Delta V + (\lambda + G) \cdot \frac{\partial e}{\partial y} &= \frac{\partial P}{\partial y} + \rho \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}; \end{aligned}$$

$$G \cdot \Delta W + (\lambda + G) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} = \frac{\partial P}{\partial z} + \rho \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial t^2}. \quad (1.24)$$

Тут ρ - середня щільність водонасиченого основи.

Слід зазначити, що ґрунти і гірські породи мають реологічні властивості - повзучості і релаксації.

В ряду виконаних у цьому напрямку робіт слід відзначити роботи С.С. В'ялова, М.Н. Гольдштейна, Н.К. Пекарській, А.Р. Ржаніцина, Г.І. Тер-Степаняна, Л. Шукла, М. Біо [40, 42, 46, 63, 211, 239, 281, 313].

Мабуть найбільш простий спосіб врахування реологічних властивостей ґрунтових основ при прогнозі їх деформацій полягає у використанні для опису повзучості рівнянь В. Вольтерра другого роду (роботи В.А. Флоріна, С.С. В'ялова, Н.А. Цитовіч, Ю.К. Зарецького та інших авторів [37, 106, 256, 257, 269,]).

Слід зазначити, що повзучість ґрунтів і гірських порід проявляється при відносно високих тисках. Тому при проведенні подальших досліджень це явище нами враховуватися не буде.

Далі зупинимося на впливі властивостей ґрунтів і гірських порід при їх циклічному заморожуванні-відтаванні, оскільки це явище має місце в зоні дії колекторів теплових насосів [51].

Згідно з отриманими С.С. Вяловим, В.В. Лушнікова, Н.К. Пекарській, Р.Т. Роман, Н. А. Цитовіч даними при замерзанні-відтаванні ґрунтів відбувається різке підвищення їх деформативності [37, 40, 42, 47, 198, 214, 215, 268].

У цьому сенсі показовими є виконаними Є.І. Ратьковим експерименти, в ході яких у процесі заморожування-відтавання в компресійному приладі визначався модуль загальної деформації суглинного ґрунту. Було відзначено зниження останнього до 40%.

А.М. Глобусом були складені фазові діаграми ґрунтів у процесі їх замерзання. Виявилось, що причиною повзучості мерзлих ґрунтів є наявність водних плівок, за якими відбувається ковзання ґрунтових частинок і їх зміщення один щодо одного.

Це явище обов'язково необхідно враховувати при експлуатації ґрунтових теплових насосів, особливо в тих випадках, коли їх колектори знаходяться поблизу або нижче рівня підземних вод.

У цьому зв'язку доцільно проаналізувати роботи, присвячені розрахунку і проектуванню фундаментів на основах, складених мерзлими і сезонно - мерзлими ґрунтами [38, 40, 42, 47, 198, 212-215, 268].

Виявилося, що в даному випадку найбільшою проблемою є різке погіршення властивостей ґрунтових основ, в силу чого:

- Відбувається зниження міцності ґрунтів, що складають основу;
- Підвищуються деформації розташованих на ній фундаментів і, що більш небезпечно, нерівномірність їх осідань;
- Істотно (до 45%) знижується несуча здатність висячих паль;
- Зменшується розрахунковий опір основи (тобто воно починає поводитися як нелінійна середа).

Вказані явища знайшли своє відображення в нормативних документах (звід правил СП 25.13330.2012). Основи і фундаменти на вічномерзлих ґрунтах.

У світлі розв'язуваної нами проблеми представляє інтерес прогноз осідань фундаментів на відталих основах і визначення сил морозного здимання ґрунту при замерзанні.

Зупинимося на викладі положень СП докладніше.

Згідно зводу правил, розрахунки основ за деформаціями необхідно проводити в межах розрахункової глибини відтавання ґрунтів в основі споруди за заданий термін його експлуатації з урахуванням розвитку зони відтавання в часі.

При цьому розрахункову глибину відтавання ґрунтів в основі споруди слід визначати розрахунковим шляхом з урахуванням теплової взаємодії споруди з багато років мерзлих ґрунтів з урахуванням:

- Форми, розмірів і теплового режиму споруди;
- Теплофізичних властивостей ґрунтів основи;
- Врахування природних коливань температури.

У результаті розрахунку відтавання основи за деформаціями необхідно домогтися виконання умови:

$$S \leq S_u \quad (1.25)$$

де S - осідання основи фундаментів (спільна деформація основи і споруди при відтаванні ґрунтів у процесі експлуатації споруди під впливом власної ваги ґрунту і додаткового навантаження від споруди в межах розрахункової глибини відтавання H); S_u - граничне значення опади основи фундаменту (сумісної деформації основи і споруди).

Точно таку ж умов необхідно виконати при розрахунку осідання з використанням вітчизняних нормативних документів (тобто ДБН).

При цьому при розрахунку основ і фундаментів за деформаціями з урахуванням спільної роботи основи і споруди необхідно домогтися виконання такої умови

$$F_f \leq \frac{F_{fd}}{\gamma_c \gamma_n} \quad (1.26)$$

де F_f - розрахункові зусилля, що виникають в елементах конструкцій споруди при нерівномірних осіданнях відталої основи;

F_{fd} - граничні значення опору елементів конструкції споруди, що розраховуються за нормами проектування відповідних конструкцій;

γ_c - коефіцієнт умов роботи системи «основа-споруда», прийнятий рівним 1,25;

γ_n - коефіцієнт надійності за призначенням споруди, приймається 1,2, 0,95 і 0,9 відповідно для споруд I, II і III рівнів відповідальності.

Розрахунок зусиль в елементах фундаментних конструкцій і реактивних тисків ґрунтів виконують, як правило, чисельними методами на основі рівнянь будівельної механіки з урахуванням залежностей реактивних тисків від нерівномірних осідань основи.

При цьому відтаювання основи слід розглядати як лінійно-деформований шар кінцевої товщини.

На наш погляд, умова (1.26) в даному випадку є надлишкова, оскільки в даний час розрахунок будівельних конструкцій проводиться на різні поєднання навантаження, однією з яких є вплив нерівномірностей осідання фундаментів.

Допускається застосовувати інші розрахункові схеми, в тому числі з використанням імовірнісних методів розрахунку, що враховують статистичну неоднорідність основи.

При розрахунку основ і фундаментів за деформаціями середній тиск основи під подошвою фундаменту від основного сполучення навантажень не повинен перевищувати розрахунковий тиск основи R , що визначається за розрахунковими характеристиками відтаювання ґрунтів.

У СП 25.13330.2012 також наведені рекомендації щодо визначення осідання відталої основи в процесі експлуатації споруди.

Її слід визначати за формулою:

$$S = S_{th} + S_p \quad (1.27)$$

де S_{th} - складова осідання основи, що зумовлена дією власної ваги відталого ґрунту;

S_p - складова осідання основи, що обумовлена додатковим тиском на ґрунт від дії ваги споруди.

Складові осідання основи S_{th} , необхідно розрахувати за формулою

$$S_{th} = \sum_{i=1}^n (A_{th,i} + m_{th,i} \cdot \sigma_{zq,i}) \cdot h_i \quad (1.28)$$

де n - число виділених при розрахунку шарів ґрунту;

$A_{th,i}$ і $m_{th,i}$ – відповідно коефіцієнт відтаювання (вимірюється в частках одиниці) і коефіцієнт стисливості (вимірюється в кПа-1) для i -го елементарного шару відталого ґрунту, що приймаються за експериментальними даними; $\sigma_{zq,i}$ - вертикальне напруження від власної ваги ґрунту в середині i -го шару ґрунту, кПа, яке визначається розрахунком для глибини z від рівня планувальної відмі-

тки з урахуванням зважувальної дії води; h_i - товщина i -го шару відтавати ґрунту, м.

При цьому зважувальну дію води слід враховувати для водопроникних ґрунтів, що залягають нижче розрахункового рівня підземних вод, але вище водоупора.

Коефіцієнти відтавання і стисливості відталого ґрунту слід встановлювати за результатами польових випробувань мерзлих ґрунтів гарячим штампом за методикою ГОСТ 20276.

Якщо значення коефіцієнти відтавання і стисливості отримані за даними лабораторних випробувань ґрунтів, то їх розрахункові значення при визначенні осідання відталої основи слід множити на понижуючий поправочний коефіцієнт.

Також допускається вводити поправки за неповне змикання макропор і набухання відталого ґрунту, якщо це підтверджено експериментальними даними.

Складову осідання основи s_p , м, при розрахунковій схемі у вигляді лінійно-деформованого шару кінцевої товщини слід визначати за формулою

$$S_p = p_0 \cdot b \cdot k_h \cdot \sum_{i=1}^n m_{th,i} \cdot k_{\mu,i} \cdot (k_i + k_{i-1}) \cdot h_i \quad (1.29)$$

де p_0 - додатковий вертикальний тиск на основу під подошвою фундаменту, кПа;

b - ширина подошви фундаменту, м;

k_h - безрозмірний табличний коефіцієнт, що визначається залежно від ставлення z/z , де z - відстань від подошви фундаменту до нижньої межі зони відтавання або покрівлі непроектного при відтаванні ґрунту, м;

$m_{th,i}$ - коефіцієнт стисливості i -го шару ґрунту, кПа⁻¹;

$k_{\mu,i}$ - табличний коефіцієнт, що визначається залежно від ставлення z/z , де z - відстань від подошви фундаменту до середини i -го шару ґрунту, м;

k_i и k_{i-1} – табличні коефіцієнти, що визначаються залежно від відносин a/b , c/b і z_i-1/b , де z_i і z_{i-1} - відстань від підошви фундаменту відповідно до підошви і покритті і-го шару ґрунту, м.

На закінчення відзначимо, що розрахунок розвитку осідання відталої основи в часі слід проводити за швидкістю відтаювання ґрунтів під спорудою, яка визначається теплотехнічним розрахунком.

На наш погляд, при вирішенні задачі про визначення деформацій у зоні дії ґрунтового насоса рівність (1.27) можна опустити через відносно малий розмір замерзлої області в зоні впливу колектора теплового насоса.

Представляє також сенс методика розрахунку основ і фундаментів по стійкості і міцності на вплив сил морозного здимання ґрунтів.

Згідно СП 25.13330.2012 цей розрахунок слід робити як для умов експлуатаційної споруди, так і для умов періоду будівництва, якщо до передачі на фундаменти проектних навантажень можливе промерзання ґрунтів шару сезонного відтавання (промерзання).

При необхідності в проекті повинні бути передбачені заходи щодо запобігання витріщання фундаменту в період будівництва.

Стійкість фундаментів на дію дотичних сил морозного здимання ґрунтів слід перевіряти за умовою

$$\tau_{fh} A_{fh} - F \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} F_r, \quad (1.30)$$

де τ_{fh} – розрахункова питома дотична сила здимання, кПа;

A_{fh} – площа бічної поверхні змерзання фундаменту в межах розрахункової глибини сезонного промерзання-відтавання ґрунту, м²;

F – розрахункове навантаження на фундамент, кН, яка приймається з коефіцієнтом 0,9 по найбільш невідгідному поєднанню навантажень і впливів, включаючи витри (вітрові, кранові і т. п.);

F_r - розрахункове значення сили, що утримує фундамент від витріщання;

γ_c – коефіцієнт умов роботи, що дорівнює 1,0;

γ_n – коефіцієнт надійності за призначенням споруди, що приймається рівним 1,1, а для фундаментів опор мостів - 1,3.

Розрахункове значення сили F_r , кН, що утримує фундаменти від витріщання, слід визначати за формулою:

$$F_r = u \sum_{i=1}^n f_i h_i, \quad (1.31)$$

де U - периметр перетинної поверхні зсуву, м, приймається рівним: для пальових і стовпчастих фундаментів без анкерної плити - периметру перетину фундаменту; для стовпчастих фундаментів з анкерної плитою - периметру анкерної плити;

h_i – товщина i -го шару мерзлого або талого ґрунту, розташованого нижче подошви шару сезонного промерзання-відтавання, м;

f_i - розрахунковий опір i -го шару талого ґрунту зрушенню по поверхні фундаменту, кПа.

Аналіз викладеної вище методики розрахунку основ, складених мерзлими ґрунтами дозволив нам зробити висновок про те, що її використання для прогнозу деформацій основи в зоні дії колектора теплового насоса мало перспективно.

Це пояснюється такими причинами:

- заморожування-відтавання ґрунту в зоні впливу колектора теплового насоса носить циклічний характер, а при відтаванні мерзлих ґрунтів - ні;
- зона впливу теплового насоса значно менше зони відтавання основи за рахунок теплообміну основи з підземною частиною будівель і споруд;
- при відтаванні мерзлих основ область слабкого (ні мерзлого) ґрунту знаходиться в масиві міцного (мерзлого) ґрунту, а в зоні впливу колектора теплового насоса навпаки - область міцного (мерзлого) ґрунту знаходиться в масиві слабшого (ні мерзлого) ґрунту;
- методика СН не дозволяє враховувати зміну властивостей ґрунтів, що складають основу при циклічному заморожуванні-відтаванні;

- методика СН не враховує деформації морозного здимання, які мають місце в зоні впливу колектора теплового насоса.

У цьому зв'язку доцільно проаналізувати сучасні методи визначення деформацій підйому основ за рахунок деформацій набухання.

Згідно додатку Д ДБН [89] підйом основи при набряканні ґрунту h_{sw} обчислюють за формулою

$$h_{sw} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{sw,i} h_i k_{sw,i}, \quad (1.32)$$

де $\varepsilon_{sw,i}$ - відносне набрякання ґрунту i -го шару;

h_i - товщина i -го шару ґрунту;

$k_{sw,i}$ - коефіцієнт, визначають згідно з Д.22;

n - кількість шарів, на які розділена зона набрякання ґрунту.

Відносне набрякання ґрунту ε_{sw} обчислюють за формулами:

- при інфільтрації води

$$\varepsilon_{sw} = (h_{sat} - h_n)/h_n, \quad (1.33)$$

де h_n - висота зразка природної вологості та щільності, обтиснутого без можливості бокового розширення тиском p , що дорівнює сумарному вертикальному напруженню $\sigma_{z,tot}$ на глибині, яка розглядається;

h_{sat} - висота того ж зразка після замочування до повного водонасичення, обтиснутого в таких же умовах;

Коефіцієнт k_{sw} , що входить до формули (1.32), в залежності від сумарного вертикального напруження $\sigma_{z,tot}$ на глибині, що розглядається, приймають: 0,8 при $\sigma_{z,tot} = 50$ кПа; 0,6 при $\sigma_{z,tot} = 300$ кПа; інтерполяцією - при проміжних значеннях $\sigma_{z,tot}$, де

$$\sigma_{z,tot} = \sigma_{zp} + \sigma_{zg} + \sigma_{z,ad} \quad (1.34)$$

де: σ_{zp} , σ_{zg} - вертикальні напруження відповідно від навантаження фундаменту і від власної ваги ґрунту;

$\sigma_{z,ad}$ - додатковий вертикальний тиск, викликаний впливом ваги незволоженої частини масиву ґрунту за межами площі замочування.

Розрахунок деформацій усадки виконується аналогічним чином [89].

Найбільшим недоліком наведеної у ДБН методики є той факт, що вона не враховує розподільчих властивостей ґрунтової основи.

Для одночасного врахування впливу на напружено-деформований стан ґрунту і його механічні властивості таких факторів, як напруження, температура і фазові переходи зручно використовувати методи термодинаміки [19, 192, 199].

Практично одночасно публікації в цьому напрямку з'явилися у С.С. В'ялова і М.Н. Гольдштейна, а надалі цей підхід отримав свій розвиток в роботах В.А. Корольова [39, 59]. Однак, незважаючи на свої достоїнства, при виконанні практичних розрахунків напружено-деформованого стану цей підхід не отримав широкого розповсюдження.

Викладені у цьому розділі матеріали досліджень дозволили нам намітити такі шляхи досягнення поставленої при написанні цієї роботи цілі:

1. Кардинальними відмінностями розв'язуваної нами задачі від вирішених раніше задач розрахунку і проектування мерзлих основ є той факт, що при роботі теплового насоса відбувається циклічне заморожування-відтавання ґрунту.

При цьому замерзання і відтавання піддається не вся основа, а тільки його мала область, яка знаходиться в зоні впливу колектора теплового насоса і контактує із зоною не мерзлого ґрунту.

2. Оскільки при роботі теплового насоса відбувається заморожування тільки лише локальної області основи, прийнята в СП 25.13330.2012 при розрахунку осідання схема відтавати шару кінцевої товщини є абсолютно непринятною. На наш погляд, в даному випадку мова повинна йти про схему півпростору з твердим включенням, яке виникло внаслідок замерзання порової рідини (в даному випадку також відбувається збільшення обсягу замерзлої області).

3. Прийнята в даний час для розрахунку мерзлих основ методика (У СП 25.13330.2012) не дозволяє враховувати зміну властивостей ґрунтів, що складають основу ґрунтів при циклічному заморожуванні-відтаванні і не враховує

деформації морозного здимання, які мають місце в зоні впливу колектора теплового насоса.

У цьому зв'язку її використання для розрахунку деформацій у зоні впливу колектора теплового насоса малоперспективно.

4. Недоліком наведеної у ДБН близької за змістом методики розрахунку деформацій основи (при зволоженні) та усадки (при висиханні) ґрунту є той факт, що вона не враховує розподіл властивостей основи. Тому її використання для розрахунку деформацій в зоні впливу колекторів теплових насосів без удосконалення неможливо.

5. Для розрахунку температурних полів у ґрунтовій основі доцільно використовувати комбінований підхід - у разі слабкої залежності теплофізичних властивостей ґрунту від температури використовувати аналітичні методи і принцип суперпозиції, а в іншому випадку - чисельні методи кінцевих різниць у поєднанні з процесом ітерації.

6. Для визначення напружено-деформованого стану ґрунтових основ використовувати методи теорії пружності.

7. Оскільки найбільш небезпечним є замерзання порової рідини в зоні впливу теплового колектора, розробити методики обліку цього явища при розрахунку напружено-деформованого стану ґрунтових основ і гірських порід.

8. З'ясувати, яким чином циклічне заморожування-відтавання ґрунту впливає на: міцності властивості ґрунтів, їх деформаційні властивості, а також несучу здатність одиночних висячих палів. Це зумовлено відсутністю в нормативних документах будь-яких вказівок на цей рахунок.

1.5. Мета, основні задачі та методи досліджень

Метою даних досліджень є визначення закономірностей деформування геомеханічної системи «фундамент-ґрунтовий масив» у зоні дії колектора теплового насоса. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання:

8) виявити особливості технології обігрівання приміщень і кондиціонування повітря з використанням ґрунтових теплових насосів та визначити додаткові навантаження і впливи на геомеханічну систему «фундамент-ґрунтовий масив»;

9) проаналізувати актуальні фізичні та математичні моделі, призначені для прогнозування температурних полів та напружено-деформованого стану ґрунтової основи в зоні дії теплового насоса і запропонувати такі, що адекватні геомеханічній системі, яка досліджується;

10) експериментальним шляхом дослідити залежність міцнісних та деформаційних властивостей водонасиченого ґрунту за знакозмінних температур;

11) розробити математичну модель геомеханічної системи «фундамент-ґрунтовий масив», яка дасть змогу під час розрахунку її деформацій врахувати вплив:

- температурних полів;
- фазових переходів порової рідини;
- особливостей розташування колектора ґрунтового теплового насоса в основі або фундаменті;

12) розробити методику визначення деформацій геомеханічної системи «фундамент-ґрунтовий масив» у зоні дії колектора теплового насоса з урахуванням таких впливів, як:

- охолодження та нагрівання ґрунту;
- заморожування та розморожування ґрунту;

13) дослідити деформативність, міцність і тріщиностійкість елементів конструкцій фундаментів із композитних матеріалів за циклічного заморожування і розморожування;

14) розробити практичні рекомендації щодо визначення деформацій геомеханічної системи «фундамент-ґрунтовий масив» у зоні дії колектора теплового насоса.

При вирішенні поставлених задач застосовується комплексний підхід, що передбачає використання методів системного аналізу, аналітичних та чисельних методів аналізу, твердого деформованого тіла і математичної статистики.

Висновки

Викладені в цьому розділі матеріали дослідження дають змогу зробити такі висновки.

1. У перспективі ми (тобто жителі планети Земля) стикнемося з кризою, зумовленою вичерпуванням основних мінеральних ресурсів, а також з продуктивним, водним та енергетичним дефіцитом.

2. Існує ефективна інноваційна технологія опалення будівель і споруд, підігрівання води з використанням теплових насосів. Ця технологія дає можливість економити невідновлювані джерела енергії (газ, нафту, вугілля тощо). В її основу покладено використання для потреб опалення і підігрівання води низькопотенційне тепло навколишнього середовища [51, 200, 297, 301–304, 325, 326].

3. У разі використання теплових насосів для потреб опалення будівель і споруд, підігрівання води тепер застосовують такі джерела тепла [297, 301–304]: ґрунтову основу; водні джерела (річки, озера, моря, океани тощо); повітря.

4. Найперспективніше для використання в реверсному режимі (влітку – для потреб охолодження приміщень, а взимку – для їх опалення) є водо- і неводонасичена ґрунтова основа [297].

РОЗДІЛ 2.

ҐРУНТОВІ ТЕПЛОВІ НАСОСИ ТА ЇХНІ КОЛЕКТОРИ. СУЧАСНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ І НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ГІРСЬКИХ ПОРІД

2.1. Види колекторів ґрунтових теплових насосів

Зупинимося на способах отримання тепла з гірських порід [51, 177, 202, 283, 297, 301, 304].

Тепло з ґрунту можна отримувати по-різному. Фахівці поділяють джерела тепла, що використовують теплову енергію шарів ґрунту, на приповерхневі і джерела, які використовують глибинне геотермічне тепло.

Приповерхнєве тепло основи теплового насоса – це сонячне тепло, яка нагромаджується ґрунтом сезонно і використовується за допомогою так званих геотермічних ґрунтових колекторів, які укладаються горизонтально на глибині від 1,20 м до 1,50 м і більше.

Геотермічне тепло поширюється з глибини земних шарів до поверхні і використовується за допомогою глибинних геотермічних зондів. Зонди занурюються в основу вертикально на глибину до 150 м.

Обидві системи використання теплової енергії гірських порід (тобто геотермічні ґрунтові колектори і глибинні геотермічні зонди) характеризуються високою і порівняно стабільною температурою навколишнього середовища (тобто основи) протягом усього часу їх експлуатації.

Це, своєю чергою, допомагає забезпечити високий річний коефіцієнт ефективності експлуатації теплового насоса. Крім того, обидві названі системи працюють у закритих контурах, що забезпечує їхню високу надійність і мінімальні витрати на обслуговування.

У такому закритому контурі циркулює суміш води і антифризу (етиленгліколю). Цю суміш називають також «розсолон». У низці випадків замість антифризу використовують очищену від домішок воду.

Далі зупинимося на зазначених системах використання теплової енергії гірських порід докладніше.

2.1.1. Плоскі ґрунтові колектори

У цьому разі відбір тепла з поверхневого шару ґрунту виробляється за допомогою пластикових труб великої площі, укладених паралельно до поверхні землі, як правило, у вигляді декількох контурів (рис. 2.1).

Тому один контур за довжиною не повинен перевищувати 100 м, тому що інакше буде потрібно занадто висока потужність циркуляційного насоса.

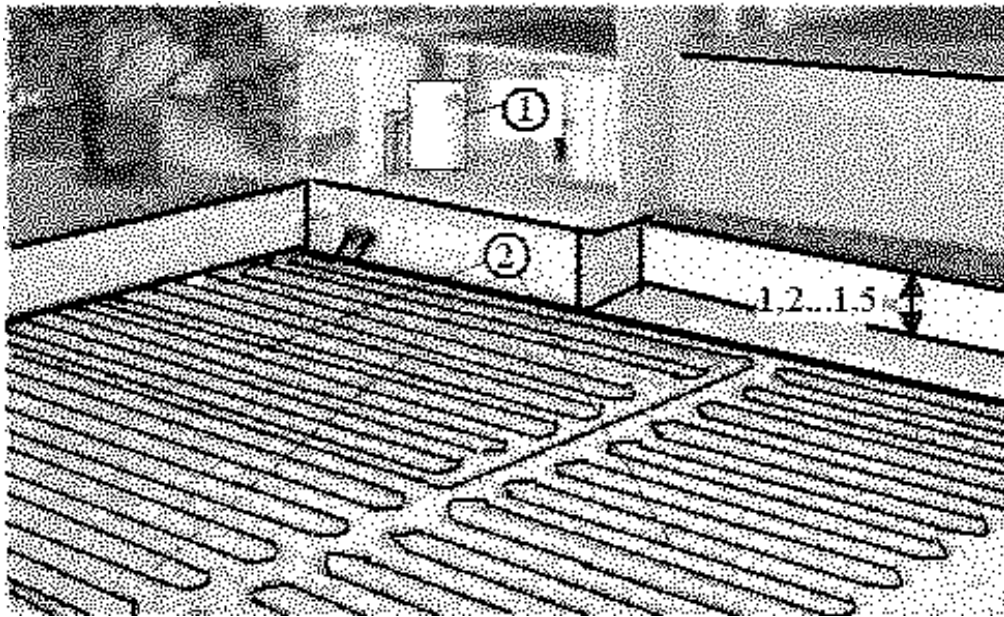


Рис. 2.1. Опалення будівлі з використанням плоского колектора (схема):
1 – тепловий насос; 2 – плоский ґрунтовий колектор

Окремі контури під'єднуються до розподільного пристрою, який повинен знаходитися в найвищій точці, щоб забезпечити можливість видалення повітря зі системи трубопроводів.

Згідно з даними фірми «Юнкерс» тимчасове заледеніння ґрунту не має жодних негативних наслідків на функціонування теплового колектора і на рослинне покриття технологічної площі.

За можливості необхідно стежити за тим, щоб на площі, займаній ґрунтовим колектором не розташовувалися рослини з глибокою кореневою системою.

Важливо також, щоб труби уклалися в піщаній постелі для запобігання їх ймовірних пошкоджень гострими каменями.

Перш ніж виконувати зворотну засипку колектора, обов'язково рекомендується обпресувати систему трубопроводів. Найкраще тримати трубопровід під випробувальним тиском також і під час проведення зворотної засипки. Тоді дуже легко відразу помітити ймовірні пошкодження.

Виконання необхідних переміщень ґрунту можливе без великих додаткових витрат особливо на новобудовах.

Величина відбору теплової потужності з ґрунту залежить від багатьох факторів, насамперед – від вологості ґрунту.

З досвіду відомо, що особливо хороший результат отримано під час укладання колектора у вологі суглинки. Найменш придатними для відбору тепла є сухі піщані ґрунти (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Питомі потужності відбору ґрунту з різних видів гірських порід

Назва ґрунту	Питома потужність відбору тепла $q, \left[\frac{Вт}{м^2} \right]$
Сухий пісок	10
Вологий пісок	15,0-20,0
Сухий суглинок	20,0-25,0
Вологий суглинок	25,0-30,0
Суглинок, насичений водою	35,0-40,0

Ґрунтові теплові насоси, в яких теплообмін з основою здійснюється з використанням плоских колекторів, мають порівняно з аналогічними опалювальними системами такі переваги:

- низькі експлуатаційні витрати;
- високі річні коефіцієнти ефективності експлуатації теплового насоса.

Розглянуті системи мають такі недоліки:

- потреба у великій технологічній площі (ця площа завжди більша від загальної площі опалювального будівлі, див. табл. 2.2);
- неможливість ремонту вже вкладених в основу труб.

Таблиця 2.2

Залежність технологічної площі поверхні основи
від площі опалюваної будівлі

Житлова площа [м ²]	Питоме опалювальне навантаження [Вт/м ²]					
	30	40	50	60	70	80
	Необхідна технологічна площа поверхні ґрунту для влаштування ґрунтового колектора теплового насоса [м ²]					
100	90	120	150	180	210	240
125	113	150	188	225	263	300
150	135	180	225	270	315	360
175	158	210	263	315	368	420
200	180	240	300	360	420	480

2.2. Ґрунтові зонди

Ґрунтові зонди як теплообмінники теплових насосів отримали за останні роки значно поширились.

Це зумовлено простотою їх влаштування та незначною технологічною площею, займаної цими пристроями.

Ґрунтові зонди складаються, як правило, з пучка чотирьох паралельних пластикових труб, кінці яких зварюються спеціальними фасонними деталями і утворюють так звану ніжку зонда.

Кожні дві пластикові труби з'єднуються так, що створюють два незалежні один від одного контури. Інша назва цих пристроїв – подвійні U-подібні зонди.

За наявності хороших гідрогеологічних умов можна забезпечити високу ефективність відбору тепла з ґрунту.

Передумовою для планування та облаштування ґрунтових зондів слугує точна інформація про характерні властивості ґрунту та інформація про процеси, що відбуваються всередині гірських порід.

Сьогодні у Німеччині вже створено мережу фірм, які спеціалізуються на облаштуванні ґрунтових зондів і разом з проектуванням і влаштуванням зондів пропонують також дозвільну документацію.

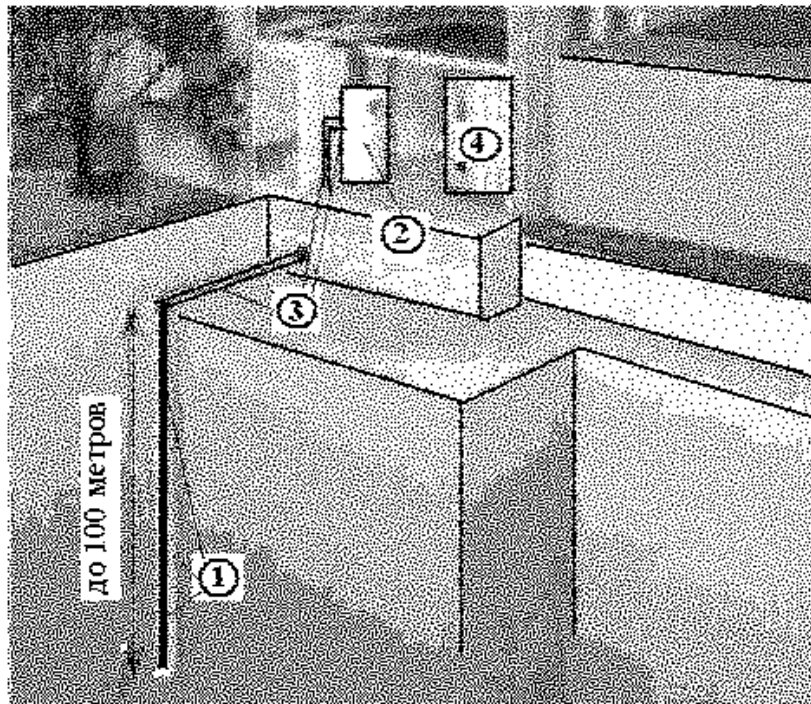


Рис. 2.1. Ґрунтовий зонд (схема): 1 – *U*-подібний ґрунтовий зонд; 2 – тепловий насос; 3 – комунікації, що з'єднують ґрунтовий зонд з тепловим насосом; 4 – бак – накопичувач теплої води

Можна також звернутися за професійною консультацією до фахівців-геологів або до місцевого геологічного департаменту.

Емпіричними даними для проектування *U*-подібних ґрунтових зондів можуть бути дані, наведені в табл. 2.3.

Ґрунтові теплові насоси, в яких теплообмін з основою здійснюється з використанням *U*-подібних ґрунтових зондів, мають порівняно з аналогічними опалювальними системами такі переваги:

Залежність глибини занурення в ґрунт U -подібного ґрунтового зонда від площі опалювального будівлі

Житлова площа [м ²]	Питоме опалювальне навантаження [Вт/м ²]					
	30	40	50	60	70	80
	Необхідна глибина занурення ґрунтового зонда теплового насоса [м]					
100	45	60	75	90	210	120
125	56	75	94	112	131	150
150	67	90	112	134	157	180
175	79	105	131	158	183	210
200	90	120	150	180	210	240

- високу надійність;
- низькі експлуатаційні витрати;
- незначну потребу в займаній технологічній площі; високі річні коефіцієнти ефективності експлуатації теплового насоса.

Ґрунтові зонди мають такі недоліки: високі інвестиційні витрати (тобто вартість пристрою); влаштування ґрунтових зондів є можливим не у всіх регіонах України (наприклад, це недоцільно в тих регіонах, де скельні ґрунти залягають поблизу денної поверхні).

2.3. Способи і варіанти розміщення колекторів теплових насосів у різних середовищах

Вище встановлено, що основною частиною теплового насоса є тепла машина.

Однак тепла машина є лише частиною теплового насоса, принцип дії якого полягає в тому, що для обігрівання деякого об'єму будівлі з набагато бі-

льшого обсягу основи за допомогою теплових колекторів забирається низькопотенційне тепло (рис. 2.2).

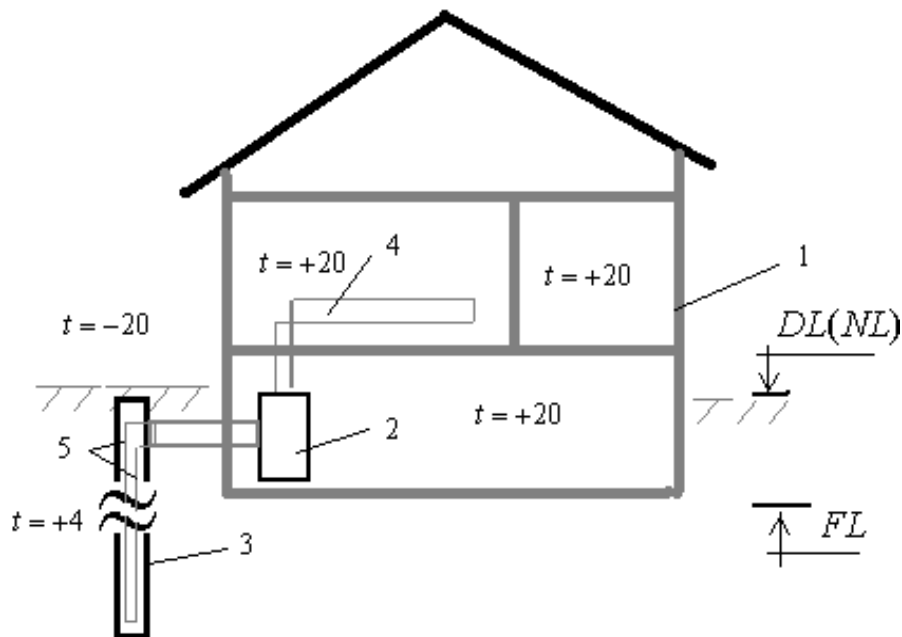


Рис. 2.2. Використання теплового насоса як опалювального приладу (теплового насоса, схема): 1 – опалювальна будівля; 2 – теплова машина; 3 – колектор теплового насоса (U -подібний ґрунтовий зонд); 4 – обігрівальний прилад; 5 – трубки теплообмінника

Водночас для того, щоб охолодити деякий обсяг будівлі, ми повинні підвищити температуру набагато більшого за об'єм повітря, яке слід охолоджувати, об'єму ґрунту.

У цьому також полягає основна проблема використання теплових насосів як опалювального приладу і (або) пристрою для кондиціонування повітря, а саме – необхідність виконання великих обсягів земляних робіт для прокладання ґрунтових колекторів і як наслідок – відносна дороговизна зазначеної опалювальної системи.

Інакше кажучи, опалення (або кондиціонування) з використанням теплового насоса потребує значних початкових капітальних вкладень, які, звісно, окупаються в ході експлуатації теплового насосу.

Ці капітальні вкладення крім затрат на обладнання та його монтаж зумовлені необхідним для прокладення ґрунтового колектора значним обсягом земляних робіт (рис. 2.3).

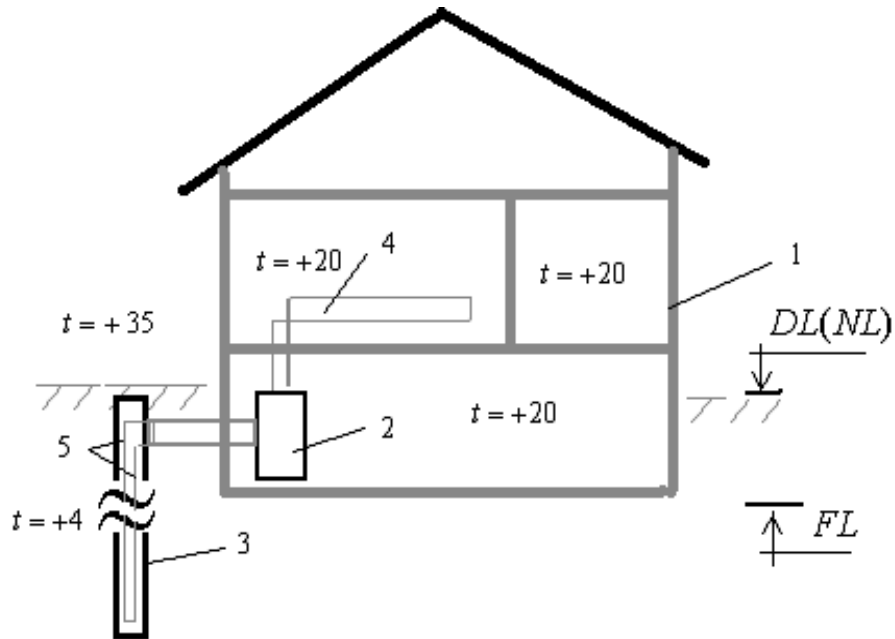


Рис. 2.3. Використання теплової машини для кондиціонування повітря (схема): 1 – охолоджувана будівля; 2 – теплова машина; 3 – U -подібний зонд (конденсатор); 4 – обігрівальний прилад (випарник); 5 – трубки теплообмінника

Якщо теплообмін з основою здійснюється з використанням U -подібного колектора – зонда, то глибина свердловини, в яку він поміщається, становить близько 120 м [201].

У цінах серпня 2008 вартість пристрою однієї такої свердловини у Дніпропетровську залежно від району дорівнює приблизно 40 000–70 000 грн.

У м. Львові вартість аналогічної свердловини буде дещо вищою, близько 80 тис. грн. (близько 10 тис. доларів США).

Тому під час влаштування теплових насосів і особливо їхніх ґрунтових колекторів необхідно враховувати конкретні природні умови. Останнє також визначає конструкцію і розташування теплового колектора (тобто зовнішнього теплообмінника).

Розрізняють такі типи колекторів і варіанти їхнього розміщення:

– *U*-подібні ґрунтові колектори – зонди (рис. 2.1 та 2.2);

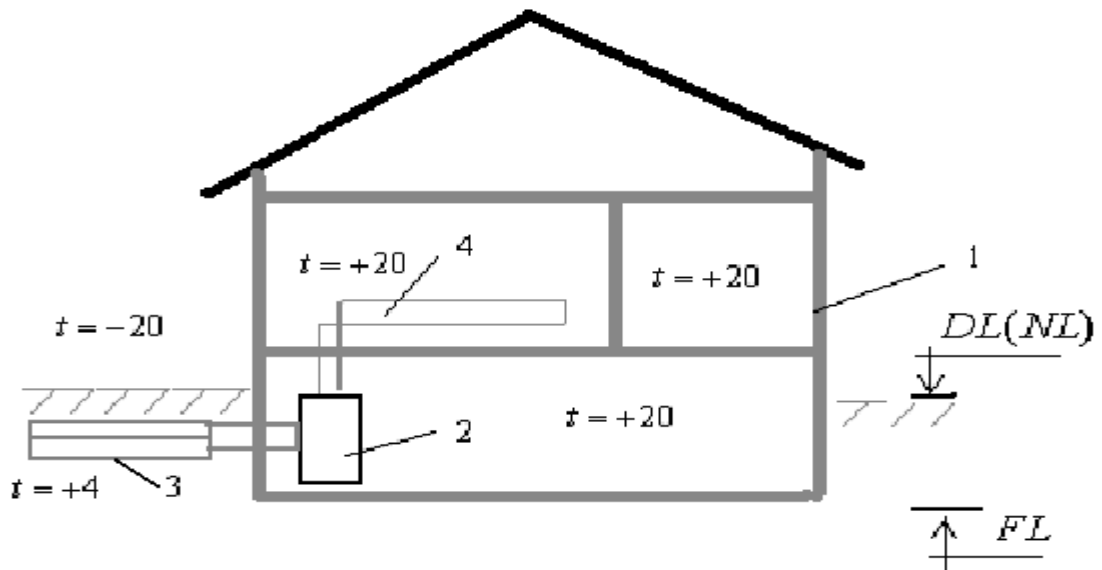


Рис. 2.4. Використання горизонтального колектора для обігріву: 1 – опалювальна будівля; 2 – теплова машина; 3 – горизонтальний колектор; 4 – обігрівальний прилад (випарник)

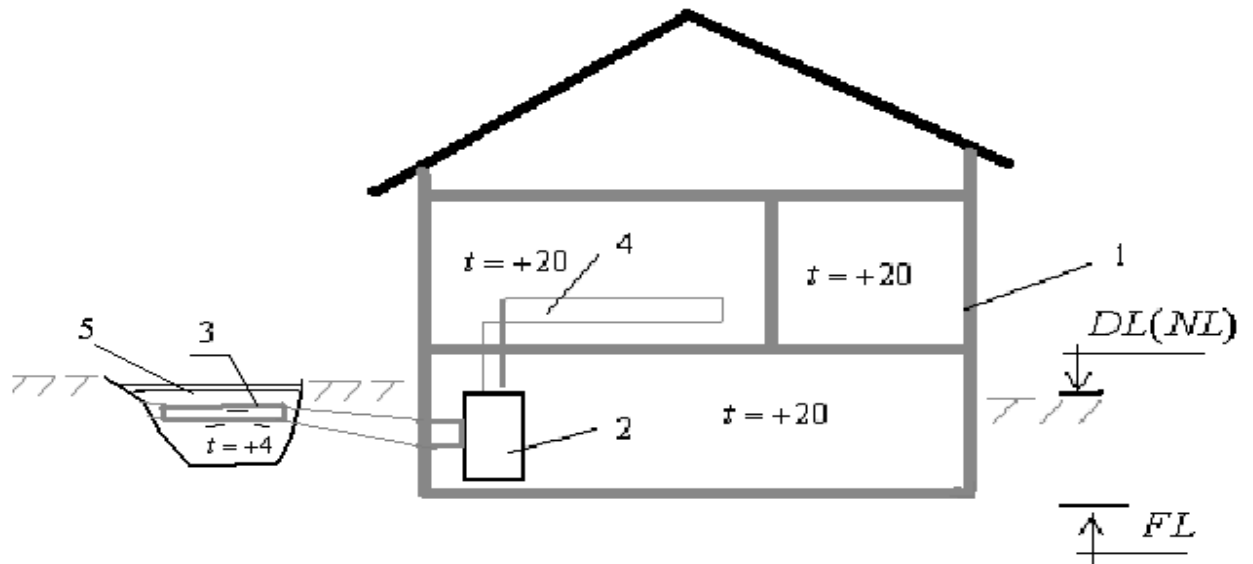


Рис. 2.5. Варіант розміщення горизонтального колектора теплового насоса у водоймі (схема): 1 – опалювальна будівля; 2 – теплова машина; 3 – горизонтальний колектор; 4 – обігрівальний прилад (випарник); 5 – водойма

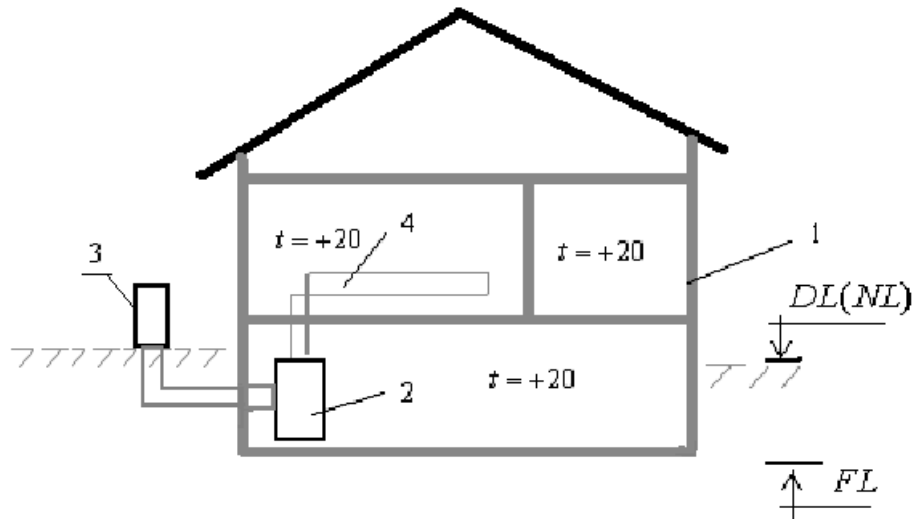


Рис. 2.6. Підігрівання колектора теплового насоса зовнішнім повітрям (схема):

1 – опалювальна будівля; 2 – тепла машина; 3 – повітрязабірник; 4 – обігрівальний прилад (випарник)

– горизонтальні колектори, розташовані паралельно до денної поверхні ґрунту (рис. 2.3);

– колектори, розміщені в фундаменти будівлі (рис. 2.6);

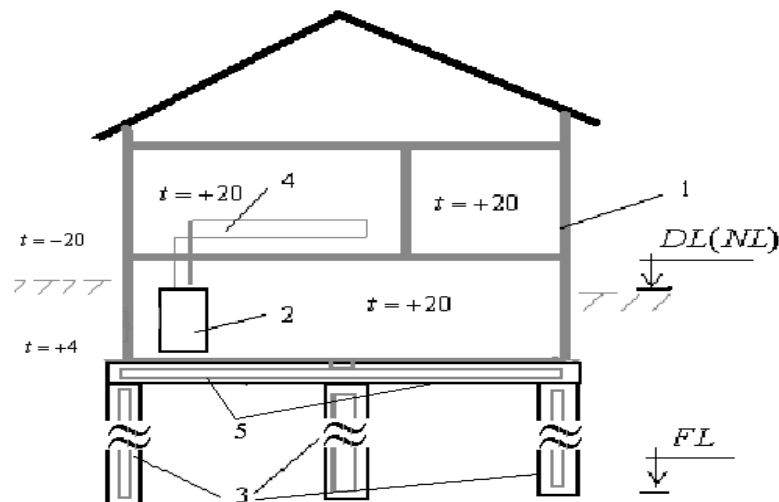


Рис. 2.7. Варіант розміщення колектора в фундаментах будівлі (схема):

1 – опалювальна будівля; 2 – тепла машина; 3 – колектор у пальовому фундаменті; 4 – обігрівальний прилад (випарник); 5 – горизонтальний колектор в плитному (стрічковому) фундаменті

Примітка. Рис. 2.2 і 2.3 запозичені з [104], а рис. 2.4-2.7 – з [189].

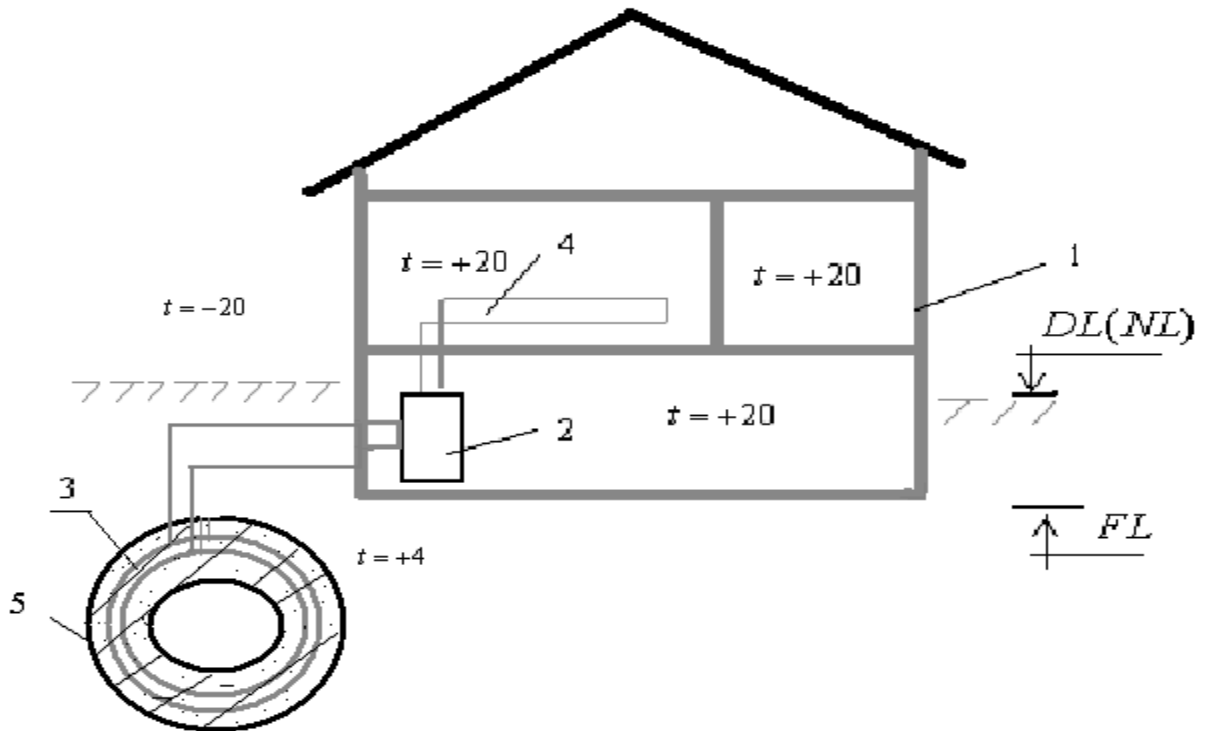


Рис. 2.8. Варіант розміщення колектора в облаштуванні тунелю (схема):
 1 – опалювальна будівля; 2 – теплова машина; 3 – колектор; 4 – обігрівальний прилад (випарник); 5 – облаштування тунелю

- повітряні колектори – повітрозабірники (рис. 2.4);
- колектори, занурені у водойму (рис. 2.5);
- колектори, поміщені в оброблення підземних споруд (рис. 2.7, рис. 2.8).

За видом середовища, в якому розташований теплової колектор, розрізняють такі системи теплових насосів:

- «грунт – вода», (точніше «грунт – розсіл») [201, 200, 325];
- «вода – вода», (іноді «вода – розсіл») [201];
- «повітря – вода», (іноді «повітря – розсіл») [201];
- фундамент (або фундаменти) – вода (або розсіл) [201, 200, 325, 275];
- комбіновані системи, в яких теплообмінники (тобто колектори) розташовані одночасно в декількох середовищах (наприклад, у повітряному середовищі і ґрунті).

У системі «грунт – вода (або розсіл)» теплової колектор або U-подібний зонд з поліетиленових труб, розташований у ґрунтовій основі. Іноді для цієї мети використовують труби з полівінілхлориду.

У трубах циркулює розсіл див. рис. 2.9 (наприклад, суміш води і етиленгліколю) або значно рідше – вода.

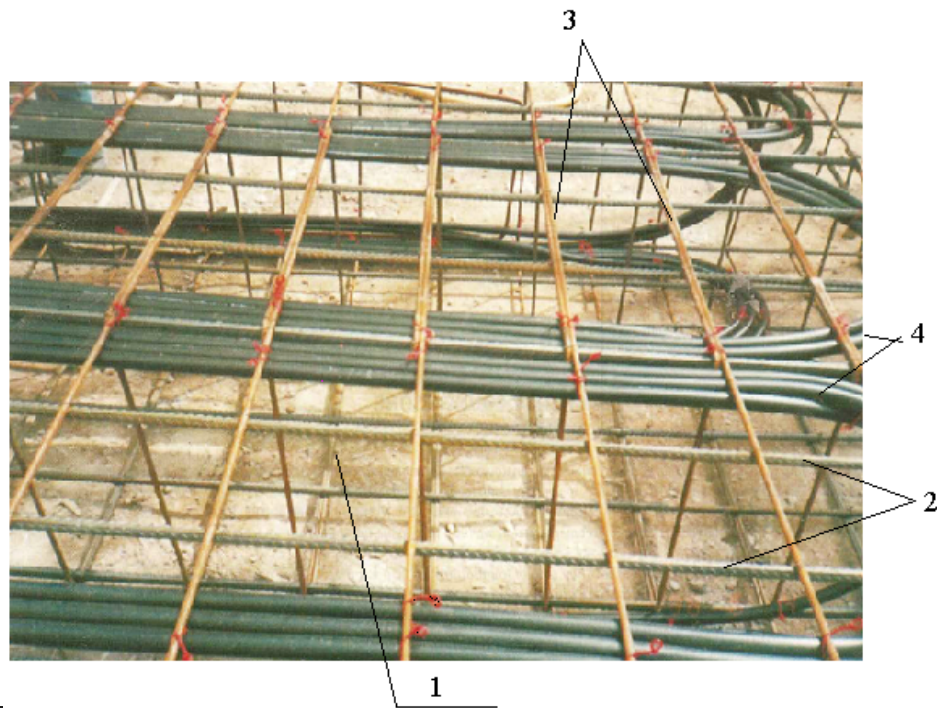


Рис. 2.9. Варіант прокладки колектора теплового насоса в тілі плитного фундаменту: 1 – просторовий арматурний каркас; 2 і 3 – поздовжня і поперечна арматура; 4 – пластикові труби колектора теплового насоса

Необхідність використання розсолу зумовлена тим, що в реальних виробничих умовах доцільно, щоб точка замерзання теплоносія була б нижчою від нуля за Цельсієм, тобто нижчою від температури замерзання води.

У колекторі вода (або розсіл) підігрівається на кілька градусів за рахунок тепла Землі і подається в теплову машину [201].

Якщо використовується система «вода ґрунт» з U – образним колектором теплового насосу має місце деяка перевага, суть якої полягає у тому, що при глибинах у 20 метрів і більше використовується тепло з глибини Землі.

Вартість пристрою таких теплообмінників досить висока, оскільки буріння свердловин до вказаної глибини потребує використання обсадних труб.

Крім того, на значній частині України на глибинах 20-40 метрів залягають скельні породи, в яких для влаштування глибоких свердловин – зондів необхідно використовувати алмазні коронки бурів.

Останнє також призводить до з дорожчання застосування теплових насосів.

Використання плоских колекторів (рис. 2.4) у системі «вода – ґрунт» має перевагу з того погляду, що в цьому разі під час влаштування теплообмінників значно скорочується обсяг земляних робіт.

Обігрівання розсолу у цьому випадку здійснюється переважно за рахунок енергії Сонця (точніше, тепла поверхневого шару Землі).

Цілком очевидно, що використання *U*-подібних колекторів – зондів перспективніше в північних, а плоских колекторів – в південних областях України, хоча такий поділ, звісно є досить умовним, бо на вибір конструкції колектору накладають свій відбиток такі чинники:

- економічна доцільність;
- ґрунтові умови (наприклад, залягання поблизу денної поверхні скельного ґрунту;
- наявність (або відсутність) необхідної для розміщення плоского колектору території.

У системі «вода – вода (або розсіл)» (рис. 2.5) вода (або розсіл) підігрівается на кілька градусів за рахунок тепла розташованих поблизу водойм і подається в теплову машину [201].

У тепловій машині вона (або він) нагрівається до необхідної температури і використовується для обігрівання будівлі або інших побутових потреб (зокрема, для підігріву води для побутових потреб).

У низці випадків у теплову машину вода з водойми подається безпосередньо.

У цьому разі до її чистоти (тобто чистоти води з водойми) висувають підвищені вимоги. Перевагою цього типу теплового насоса є відсутність дороговартісних земляних робіт.

У системі «повітря – вода (або розсіл)» вода (або розсіл) підігрівається на кілька градусів за рахунок тепла навколишнього будівлю атмосфери (рис. 2.6).

В умовах України ця система реалізована в побутових кондиціонерах подвійного призначення (вони використовуються як для кондиціонування, так і для обігрівання будівель).

Її недоліком є обмежений діапазон температур функціонування (за паспортом до -10°C , а практично до $-5...-3^{\circ}\text{C}$), а також необхідність витрачання додаткової енергії на підігрівання і розморожування випарника.

Якщо теплова машина використовується для опалення, то в системі «фундамент – вода (або розсіл)» (рис. 2.7) вода (або розсіл) підігрівається на кілька градусів за рахунок тепла фундаментів (зазвичай стрічкових, плитних та пальових) [200, 325, 275] і далі надходить у теплову машину [201].

Якщо теплова машина використовується для кондиціонування, то вода (розсіл) охолоджується за рахунок нагрівання фундаментів і прилеглих до них ґрунтів основи.

В Австрії є значний досвід поєднання теплообмінників і фундаментів будівель і споруд [200, 325, 13, 275].

Наукові дослідження у цьому напрямі досягли такого рівня, що вже розроблено технічні умови, які нормують вказані інженерні задачі.

Згідно з отриманими австрійськими вченими даними, перевагами цього підходу (тобто у разі прокладки теплообмінників у тілі фундаментів) є суміщення робіт з улаштування та монтажу колектора з роботами по влаштуванню фундаментів.

Крім того, в цьому разі автоматично забезпечується можливість функціонування системи в реверсному режимі (тобто для опалення будівель взимку і їх кондиціонування влітку).

На рис. 2.9 показано теплообмінник з пластикових труб, поміщений у просторовий арматурний каркас плитного фундаменту безпосередньо перед бетонуванням, а на рис. 2.10 – теплообмінник, поміщений у фундамент, зведений методом «стіна в ґрунті».

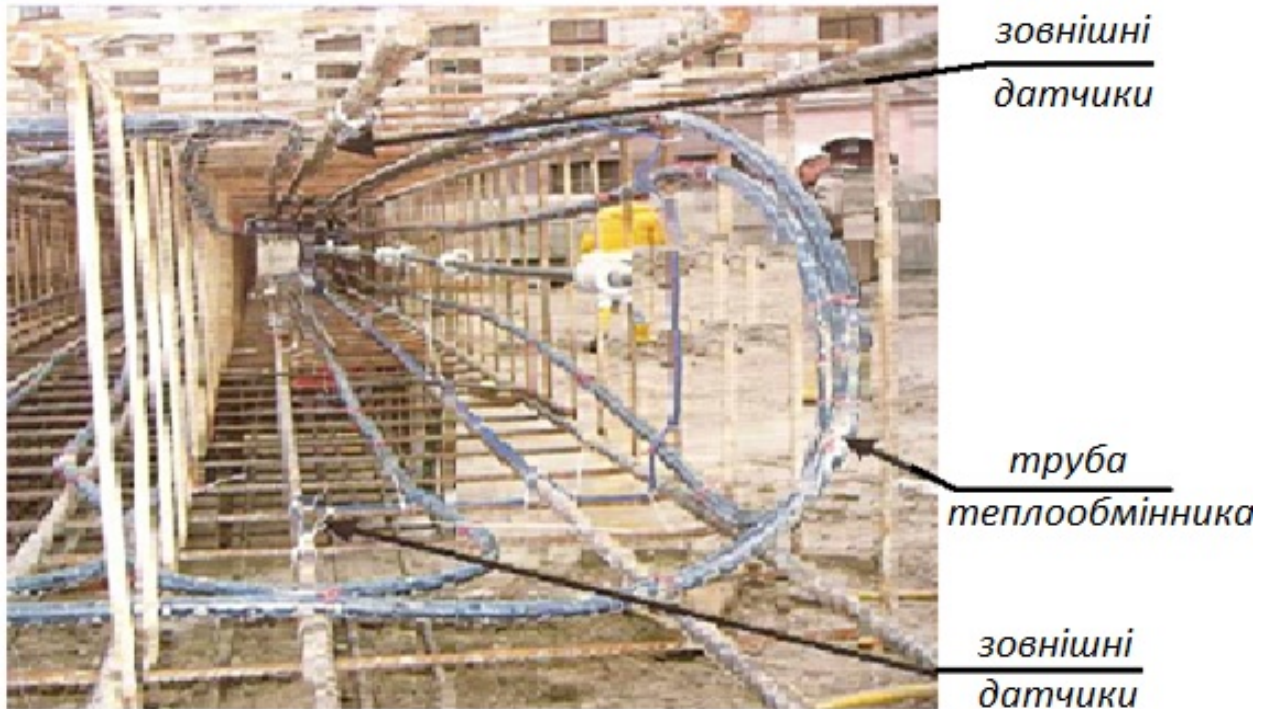


Рис. 2.10. Устаткування для моніторингу температурного поля всередині арматурного каркаса конструкції, зведеної методом «стіна в ґрунті». Синім кольором показана пластикова труба теплообмінника

Досвід влаштування колекторів теплових насосів (за межами України) також засвідчує, що цих приладів монтаж доцільно вести блоково-модульним способом (рис. 2.11). Треба також прагнути до того, щоб кількість з'єднань елементів теплових колекторів безпосередньо на будівельному майданчику була б мінімальною.

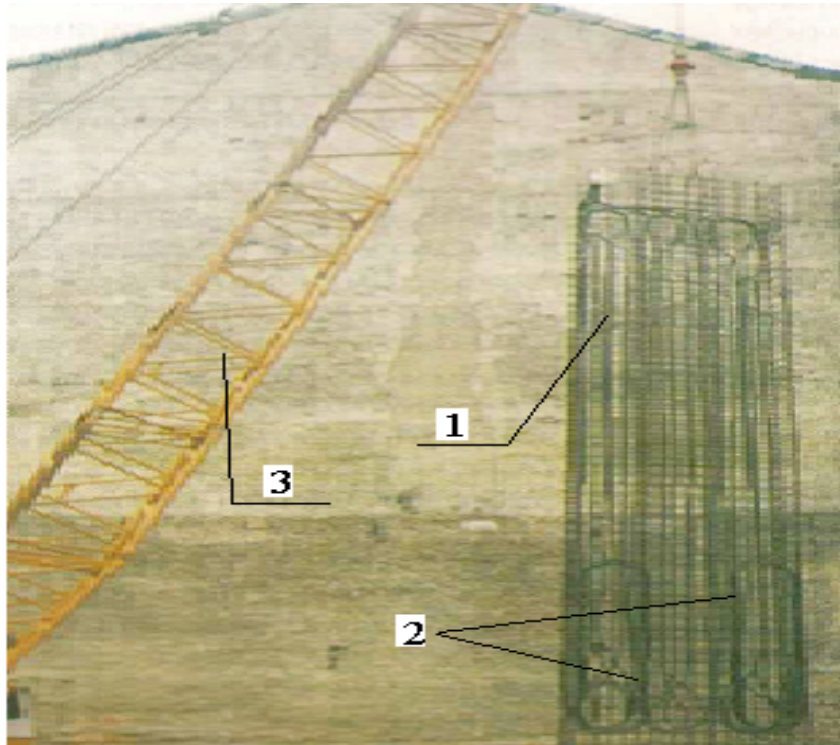


Рис. 2.11. Використання блочного методу монтажу елементів теплового насоса: 1 – просторовий каркас фундаменту; 2 – пластикові трубки колектора; 3 – стріла підйомного крана

Крім того, закордонний досвід використання теплових насосів свідчить про те що, як правило, вони (точніше їхні колектори) або важко ремонтуються, або не підлягають ремонту взагалі.

Це зумовлено або неможливістю, або складністю доступу до встановлених під землею, в тілі підземних залізобетонних конструкцій трубках теплообмінників.

Внаслідок цього, наприклад, в Австрії розроблено спеціальні правові відносини між фірмами, які виготовляють і (або) монтуєть елементи теплових насосів (наприклад, правила страхування ризиків).

Крім того, у всіх країнах – значних споживачах теплових насосів до них висувають підвищені технічні вимоги, одна з яких полягає в жорсткому контролі якості з'єднання елементів теплових колекторів (рис. 2.12, рис. 2.13).



Рис. 2.12. Перевірка герметичності стиків теплообмінника теплового колектора високим тиском безпосередньо перед бетонуванням

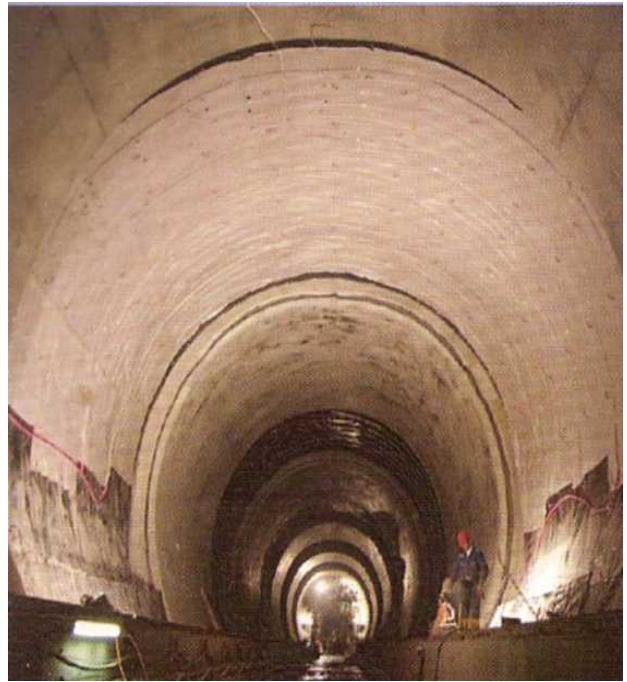


Рис. 2.13. Монтаж колектора теплового насоса на дослідній ділянці в тунелі «Ляйнцер» (Австрія)

Загалом, викладені в цьому підрозділі матеріали досліджень дали нам змогу зробити такі висновки:

1) колектори теплових насосів чинять температурний вплив на середовище, в якому вони розміщені (тобто на ґрунтові основи і знаходяться в ґрунтових основах елементи будівель і споруд).

Якщо температура опускається нижче ніж нуль градусів за шкалою Цельсія, вагомим є вплив, зумовлений фазовим переходом (заморожуванням) порової рідини.

Ці впливи тепер не враховують під час розрахунку і проектування основ і фундаментів;

2) для врахування перерахованих впливів на ґрунтові основи й елементи будівель і споруд, у яких розташовані колектори теплових насосів, необхідно проаналізувати такі розділи механіки твердого деформованого тіла: теорії тепломасопереносу; теорії пружності.

Матеріали цих досліджень зазначені відповідно у підрозділах 2.3 та 2.4.

2.4. Механізм і рівняння тепломасопереносу. Граничні і початкові умови

Якщо основа використовується як середовище для колектора теплового насоса, з нього або здійснюватиметься відведення тепла (у той період року, коли теплова машина використовується для опалення [201]) або приплив тепла (в той період року, коли теплова машина використовується для кондиціонування [201]).

Важливо правильно враховувати теплові процеси, що відбуваються в ґрунтовій основі, і знати матеріальні константи, які відповідають цим процесам.

Оскільки відомі роботи в зазначеному напрямі досі були, радше, описовими або оцінювальними [201, 325], розглянемо це питання докладніше.

У такому разі врахуємо дані, нагромаджені в споріднених галузях тепло-техніки [108, 109, 124, 226, 227, 245].

Якщо колектор-теплообмінник розташований всередині ґрунтової основи, в першому наближенні завдання досліджень можна сформулювати так.

Відомі закони природної зміни температури на верхній межі і всередині ґрунтової основи (тобто на його глибині) залежно від пори року.

Всередині основи влаштований або плоский колектор, або *U*-подібний колектор-зонд.

У колекторі з деякою швидкістю циркулює рідина – теплоносіє.

Між колектором та ґрунтовою основою відбувається теплообмін, причому тепло з циркулюючої в ньому з ґрунтовою основою.

Ця рідина, своєю чергою, використовується для часткового підігрівання у (якщо тепловий насос використовується для опалення) або часткового охолодження (якщо тепловий насос використовується для потреб кондиціонування) теплової машини.

Відомі теплофізичні властивості і швидкість руху циркулюючої в тепловому колекторі рідини.

Відомі зовнішній і внутрішній діаметри труб, якими циркулює теплоносій, та їхні міцнісні і теплофізичні властивості.

Відомі теплофізичні властивості основи, всередині якої розміщено колектор, а також умови теплообміну на контакті між колектором і основою.

Потрібно визначити кількість тепла, спожитого (якщо наявне кондиціонування) або відданого (якщо наявне опалення) основою (або системою «фундамент – основа») за деякий розрахунковий проміжок часу.

Крім того, необхідно оцінити економічну ефективність цієї системи опалення кондиціонування, або системи, з використанням якої кондиціонування й обігрівання приміщень здійснюється одночасно.

Якщо колектор-теплообмінник розташований у фундаментах будівлі або споруди, в першому наближенні завдання досліджень можна сформулювати так.

Відомі закони природного зміни температури на верхній межі і всередині ґрунтової основи (тобто на його глибині) залежно від пори року.

Відомі конструкція, геометрія і позначки закладання підоснови і верхнього обрізу фундаментів усередині ґрунтової основи.

Відомі теплофізичні та міцнісні властивості матеріалу фундаменту. Відомий закон теплообміну на контакті «основа – фундамент».

У тілі фундаменту (або фундаментів) влаштований або плоский колектор, або U -подібний колектор – зонд, з використанням якого здійснюється теплообмін циркулювальної в ньому з деякою швидкістю рідини з матеріалом фундаменту і далі – з основою.

Ця рідина, своєю чергою, використовується для часткового підігрівання (якщо тепловий насос використовується для опалення) або часткового охолодження (якщо тепловий насос використовується для потреб кондиціонування) теплової машини.

Також відомі теплофізичні властивості і швидкість руху циркулює в тепловому колекторі рідини.

Відомі зовнішній і внутрішній діаметри труб, по яких циркулює теплоносій (тобто рідина), а також їхні міцнісні і теплофізичні властивості.

Відомі теплофізичні властивості основи, на які спираються або в якому розташовані фундаменти.

Необхідно визначити кількість тепла, спожитого (якщо наявне кондиціонування) або відданого (якщо наявне опалення) основою (або системою «фундамент – основа») за деякий розрахунковий проміжок часу.

Водночас треба оцінити економічну ефективність цієї системи опалення або кондиціонування або системи, з використанням якої кондиціонування і обігрівання приміщень виконується одночасно.

Для вирішення цього завдання необхідно також дати відповіді на такі питання:

- 1) яким чином наявність у тілі фундаментів пластикових труб позначиться на їхній міцності?
- 2) чи під час експлуатації теплового насоса відбудуватиметься промерзання основи? Інакше кажучи, чи буде температура основи опускатися нижче від нуля (якщо так, то чи варто враховувати морозне здимання основи в разі замерзання основи й осідання в разі її розмерзання)?
- 3) як охолодження (або нагрівання) основи вплине на фізичні та механічні властивості ґрунту?
- 4) яким чином температурний режим основи позначатиметься на властивостях матеріалу фундаментів?
- 5) яким чином температурний режим основи впливатиме на несучу здатність фундаментів за матеріалом і ґрунтом?
- 6) як охолодження (або нагрівання) основи вплине на життєдіяльність комах і мікроорганізмів, які перебувають у ній (тут стикаємося з проблемою екології).

Далі розглянемо рівняння тепломасопереносу, прийняті зараз для розрахунку теплових полів у ґрунтових основи (і не тільки).

Згідно зі сучасними уявленнями про природу поширення тепла, розрізняють три основні види теплопередачі в суцільних середовищах (зокрема в ґрунті):

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

Для опису кондуктивної теплопередачі використовують закон Фур'є, який має вигляд [125]:

$$dQ = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \cdot dF \cdot dt, \quad (2.1)$$

де dQ – кількість теплоти, що минув за час dt елемент поверхні dF по нормалі до неї; $\frac{\partial T}{\partial n} = grad(T)$ – температурний градієнт; T – температура; λ – коефіцієнт теплопередачі; t – час.

Якщо виконуються такі умови: за теплофізичними властивостями основа є однорідною та ізотропною; теплофізичні властивості основи слабо залежать від температури; в основі немає фазових переходів.

Тоді рівняння поширення в основі тепла за рахунок кондуктивного теплообміну має вигляд:

$$a \cdot \Delta T = \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2.2)$$

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

γ – питома вага ґрунту; c – його питома теплоємність.

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

$$a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.3)$$

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

$$a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.4)$$

Якщо наявна осьова симетрія, то рівняння (2.3.4) має вигляд:

$$a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.5)$$

У розгорнутому вигляді в сферичній системі координат рівняння теплопровідності має вигляд:

$$a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \psi^2} + \frac{\cos \psi}{r^2 \cdot \sin \psi} \cdot \frac{\partial T}{\partial \psi} + \frac{1}{r^2 \cdot \sin^2 \psi} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.6)$$

де $x, y, z, r, \varphi, \psi$ – координати, а t – час.

Конвективна теплопередача виникає, коли енергія переноситься рухомою рідиною (або газом). У цьому разі перенесення тепла через тверду перешкоду (стінку), за якою знаходиться рідина або газ підпорядковується такій залежності:

$$dQ = -\alpha \cdot (T_w - T_f) \cdot dF \cdot dt, \quad (2.7)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі; T_w – температура твердої стінки; T_f – температура рухомої рідини (або газу).

Загалом коефіцієнт α є функцією багатьох змінних:

$$\alpha = f(W, T_w, T_f, \lambda, \mu, \rho, c, L_1, L_2, \dots), \quad (2.8)$$

де W – швидкість руху рідини (газу); μ – Коефіцієнт її (або його) в'язкості; ρ – щільність; L_1 і L_2 – характерні розміри, що визначають умови руху рідини.

У цьому разі теплопередавання в декартовій системі координат описується системою рівнянь [6, 16, 29, 149]:

$$\rho \cdot \frac{dW_x}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho \cdot g + \mu \cdot \left(\nabla^2 W_x + \frac{1}{3} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right)$$

$$\rho \cdot \frac{dW_y}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho \cdot g + \mu \cdot \left(\nabla^2 W_y + \frac{1}{3} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial y} \right)$$

$$\rho \cdot \frac{dW_z}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho \cdot g + \mu \cdot \left(\nabla^2 W_z + \frac{1}{3} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right)$$

$$\Theta = \frac{\partial W_x}{\partial x} + \frac{\partial W_y}{\partial y} + \frac{\partial W_z}{\partial z}$$

$$\frac{dW_x}{dt} = \frac{\partial W_x}{\partial t} + W_x \cdot \frac{\partial W_x}{\partial x} + W_y \cdot \frac{\partial W_x}{\partial y} + W_z \cdot \frac{\partial W_x}{\partial z}$$

$$\frac{dW_y}{dt} = \frac{\partial W_y}{\partial t} + W_x \cdot \frac{\partial W_y}{\partial x} + W_y \cdot \frac{\partial W_y}{\partial y} + W_z \cdot \frac{\partial W_y}{\partial z} \quad (2.9)$$

$$\frac{dW_z}{dt} = \frac{\partial W_z}{\partial t} + W_x \cdot \frac{\partial W_z}{\partial x} + W_y \cdot \frac{\partial W_z}{\partial y} + W_z \cdot \frac{\partial W_z}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \cdot \left(\frac{\partial W_x}{\partial x} + \frac{\partial W_y}{\partial y} + \frac{\partial W_z}{\partial z} \right) + W_x \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + W_y \cdot \frac{\partial \rho}{\partial y} + W_z \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0$$

$$W_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + W_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + W_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = a \cdot \Delta T$$

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha \cdot (T_f - T_w), \quad (2.10)$$

де W_x, W_y, W_z – проекції вектора швидкості руху елементарного об'єму рідини (газу) на координатні осі; P – тиск у точці з координатами (x, y, z) ;

$\Delta = \nabla^2 = \frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа в декартовій системі координат.

Рівняння (2.10) треба використовувати тоді, коли теплообмінник колектора розташований нижче від рівня підземних вод, і немає можливості знехтувати стискуваністю і швидкістю руху рідини.

Якщо об'ємні деформації рідини дуже малі (під час розрахунку гірничих порід ними зазвичай нехтують), то в (2.10) потрібно прийняти $\rho = 0$.

Для опису руху рідини по трубах колектора рівняння (2.10) використовувати недоцільно через їхню складність. У трубопроводі колектора рідина зазвичай циркулює з постійною швидкістю і за усталеним потенційним рухом [6, 16, 149]. Тому в цьому разі краще використовувати інтеграл Бернуллі:

$$P + \rho \cdot \frac{W^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z = C, \quad (2.11)$$

де P – тиск; ρ – щільність теплоносія; W – його ефективна швидкість руху; z – перепад висот.

Для оцінки кількості тепла, що проходить через стінку труби теплового колектора, необхідно використовувати формулу (2.7). Коефіцієнт тепловіддачі зазвичай визначають за формулою:

$$\alpha = \frac{\lambda}{L} \cdot Nu, \quad (2.12)$$

де L – характерний розмір, а Nu – критерій Нуссельта.

Загалом критерій Нуссельта складним чином залежить від таких критеріїв:

- Рейнольдса Re ;
- Пекле Pe ;
- Прандтля Pr ;
- Грасгофа Gr .

Крім того, критерій Нуссельта залежить від характерних розмірів L_0, L_1, L_2, \dots , у зв'язку з чим для практичних розрахунків використовують його різні апроксимації.

Для практичних розрахунків під час знаходження значення Нуссельта з урахуванням ламінарного руху теплоносія (тобто рідини в колекторі теплового насоса) зазвичай використовують формулу Крауссольда [29]:

$$Nu = 13,2 \cdot Pe^{0,23} \cdot \sqrt{\frac{d^*}{L}}, \quad (2.13)$$

де $Pe = \frac{W \cdot L}{a}$ – критерій Пекле; a – див. пояснення до формули (2.2);

$d^* = \frac{D - d}{D}$, де D і d – відповідно зовнішній і внутрішній діаметри, а L – довжина прямолінійного ділянки труби колектора.

Далі зупинимося на процесі теплообміну, зумовленому випромінюванням. Згідно з [29] кількість теплової енергії за одиницю часу, зумовлена механізмом випромінювання під час теплообміну між двома поверхнями з температурами T_1 і T_2 , дорівнює:

$$Q = 4,9 \cdot F \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \psi \cdot \varepsilon', \quad (2.14)$$

де Q – кількість теплової енергії в одиницю часу, зумовленої механізмом випромінювання $\left[\frac{\text{ккал}}{\text{год}} \right]$; F – площа однієї з поверхонь; ψ – кутовий коефіцієнт; ε' – ступінь чорноти.

Щоб оцінити порядок енергії (2.14), визначимо її кількість, що припадає на одиницю поверхні паралельних нескінченних пластин, виконаних з одного матеріалу (для визначеності – цегли). У цьому разі $\psi = 1,0$.

Для визначеності покладемо $T_1 = 20^0 C$ і $T_2 = 2^0 C$. Маємо:

$$\varepsilon' = \frac{1}{\frac{2}{\varepsilon} - 1} = \frac{1}{\frac{2}{0,9} - 1} \approx 0,82; \quad (2.15)$$

$$Q^* = \frac{Q}{F} = 4,9 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \psi \cdot \varepsilon' ; \quad (2.16)$$

$$Q^* = \frac{Q}{F} = 4,9 \cdot \left[\left(\frac{20}{100} \right)^4 - \left(\frac{2}{100} \right)^4 \right] \cdot 1,0 \cdot 0,82 = 0,006 \left[\frac{\text{ккал}}{\text{год} \cdot \text{м}^2} \right]. \quad (2.17)$$

Оскільки отримана величина є досить малою, можна зробити висновок про те, що в розглянутому діапазоні температур (0-20 °C) розглядати механізм теплообміну випромінюванням немає сенсу.

Далі розглянемо умови на кордоні контакту шарів ґрунту з різними властивостями (див. також [192, 281, 286, 292, 293]) і межі розподілу середовищ, необхідні для розрахунку теплових полів навколо теплових колекторів. Найпоширенішими є:

- 1) Умова Діріхле:

$$T_W = f(x, y, t), \quad (2.18)$$

- 2) Умова Неймана:

$$\frac{\partial T_W}{\partial n} = f_1(x, y, t), \quad (2.19)$$

де 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 і y ; t – час;

- 3) закон теплообміну Ньютона, див. (2.10);

4) умови ідеального температурного контакту на межі ґрунтових шарів на глибині H (для простоти викладу вважатимемо їх паралельними один до одного):

$$T_1(x, y, H, t) - T_2(x, y, H, t) = 0 \quad (2.20)$$

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

де 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.

Далі розглянемо початкові умови. Визначаючи їх, необхідно знати температурні поля в момент ввімкнення теплового насоса.

Загалом вони мають вигляд:

$$T(x, y, z, 0) = F(x, y, z), \quad (2.21)$$

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

Викладені у цьому підрозділі матеріали та викладені в попередніх розділах матеріали досліджень дали нам змогу зробити такі висновки:

1) для розрахунку теплових полів у ґрунтовій основі й тілі фундаментів у першому наближенні доцільно використовувати рівняння (2.1-2.7), і граничні умови (2.10, 2.18-2.21);

2) для розрахунку параметрів руху теплоносія в трубах теплового колектора доцільно використовувати рівняння (2.11);

3) для розрахунку напружено-деформованого стану ослаблених трубопроводами теплообмінників фундаментів потрібно використовувати елементи теорій пружності, пластичності, методи розрахунку бетонних і залізобетонних конструкцій. Оскільки методику розрахунку фундаментів за матеріалом розроблено досить ґрунтовно, це питання в цій дисертації не розглядаємо.

2.5. Механізми формування полів напружень і деформацій у ґрунтових основах, зумовлених температурними полями і об'ємними деформаціями, зумовленими заморожуванням порової рідини

У цьому розділі подано матеріали досліджень, спрямованих на аналіз робіт, щодо визначення напружень і переміщень у ґрунтових основах і розташованих в них елементах конструкцій, зумовлених температурними деформаціями

і фазовими переходами (тобто заморожування і розморожування) порової рідини.

Згідно з [2, 5, 9, 32, 53, 72, 105, 139, 144, 145, 199, 242, 243] для визначення напружено-деформованого стану суцільних середовищ загалом і ґрунту зокрема потрібно враховувати:

1) рівняння рівноваги (ці рівняння є проекцією напружень, що діють у деякій точці суцільного середовища внутрішніх і зовнішніх об'ємних сил на координатні осі). Розрізняють рівняння рівноваги в напруженнях і деформаціях [9, 93, 102, 192, 208, 209, 211, 241, 242];

2) рівняння стану (ці рівняння описують властивості розглядають рівноваги середовища, наприклад, у разі пружного лінійного ізотропного середовища ці рівняння називають узагальненим законом Гука) [7, 73, 146, 160, 203, 228, 291, 315];

3) граничні умови (ці рівняння описують наперед відомі напруження і переміщення розглянутої області);

4) початкові умови (цей вид рівностей використовується тоді, коли напруження і деформації основи змінюються в часі й описують поля напружень, деформацій та їхніх швидкостей у початковий момент часу).

Рівняння рівноваги в напруженнях можна записати:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X &= 0; \\ \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y &= 0; \\ \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + Z &= 0, \end{aligned} \quad (2.22)$$

де σ_{xx} , σ_{yy} і σ_{zz} – нормальні напруження, що діють відповідно в напрямку осей $0x$, $0y$ і $0z$;

τ_{xy} , τ_{xz} і τ_{yz} – дотичні напруження, що діють відповідно в напрямку осей Oxy , Oxz і Oyz ; X , Y і Z – проекції об’ємної сили на координатні осі (наприклад, сили інерції [155]).

Наприклад, якщо зовнішні об’ємні сили зумовлені зміною в основі температури від нуля до T , а коефіцієнт температурного лінійного розширення дорівнює α , то проекції внутрішньої об’ємної сили на координатні осі дорівнюватимуть [9, 93, 102, 192, 208, 209, 211, 241, 242]:

$$\begin{aligned} X &= -\alpha \cdot (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot \frac{\partial T}{\partial x}; \\ Y &= -\alpha \cdot (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot \frac{\partial T}{\partial y}; \\ Z &= -\alpha \cdot (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot \frac{\partial T}{\partial z}. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Тут λ і G – пружні константи Ламе, які дорівнюють:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}; \\ G &= \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}, \end{aligned} \quad (2.24)$$

де E – модуль пружності, а ν – коефіцієнт Пуассона основи.

З урахуванням (2.24) рівності (2.23) набудуть вигляду [9, 32, 53, 72, 139, 144, 199, 242, 243]:

$$\begin{aligned} X &= -\frac{\alpha \cdot E}{1 - 2 \cdot \nu} \cdot \frac{\partial T}{\partial x}; \\ Y &= -\frac{\alpha \cdot E}{1 - 2 \cdot \nu} \cdot \frac{\partial T}{\partial y}; \\ Z &= -\frac{\alpha \cdot E}{1 - 2 \cdot \nu} \cdot \frac{\partial T}{\partial z}. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Рівняння (2.24) і (2.25) описують лінійну взаємозв'язок між проекціями об'ємної сили від температури T .

Якщо пружні константи E , ν , λ і G , а також коефіцієнт лінійного температурного розширення є функціями температури, ми прийдемо до фізично нелінійних залежностей між проекціями об'ємної сили від температури T :

$$\begin{aligned} X &= -\alpha(T) \cdot [3 \cdot \lambda(T) + 2 \cdot G(T)] \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{\alpha(T) \cdot E(T)}{1 - 2 \cdot \nu(T)} \cdot \frac{\partial T}{\partial x}; \\ Y &= -\alpha(T) \cdot [3 \cdot \lambda(T) + 2 \cdot G(T)] \cdot \frac{\partial T}{\partial y} = -\frac{\alpha(T) \cdot E(T)}{1 - 2 \cdot \nu(T)} \cdot \frac{\partial T}{\partial y}; \\ Z &= -\alpha(T) \cdot [3 \cdot \lambda(T) + 2 \cdot G(T)] \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{\alpha(T) \cdot E(T)}{1 - 2 \cdot \nu(T)} \cdot \frac{\partial T}{\partial z}. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Далі зупинимося на рівняннях стану. У разі пружного лінійного ізотропного середовища ці рівняння називають узагальненим законом Гука; вони мають вигляд:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= 2 \cdot G \cdot \varepsilon_x + \lambda \cdot e; \\ \sigma_{yy} &= 2 \cdot G \cdot \varepsilon_y + \lambda \cdot e; \\ \sigma_{zz} &= 2 \cdot G \cdot \varepsilon_z + \lambda \cdot e; \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} &= G \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right); \\ \tau_{xz} = \tau_{zx} &= G \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right); \\ \tau_{yz} = \tau_{zy} &= G \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right); \\ \varepsilon_x &= \frac{\partial U}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial W}{\partial z}; \\ \varepsilon_x &= \frac{\partial U}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial W}{\partial z}; \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y};$$

$$\gamma_{xz} = \gamma_{zx} = \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x};$$

$$\gamma_{yz} = \gamma_{zy} = \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y};$$

$$e = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z};$$

$$\sigma_{kk} = (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot e, \quad (2.28)$$

де U , V і W – переміщення в напрямку координатних осей x , y і z відповідно; λ і G – константи Ламе; e – об'ємна відносна деформація; ε_x , ε_y і ε_z – нормальні деформації в напрямку осей x , y і z відповідно; γ_{xy} , γ_{xz} і γ_{yz} – деформації зсуву відповідно в площинах $0xy$, $0xz$ і $0yz$; σ_{kk} – кульовий тензор на-

пружень; t – час; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа в декартовій системі

координат.

Якщо необхідно врахувати вплив на напружено-деформований стан основи температурних напружень і деформацій, то до рівнянь стану треба додати відповідне рівняння теплопереносу (див. розділ 2.3).

Якщо пружні константи є функціями температури, то узагальнений закон Гука набуде вигляду:

$$\sigma_{xx} = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_x + \lambda \cdot e - \alpha(T) \cdot [3 \cdot \lambda(T) + 2 \cdot G(T)] \cdot T; \quad (2.29)$$

$$\sigma_{yy} = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_y + \lambda \cdot e - \alpha(T) \cdot [3 \cdot \lambda(T) + 2 \cdot G(T)] \cdot T;$$

$$\sigma_{zz} = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_z + \lambda \cdot e - \alpha(T) \cdot [3 \cdot \lambda(T) + 2 \cdot G(T)] \cdot T;$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = G(T) \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right);$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = G(T) \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right);$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = G(T) \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right);$$

$$\sigma_{kk} = [3 \cdot \lambda(T) + 2 \cdot G(T)] \cdot e.$$

Спочатку розглянемо граничні умови, які поділяють на три типи [9, 32, 53, 72, 139, 144, 199, 242, 243, 243].

До першого типу зараховують граничні умови в зміщених (або, що одне і те ж, в переміщеннях):

$$\left. \begin{aligned} U_i \Big|_{\Omega} &= f_{1,i}(x_1, x_2, x_3, t); \\ i &= 1, 2, 3. \end{aligned} \right\} \quad (2.30)$$

Запис (2.4.8) означає, що переміщення U_i на межі розглянутої в задачі області Ω можна подати у вигляді деякої наперед заданої (тобто наперед відомої) функції $f_{1,i}(x_1, x_2, x_3, t)$ координат x_1, x_2, x_3 і часу t .

До другого типу зараховують граничні умови в напруженнях:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij} \Big|_{\Omega n_i} &= T_i(x_1, x_2, x_3, t); \\ i &= 1, 2, 3. \end{aligned} \right\} \quad (2.31)$$

де n_i – напрямні косинуси. Запис (2.4.9) означає, що сума проєкцій прикладених до кордону області Ω напружень σ_{ij} на деяку вісь x_i можна подати у вигляді деякої наперед заданої (тобто наперед відомої) функції $T_i(x_1, x_2, x_3, t)$ координат x_1, x_2, x_3 і часу t .

До третього типу зараховують змішані граничні умови, в яких частково відомі діючі на границі розрахункової ділянки напруження, а частково – переміщення границі. Зазвичай такі умови виникають під час розв'язання контактних задач.

Як підсумок зазначимо, що якщо під час визначення напружено-деформованого стану гірських порід не враховуються динамічні ефекти і явище повзучості ґрунту (а саме в такій постановці надалі будуть сформульовані теоретичні завдання), то початкові умови необхідно опустити.

Якщо рівності (2.27) підставити в рівняння (2.22), то отримаємо рівняння рівноваги в переміщеннях:

$$G \cdot \Delta U + (\lambda + G) \cdot \frac{\partial e}{\partial x} = \alpha(T) \cdot [3 \cdot \lambda(T) + 2 \cdot G(T)] \cdot \frac{\partial T}{\partial x}; \quad (2.32)$$

$$G \cdot \Delta V + (\lambda + G) \cdot \frac{\partial e}{\partial y} = \alpha(T) \cdot [3 \cdot \lambda(T) + 2 \cdot G(T)] \cdot \frac{\partial T}{\partial y};$$

$$G \cdot \Delta W + (\lambda + G) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} = \alpha(T) \cdot [3 \cdot \lambda(T) + 2 \cdot G(T)] \cdot \frac{\partial T}{\partial z}.$$

Отже, зазначимо, що якщо напружено-деформований стан основи впливає на його температуру і навпаки (тобто температурні поля впливають на напружено-деформований стан основи), то рівняння теплопровідності (розділ 3) і узагальнений закон Гука (розділ 2.4) потрібно розглядати спільно. Поведінка цього середовища за температурних і силових впливів описується з використанням теорії взаємозв'язаної термопружності [199]. З математичного погляду до цієї теорії дуже подібна теорія взаємозалежної фільтраційної консолідації, що описує поведінку під навантаженням водонасичених гірських порід [7, 73, 146, 160, 203, 228, 281, 287, 291, 294, 308, 312, 315, 322, 323].

Наведені в цьому розділі рівняння з достатнім ступенем точності дають змогу у першому наближенні визначати напружено-деформований стан гірських порід, зумовлений фазовими переходами порової рідини і температурними деформаціями. Матеріали цих досліджень подано в розділі 6.

Далі розглянемо сучасні методи розв'язання задач пружності та термопружності задач механіки ґрунтів та геотехнічної механіки, а також близьких за змістом задач фільтраційної консолідації.

В даний час визначення напружено – деформованого стану ґрунтових основ та розрахунок теплових полів виконується з використанням чисельних та аналітичних методів.

З чисельних методів найбільше розповсюдження отримали методи кінцевих та граничних елементів [137, 154, 169, 190, 245, 246, 285, 289].

Значно рідше використовують методи кінцевих різностей (іноді їх називають методами сіток) [32, 50, 221, 223, 228, 246, 320].

В даний час найбільшого поширення набули програмні комплекси орієнтовані на розрахунок НДС ґрунтові основи і розташовані на них (або всередині них) будівлі і споруди в яких використовують техніку розрахунку з застосуванням методу скінчених елементів, як Ліра, Мономах, Склад, Etabs, Plaxis, Robot, Revit і їм подібні.

У цьому ряду найбільш перспективним виглядає комплекс Ліра, оскільки він є вітчизняною розробкою і має державну реєстрацію.

Перевагою програми є те, що крім вирішення фізично лінійних одновимірних, двовимірних і просторових задач вона включає в себе модулі обліку фізичної нелінійності на основі різних нелінійних залежностей «напруження-деформація», забезпечують можливість комп'ютерного моделювання процесу навантаження як моно-, так і бі-матеріальних конструкцій, з дослідженням розвитку тріщин, проявом деформацій повзучості і текучості, аж до отримання картини руйнування конструкції.

Розвинена бібліотека кінцевих елементів дозволяє створювати комп'ютерні моделі практично будь-яких конструкцій: плоских і просторових рам, балок стінок, що згинаються плит, оболонки, масивних тіл, а також комбінованих систем - плит і оболонки підпертих ребрами, плит на ґрунтовій основі, каркасних конструкцій будівель, системи "надземне будова-фундаментні конструкції-ґрунтова основа" і багато іншого

Великий набір спеціальних кінцевих елементів, дозволяє складати адекватні комп'ютерні моделі для складних і неординарних споруд. Наприклад: кінцевий елемент, що моделює податливість вузлів; кінцевий елемент, що моде-

лює роботу ґрунту за межами конструкції; кінцевий елемент, що моделює натягач (форкопф) і дозволяє забезпечувати задане первинне натягнення конструкції або знаходити необхідне натягнення, що забезпечує задану геометрію (наприклад, тенту або вантової мережі).

Дуже важливим достоїнством цього програмного комплексу Ліра є можливість обліку таких специфічних впливів на ґрунти та гірські породи, як температура і об'ємні деформації (це важливо при визначенні деформацій морозного здимання).

Тому при виконанні виконаних нами чисельних розрахунків із використанням техніки методу скінченних елементів був використаний даний програмний комплекс.

Методи граничних елементів та їх модифікації набули широкого поширення при вирішенні задач механіки суцільного середовища, у тому числі механіки ґрунтів і геотехнічної механіки. З використанням цього чисельного методу вдалося виконати моделювання напружено - деформованого стану водонасичених основ з урахуванням їх пружних, в'язких і пластичних властивостей [137, 285, 289].

Далі зупинимося на відмінностях між методами граничних і кінцевих елементів при вирішенні задач механіки суцільного середовища і достоїнства методу граничних елементів.

У ході вирішення задачі з використанням методу кінцевих елементів необхідно знайти рішення задачі в вузлах сітки деякої розрахункової області R , яка завжди обмежена деякою лінією (у випадку плоскої задачі) або поверхнею (у разі просторової задачі). Значення шуканої функції поза вузлів сітки слід визначати за інтерполяцією.

При цьому розрахункова область завжди знаходиться всередині замкнутого кордону.

При вирішенні завдань з використанням методу граничних елементів на елементи розбивається тільки частина кордону C області R .

У цьому випадку чисельне рішення для всієї області будується шляхом суперпозиції отриманих раніше аналітичних рішень для простих сингулярних задач.

При цьому задані граничні умови в межах кожного граничного елемента на контурі задовольняються наближено (приймається по-постійними).

У результаті виходить система лінійних алгебраїчних рівнянь, невідомими якої є або навантаження в межах кожного з граничних елементів (метод сил) або переміщення їх центрів (метод переміщень).

Ця система рівнянь носить назву канонічної системи методу переміщень.

Також розрізняють інтерпретації методу граничних рівнянь у формі методу сил і методу переміщень [137, 289].

Якщо невідомими є переміщення центрів граничних елементів, то ми маємо справу з методом граничних елементів у формі методу переміщень.

Якщо невідомими є прикладені до граничних елементів навантаження, то ми маємо справу з методом граничних елементів у формі методу сил:

$$[B_{ij}] \cdot \vec{P} = \vec{W}_0, \quad (2.33)$$

де вектор \vec{W}_0 - відомих (тобто заданих заздалегідь) переміщень центрів граничних елементів; $[B_{ij}]$ - матриця податливості, \vec{P} - вектор - стовпець шуканих контактних напружень a - осаду центру i - того граничного елемента під впливом розподіленої за площею j - того граничного елемента одиничної навантаження.

Елементи матриці впливу B_{ij} також називають коефіцієнтами впливу.

З обчислювальної точки зору метод граничних елементів приводить до системи рівнянь меншого порядку, ніж метод кінцевих елементів при вирішенні тієї ж задачі.

Крім того, його перевагою є розрахунок напружено - деформованого стану областей як обмежених, так і необмежених розмірів.

При цьому його недоліком є можливість застосування тільки лише для таких середовищ, для визначення напружено - деформованого стану яких можна використовувати принцип суперпозиції.

Далі зупинимося на класифікації існуючих в даний час методів граничних елементів і розв'язуваних з їх використанням завдань. Розрізняють прямі, напівпрямі й непрямі методи граничних елементів.

Суть прямого методу граничних елементів полягає в тому, що в даному випадку входять до інтегральні рівняння підлягають визначенню функції мають конкретний фізичний зміст.

Суть непрямого методу граничних елементів полягає в тому, спочатку відшукуються не мають конкретного фізичного змісту задовольняють граничним умовам сингулярні рішення задачі, з використанням яких обчислюються інші шукані граничні параметри.

Надалі нами в даній монографії буде розглянуто тільки лише прямий метод граничних елементів.

Також розрізняють внутрішню і зовнішню завдання методу граничних елементів.

Під внутрішнім завданням МГЕ розуміють такий варіант, коли розрахункова область R обмежені замкнутим контуром C .

Під зовнішньою завданням МГЕ розуміють такий варіант, коли розрахункова область R є необмеженою (нескінченної).

Іноді доводиться мати справу з дуже складними граничними умовами, в силу чого для вирішення канонічних систем методу граничних елементів доцільно використовувати процес ітерації (в цьому випадку за певних умов істотно зменшується обсяг і підвищується точність обчислень). У цьому зв'язку становить інтерес процес ітерації С.Н. Клепікова [289], суть якого полягає в наступному:

Нехай потрібно розрахувати НДС конструкції на ґрунтовому підставі або всередині ґрунтової основи (у загальному випадку водонасиченому і фізично нелінійному), яке володіє розподільними властивостями [62, 70, 72, 83, 102, 106, 212, 238, 240, 241, 242, 250, 255, 256, 269, 281, 286]. У цьому випадку надходять так.

1. Спочатку жорсткість підстави приймається рівною безкінечності (у цьому випадку осідання фундаментів будівлі дорівнюють нулю). На цьому етапі визначаються реакції з боку підстави $P(x)$ в першому приближенні.

2. Потім ці реакції прикладаються до основи, яка вже володіє фактичною жорсткістю. На цьому етапі визначаються осідання основи $S(x)$.
3. Після цього визначають коефіцієнт Вінклера (жорсткості) основи $C(x)$ за формулою

$$C(x) = \frac{P(x)}{S(x)} \quad (2.34)$$

4. Далі вважають, що підстава підпорядковується гіпотезі Вінклера-Фусса з коефіцієнтом постели (жорсткості) $C(x)$ і знову проводять розрахунок будівлі. Мета розрахунку - визначення реакцій з боку основи $R(x)$ в новому наближенні.
5. Після цього знову визначаються осідання основи $S(x)$ (див. п. 2 справжнього алгоритму) і коефіцієнт постели (див. п. 3 цього алгоритму) і т.д.

Процес розрахунку вважають закінченим, якщо розбіжність між встановленими в ході сусідніх наближень осіданнями і переміщеннями конструкції і основи не перевищує деякої наперед заданої малої величини.

Досвід розрахунків свідчить про те, що чим вище жорсткість споруди, і менше жорсткість основи, тим краще збіжність процесу ітерації.

Цей факт має просте пояснення - чим менше жорсткість спорудження, тим більше система «основа - фундамент - споруда» відповідає розрахунковій схемі основи, до верхньої межі якого прикладено навантаження.

Оскільки коефіцієнт жорсткості в процесі ітерації С.Н. Клепікова визначається за формулою (2.34), то при нульовій жорсткості системи «фундамент - споруда» вже в першому наближенні має повну відповідність між точним і наближеним рішеннями. При цьому не вигідним є випадок нескінченної жорсткості системи «фундамент - споруда».

В даному випадку вирішальним є збіжність процесу ітерації. Виявилось, що у разі симетричного навантаження процес ітерації сходиться при виконанні таких умов:

1. Підстава є фізично-лінійним.

2. Деформаційні властивості основи явно залежать від часу.
3. Спорудження і фундамент мають симетрією або щодо деякої вертикальної осі (плоска або осесиметрична задача) або щодо деякої вертикальній площині (просторова задача).
4. Система «фундамент-споруда» є абсолютно жорсткою.
5. На систему діє симетричне навантаження

У цьому випадку процес ітерації сходиться при виконанні умови

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \left[\frac{\sum_{i=1}^n F_i}{\sum_{i=1}^n \delta_i^k(t) \cdot F_i} \right] = 1, \quad (2.35)$$

$$\text{де } \delta_i^1 = \sum_{j=1}^n B_{ij}(t);$$

$$\delta_i^2 = \sum_{j=1}^n \frac{B_{ij}(t)}{\delta_j^1(t)};$$

$$\delta_i^3 = \sum_{j=1}^n \left(\frac{B_{ij}(t)}{\delta_j^1(t) \cdot \delta_j^2(t)} \right);$$

$$\dots \delta_i^k = \sum_{j=1}^n B_{ij}(t) \prod_{m=1}^{k-1} \left(\frac{1}{\delta_j^m(t)} \right);$$

F_i - площа i -того граничного елемента; $B_{ij}(t)$ коефіцієнти впливу матриці податливості методу граничних елементів, n – число окремо стоячих фундаментів або ділянок, на які була розбита область контакту з основою; $i \in (1, n)$; $j \in (1, n)$.

Тут верхній індекс (тобто 1, 2, 3, ..., k , m) відповідає номеру ітерації, а нижній (тобто i або j) - номеру фундаменту або номеру граничного елемента.

При цьому у разі назад - симетричного навантаження процес ітерації сходиться при виконанні таких умов:

1. Підстава є фізично - лінійним.

2. Деформаційні властивості основи явно залежать від часу.
 3. Спорудження і фундамент мають симетрією або щодо деякої вертикальної осі (плоска або осесиметрична задача) або щодо деякої вертикальній площині (просторова задача).
 4. Система «фундамент-споруда» є абсолютно жорсткою.
 5. До на систему діє симетричне навантаження
- У цьому випадку процес ітерації сходиться при виконанні умови

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \delta_i^{k-1}(t)}{\sum_i x_i \cdot \delta_i^k(t)} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x^{k+1}}{F(i) \cdot \prod_{m=1}^{k-1} \delta_i^m(t)}}{\sum_{i=1}^n \frac{x^k}{F(i) \cdot \prod_{m=1}^{k-2} \delta_i^m(t)}} = 1, \quad (2.36)$$

$$\text{де } \delta_i^1(t) = \sum_j \frac{B_{ij}(t) \cdot x_j}{F_j};$$

$$\delta_i^2(t) = \sum_j \frac{x_j^2 \cdot B_{ij}(t)}{F_j \cdot \delta_j^1(t)};$$

$$\delta_i^3(t) = \sum_j \frac{B_{ij}(t) \cdot x_j^3}{F_j \cdot \delta_j^1(t) \cdot \delta_j^2(t)};$$

$$\delta_i^k(t) = \sum_j \frac{B_{ij}(t) \cdot x_j^k}{F_j \cdot \prod_{m=1}^{k-1} \delta_j^m(t)}.$$

F_i - площа i -того граничного елемента; $B_{ij}(t)$ коефіцієнти впливу матриці податливості методу граничних елементів, n – число окремо стоячих фундаментів або ділянок, на які була розбита область контакту з основою; $i \in (1, n)$; $j \in (1, n)$.

Тут верхній індекс (тобто 1, 2, 3, ..., k, m) відповідає номеру ітерації, а нижній (тобто і або j) - номеру фундаменту або номеру граничного елемента.

У класичному варіанті методу скінченних елементів реалізований принцип поточної збіжності [134, 150]. При цьому, згідно з думкою М.І. Горбунова-Посадова, точність рішення контактних задач може бути істотно підвищена шляхом реалізації збіжності в середньому [66, 72, 134, 150, 314].

У зв'язку з цим становлять інтерес т.зв. варіаційні методи граничних елементів і сплайнів, у яких реалізований принцип збіжності в середньому [289].

Далі розглянемо аналітичні методи побудови загальних розв'язків задач механіки ґрунтів і геомеханіки в рамках моделі пружного лінійно ізотропного середовища [9, 31, 53, 57, 72, 144, 192, 199, 242].

Оскільки напружено-деформований стан описують рівнянням яке має громіздкий вигляд, то надходять так.

1. Спочатку вводять в розгляд деяку абстрактну функцію (або декілька функцій), число яких істотно менше, ніж число, що описує напружено-деформований стан розглянутої системи рівнянь.

2. Цю функцію підбирають таким чином, щоб тотожне задовольнялися рівняннями рівноваги (або частини їх).

3. Шукані напруження і переміщення визначають шляхом інтегрування або диференціювання за певними правилами введеної в розгляд нової функції.

4. Приватні рішення з використанням спільного рішення будуються шляхом задоволення граничним умовам.

В даний час найбільш відомими є методи побудови загальних рішень з використанням бігармонічних функцій, методів Ламе, Лява, Мусхілішвілі, Папковича-Нейбера, Треффца, і т.д. [7, 9, 16, 139, 144, 146, 160, 192, 199, 242, 244].

На наш погляд, для вирішення поставлених задач при написанні цієї роботи, найбільше підходить викладений в роботі [281] підхід до вирішення задачі теорії взаємозалежної фільтраційної консолідації [106], оскільки в математичному сенсі рівняння, що описують поведінку термопружних і водонасичених середовищ повністю ідентичні.

Рішення отримані в декартовій системі координат і циліндричній системі координат з осью симетрії [9].

У декартовій системі координат розглядається система виду

$$G \cdot \Delta U + (\lambda + G) \cdot \frac{\partial e}{\partial x} = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\partial P}{\partial x}; \quad (2.37)$$

$$G \cdot \Delta V + (\lambda + G) \cdot \frac{\partial e}{\partial y} = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\partial P}{\partial y};$$

$$G \cdot \Delta W + (\lambda + G) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\partial P}{\partial z};$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = c_v \cdot \Delta P - \frac{\beta}{3} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \sigma_{kk};$$

$$\sigma_{xx} = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_x + \lambda \cdot e - \frac{1}{\beta} \cdot P;$$

$$\sigma_{yy} = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_y + \lambda \cdot e - \frac{1}{\beta} \cdot P;$$

$$\sigma_{zz} = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_z + \lambda \cdot e - \frac{1}{\beta} \cdot P;$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = G \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right);$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = G \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right);$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = G \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right);$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial W}{\partial z};$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial W}{\partial z};$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y};$$

$$\begin{aligned}\gamma_{xz} = \gamma_{zx} &= \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x}; \\ \gamma_{yz} = \gamma_{zy} &= \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y}; \\ e &= \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z};\end{aligned}\quad (2.37)$$

$$\sigma_{kk} = (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot e - \frac{3}{\beta} \cdot P, \quad (2.37)$$

де U , V і W - переміщення в напрямку координатних осей x , y і z відповідно;

λ і G - константи Ламе; $c_v = \frac{3 \cdot \lambda + 2 \cdot G}{3 \cdot \gamma_w} \cdot k \phi$ - коефіцієнт просторової консолідації;

e - об'ємна відносна деформація; σ_{xx} , σ_{yy} і σ_{zz} - нормальні напруження,

діючі в напрямку координатних осей x , y і z відповідно; τ_{xy} , τ_{xz} , і τ_{yz} - те

ж дотичні, діючі відповідно в площинах xy , xz і yz ; P - поровий тиск; c_v - кое-

фіцієнт просторової консолідації; β - коефіцієнт порового тиску; ε_x , ε_y і ε_z -

нормальні деформації у напрямку осей x , y і z відповідно; γ_{xy} , γ_{xz} і γ_{yz} - де-

формації зсуву відповідно в площинах xy , xz і yz ; σ_{kk} - шаровий тензор на-

пружень; t - час; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ - оператор Лапласа в декартовій системі

координат.

Рішення рівняння (2.37) має вигляд:

$$U = \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \varphi_1 + z \cdot \frac{\partial \varphi_3}{\partial x};$$

$$V = \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \varphi_2 + z \cdot \frac{\partial \varphi_3}{\partial y};$$

$$W = \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \varphi_3 + z \cdot \frac{\partial \varphi_3}{\partial z};$$

$$\Delta\varphi_1 = 0;$$

$$\Delta\varphi_2 = 0;$$

$$\Delta\varphi_3 = 0;$$

$$\beta \cdot (\lambda + 2 \cdot G) \cdot \Delta\varphi = P; \quad (2.38)$$

$$\Delta^2 \cdot \left(3 \cdot c_v \cdot \frac{\lambda + 2 \cdot G}{3 \cdot \lambda + 2 \cdot G} \Delta\varphi - \frac{\partial\varphi}{\partial t} \right) = 0;$$

$$\frac{\partial\varphi_1}{\partial x} + \frac{\partial\varphi_2}{\partial y} + 4 \cdot (1 - \nu) \cdot \frac{\partial\varphi_3}{\partial z} = 0;$$

$$c_v \cdot \Delta P = \frac{3 \cdot \lambda + 2 \cdot G}{3} \cdot \beta \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left(\begin{array}{l} \Delta\varphi + \frac{\partial\varphi_1}{\partial x} + \\ + \frac{\partial\varphi_2}{\partial y} + 2 \cdot \frac{\partial\varphi_3}{\partial z} \end{array} \right);$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial\varphi_1}{\partial x} + z \cdot \frac{\partial\varphi_3}{\partial x^2};$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial\varphi_2}{\partial y} + z \cdot \frac{\partial\varphi_3}{\partial y^2};$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial\varphi}{\partial z^2} + 2 \cdot \frac{\partial\varphi_3}{\partial z} + z \cdot \frac{\partial\varphi_3}{\partial z^2};$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot \frac{\partial^2\varphi}{\partial x\partial y} + \frac{\partial\varphi_1}{\partial y} + \\ + 2 \cdot z \cdot \frac{\partial^2\varphi_3}{\partial x\partial y} + \frac{\partial\varphi_2}{\partial x} \end{array} \right\}$$

$$\gamma_{xz} = \gamma_{zx} = \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot \frac{\partial^2\varphi}{\partial z\partial x} + \frac{\partial\varphi_1}{\partial z} + \\ + 2 \cdot \frac{\partial\varphi_3}{\partial x} + 2 \cdot z \cdot \frac{\partial^2\varphi_3}{\partial z\partial x} \end{array} \right\};$$

$$\gamma_{yz} = \gamma_{zy} = \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z \partial y} + \frac{\partial \varphi_2}{\partial z} + \\ 2 \cdot \frac{\partial \varphi_3}{\partial y} + 2 \cdot z \cdot \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial z \partial y} \end{array} \right\};$$

$$e = \Delta \varphi + \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} + 2 \cdot \frac{\partial \varphi_3}{\partial z};$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = G \cdot \gamma_{xy};$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = G \cdot \gamma_{xz};$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = G \cdot \gamma_{yz};$$

(2.38)

$$\sigma_{xx} = \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot G \cdot \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} \varphi + \frac{\partial}{\partial x} \varphi_1 + \right. \\ \left. + z \cdot \frac{\partial^2}{\partial x^2} \varphi_3 \right) \cdot \varphi + \\ + \lambda \cdot \left(\Delta \varphi + \frac{\partial}{\partial x} \varphi_1 + \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial y} \varphi_2 + 2 \cdot \frac{\partial}{\partial z} \varphi_3 \right) - \frac{1}{\beta} \cdot P; \end{array} \right\};$$

$$\sigma_{yy} = \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot G \cdot \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} \varphi + \frac{\partial}{\partial y} \varphi_2 + \right. \\ \left. + z \cdot \frac{\partial^2}{\partial y^2} \varphi_3 \right) \cdot \varphi + \\ + \lambda \cdot \left(\Delta \varphi + \frac{\partial}{\partial x} \varphi_1 + \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial y} \varphi_2 + 2 \cdot \frac{\partial}{\partial z} \varphi_3 \right) - \frac{1}{\beta} \cdot P; \end{array} \right\};$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{zz} = 2 \cdot G \cdot \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} \varphi + 2 \cdot \frac{\partial}{\partial z} \varphi_3 + \right. \\ \left. + z \cdot \frac{\partial^2}{\partial z^2} \varphi_3 \right) \cdot \varphi + \\ + \lambda \cdot \left(\Delta \varphi + \frac{\partial}{\partial x} \varphi_1 + \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial y} \varphi_2 + 2 \cdot \frac{\partial}{\partial z} \varphi_3 \right) - \frac{1}{\beta} \cdot P; \end{aligned} \right\} \quad (2.38)$$

Тут $\varphi, \varphi_1, \varphi_2$ і φ_3 деякі функції, що підлягають визначенню координат x, y, z і час t .

Для того, щоб отримати загальне рішення задачі теорії взаємозалежної термомпружності, зіставимо систему рівнянь (2.3.7) з (2.22), (2.23), (2.26) і (2.29). Припустимо, що пружні константи Ламе не залежать від температури. Далі

$$\left. \begin{aligned} cv = a = \frac{\lambda}{\gamma \cdot c}; \\ \beta = \frac{1}{\alpha \cdot [3 \cdot \lambda + 2 \cdot G]} \end{aligned} \right\} \quad (2.39)$$

Маємо:

$$U = \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \varphi_1 + z \cdot \frac{\partial \varphi_3}{\partial x};$$

$$V = \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \varphi_2 + z \cdot \frac{\partial \varphi_3}{\partial y};$$

$$W = \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \varphi_3 + z \cdot \frac{\partial \varphi_3}{\partial z};$$

$$\Delta \varphi_1 = 0;$$

$$\Delta \varphi_2 = 0;$$

$$\Delta \varphi_3 = 0;$$

$$\frac{(\lambda + 2 \cdot G)}{\alpha \cdot [3 \cdot \lambda + 2 \cdot G]} \cdot \Delta \varphi = T;$$

$$\Delta^2 \cdot \left(3 \cdot a \cdot \frac{\lambda + 2 \cdot G}{3 \cdot \lambda + 2 \cdot G} \Delta \varphi - \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) = 0;$$

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} + 4 \cdot (1 - \nu) \cdot \frac{\partial \varphi_3}{\partial z} = 0;$$

$$a \cdot \Delta P = \frac{3 \cdot \lambda + 2 \cdot G}{3 \cdot \alpha \cdot [3 \cdot \lambda + 2 \cdot G]} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left(\begin{array}{l} \Delta \varphi + \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} + \\ + \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} + 2 \cdot \frac{\partial \varphi_3}{\partial z} \end{array} \right);$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} + z \cdot \frac{\partial \varphi_3}{\partial x^2};$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} + z \cdot \frac{\partial \varphi_3}{\partial y^2}; \quad (2.40)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z^2} + 2 \cdot \frac{\partial \varphi_3}{\partial z} + z \cdot \frac{\partial \varphi_3}{\partial z^2};$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} + \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} + \\ + 2 \cdot z \cdot \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial x \partial y} + \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} \end{array} \right\}$$

$$\gamma_{xz} = \gamma_{zx} = \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z \partial x} + \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} + \\ + 2 \cdot \frac{\partial \varphi_3}{\partial x} + 2 \cdot z \cdot \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial z \partial x} \end{array} \right\};$$

$$\gamma_{yz} = \gamma_{zy} = \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z \partial y} + \frac{\partial \varphi_2}{\partial z} + \\ + 2 \cdot \frac{\partial \varphi_3}{\partial y} + 2 \cdot z \cdot \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial z \partial y} \end{array} \right\}$$

$$e = \Delta \varphi + \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} + 2 \cdot \frac{\partial \varphi_3}{\partial z};$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = G \cdot \gamma_{xy};$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = G \cdot \gamma_{xz};$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = G \cdot \gamma_{yz};$$

$$\sigma_{xx} = \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot G \cdot \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial x} \varphi_1 + \right. \\ \left. + z \cdot \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial x^2} \right) \cdot \varphi + \\ + \lambda \cdot \left(\Delta \varphi + \frac{\partial}{\partial x} \varphi_1 + \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial y} \varphi_2 + 2 \cdot \frac{\partial}{\partial z} \varphi_3 \right) - \\ \left. - \alpha \cdot [3 \cdot \lambda + 2 \cdot G] \cdot T \right\}; \quad (2.40)$$

$$\sigma_{yy} = \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot G \cdot \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial y} \varphi_2 + \right. \\ \left. + z \cdot \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial y^2} \right) \cdot \varphi + \\ + \lambda \cdot \left(\Delta \varphi + \frac{\partial}{\partial x} \varphi_1 + \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial y} \varphi_2 + 2 \cdot \frac{\partial}{\partial z} \varphi_3 \right) - \\ \left. - \alpha \cdot [3 \cdot \lambda + 2 \cdot G] \cdot T \right\};$$

$$\sigma_{zz} = \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot G \cdot \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + 2 \cdot \frac{\partial}{\partial z} \varphi_3 + \right. \\ \left. + z \cdot \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial z^2} \right) \cdot \varphi + \\ + \lambda \cdot \left(\Delta \varphi + \frac{\partial}{\partial x} \varphi_1 + \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial y} \varphi_2 + 2 \cdot \frac{\partial}{\partial z} \varphi_3 \right) - \\ \left. - \alpha \cdot [3 \cdot \lambda + 2 \cdot G] \cdot T \right\}. \quad (2.40)$$

Таким чином, ми отримали загальне рішення просторової задачі теорії

взаємозалежної термопружності (2.40).

Далі розглянемо циліндричну систему координат. В даному випадку напружено-деформований стан описується системою рівнянь виду [281]:

$$\left\{ \begin{array}{l} (\lambda + 2 \cdot G) \cdot \frac{\partial e}{\partial r} + \\ + 2 \cdot G \cdot \frac{\partial \omega}{\partial z} \end{array} \right\} = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\partial P}{\partial r}; \quad (2.41)$$

$$\left[\begin{array}{l} (\lambda + 2 \cdot G) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} - \\ - \frac{2 \cdot G}{r} \cdot \frac{\partial(\omega \cdot r)}{\partial r} \end{array} \right] = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\partial P}{\partial z};$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = c_v \cdot \Delta P - \frac{\beta}{3} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \sigma_{kk};$$

$$\sigma_{zz} = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_z + \lambda \cdot e - \frac{1}{\beta} \cdot P;$$

$$\sigma_{rr} = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_r + \lambda \cdot e - \frac{1}{\beta} \cdot P;$$

$$\sigma_{\theta\theta} = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_\theta + \lambda \cdot e - \frac{1}{\beta} \cdot P;$$

$$\tau_{rz} = G \cdot \gamma_{rz};$$

$$\varepsilon_r = \frac{\partial U}{\partial r};$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial W}{\partial z};$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{U}{r};$$

$$\omega = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial r} \right);$$

$$\gamma_{rz} = \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial r};$$

$$\begin{aligned}
e &= \varepsilon_r + \varepsilon_z + \varepsilon_\theta; \\
\sigma_{kk} &= \sigma_{zz} + \sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta} = \\
&= (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot e - \frac{3}{\beta} \cdot P.
\end{aligned} \tag{2.41}$$

Тут U і W - переміщення відповідно в напрямку координатних осей Or і Oz ; ω - обертання; r і z - координати; λ і G - константи Ламе; c_v - коефіцієнт пророторової консолідації; β - коефіцієнт порового тиску; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ - оператор Лапласа в циліндричній системі координат при обліку осьової симетрії; σ_{zz} , σ_{rr} і $\sigma_{\theta\theta}$ - нормальні напруження; τ_{rz} - те ж, дотичні; σ_{kk} - шаровий тензор напружень; P - поровий тиск; ε_{zz} , ε_{rr} і $\varepsilon_{\theta\theta}$ - нормальні деформації; γ_{rz} - те ж, дотична.

Рішення цієї системи рівнянь має вигляд:

$$\begin{aligned}
U &= \frac{\partial}{\partial r} \Phi - \frac{\partial^2}{\partial r \partial z} F; \\
W &= \frac{\partial}{\partial z} \Phi + \frac{\lambda + 2 \cdot G}{\lambda + G} \cdot \Delta F - \frac{\partial^2}{\partial z^2} F; \\
P &= \beta \cdot (\lambda + 2 \cdot G) \cdot \Delta \Phi; \\
\Delta^2 F &= 0; \\
\Delta^2 \cdot \left(3 \cdot c_v \cdot \frac{\lambda + 2 \cdot G}{3 \cdot \lambda + 2 \cdot G} \Delta \Phi - \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) &= 0; \\
\left\{ \begin{array}{l} c_v \cdot P - \frac{3 \cdot \lambda + 2 \cdot G}{3} \cdot \beta \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \\ - \frac{3 \cdot \lambda + 2 \cdot G}{3 \cdot (\lambda + G)} \cdot \beta \cdot G \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial t \partial z} \end{array} \right\} &= 0; \\
\varepsilon_z &= \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} + \frac{\lambda + 2 \cdot G}{\lambda + G} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \Delta F - \\ - \frac{\partial^3 F}{\partial z^3} \end{array} \right\};
\end{aligned} \tag{2.42}$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_r &= \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} - \frac{\partial^3 F}{\partial r^2 \partial z}; \\
\varepsilon_\theta &= \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial r} - \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial r \partial z}; \\
e &= \Delta \Phi + \frac{G}{\lambda + G} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \Delta F; \\
\gamma_{rz} &= \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(\begin{array}{c} \frac{\lambda + 2 \cdot G}{\lambda + G} \Delta F - \\ -2 \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} \end{array} \right) + 2 \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r \partial z}; \\
\omega &= -\frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda + 2 \cdot G}{\lambda + G} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \Delta F; \\
\sigma_{zz} &= \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot G \cdot \left(\begin{array}{c} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} + \frac{\lambda + 2 \cdot G}{\lambda + G} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \Delta F - \\ -\frac{\partial^3 F}{\partial z^3} \end{array} \right) + \\ + \lambda \cdot \left(\Delta \Phi + \frac{G}{\lambda + G} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \Delta F \right) - \frac{1}{\beta} \cdot P \end{array} \right\}; \\
\sigma_{rr} &= \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot G \cdot \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} - \frac{\partial^3 F}{\partial r^2 \partial z} \right) + \\ + \lambda \cdot \left(\Delta \Phi + \frac{G}{\lambda + G} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \Delta F \right) - \frac{1}{\beta} \cdot P \end{array} \right\}; \\
\sigma_{\theta\theta} &= \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot G \cdot \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial r} - \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial r \partial z} \right) + \\ + \lambda \cdot \left(\Delta \Phi + \frac{G}{\lambda + G} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \Delta F \right) - \frac{1}{\beta} \cdot P \end{array} \right\}; \\
\tau_{rz} &= G \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(\begin{array}{c} \frac{\lambda + 2 \cdot G}{\lambda + G} \Delta - \\ -2 \cdot \frac{\partial^2}{\partial z^2} \end{array} \right) \cdot F + 2 \cdot G \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z \partial r}.
\end{aligned} \tag{2.42}$$

Тут Φ і F - підлягають визначенню відповідних гармонійних і бігармонійних функцій.

Для того, щоб отримати рішення в рамках моделі основи у виді термопружного середовища, підставимо в систему рівнянь (2.43) співвідношення (2.39). Маємо:

$$\begin{aligned}
 U &= \frac{\partial}{\partial r} \Phi - \frac{\partial^2}{\partial r \partial z} F; \\
 W &= \frac{\partial}{\partial z} \Phi + \frac{\lambda + 2 \cdot G}{\lambda + G} \cdot \Delta F - \frac{\partial^2}{\partial z^2} F; \\
 &\beta \cdot \frac{(\lambda + 2 \cdot G)}{\alpha \cdot [3 \cdot \lambda + 2 \cdot G]} \cdot \Delta \Phi; \\
 &\Delta^2 F = 0; \\
 &\Delta^2 \cdot \left(3 \cdot a \cdot \frac{\lambda + 2 \cdot G}{3 \cdot \lambda + 2 \cdot G} \Delta \Phi - \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) = 0; \\
 a \cdot P - \frac{3 \cdot \lambda + 2 \cdot G}{3 \cdot \alpha \cdot [3 \cdot \lambda + 2 \cdot G]} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{3 \cdot \lambda + 2 \cdot G}{3 \cdot (\lambda + G) \cdot \alpha \cdot [3 \cdot \lambda + 2 \cdot G]} \cdot G \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial t \partial z} &= 0; \\
 \varepsilon_z &= \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} + \frac{\lambda + 2 \cdot G}{\lambda + G} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \Delta F - \frac{\partial^3 F}{\partial z^3}; \\
 \varepsilon_r &= \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} - \frac{\partial^3 F}{\partial r^2 \partial z}; \\
 \varepsilon_\theta &= \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial r} - \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial r \partial z}; \\
 e &= \Delta \Phi + \frac{G}{\lambda + G} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \Delta F; \\
 \gamma_{rz} &= \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(\frac{\lambda + 2 \cdot G}{\lambda + G} \Delta F - 2 \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} \right) + 2 \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r \partial z}; \\
 \omega &= -\frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda + 2 \cdot G}{\lambda + G} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \Delta F;
 \end{aligned}
 \tag{2.43}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{zz} &= \left\{ \begin{aligned} &2 \cdot G \cdot \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} + \frac{\lambda + 2 \cdot G}{\lambda + G} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \Delta F - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\partial^3 F}{\partial z^3} \right) + \\ &+ \lambda \cdot \left(\Delta \Phi + \frac{G}{\lambda + G} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \Delta F \right) - \\ &- \alpha \cdot [3 \cdot \lambda + 2 \cdot G] \cdot T \end{aligned} \right\}; \\
\sigma_{rr} &= \left\{ \begin{aligned} &2 \cdot G \cdot \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} - \frac{\partial^3 F}{\partial r^2 \partial z} \right) + \\ &+ \lambda \cdot \left(\Delta \Phi + \frac{G}{\lambda + G} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \Delta F \right) - \\ &- \alpha \cdot [3 \cdot \lambda + 2 \cdot G] \cdot T \end{aligned} \right\}; \\
\sigma_{\theta\theta} &= \left\{ \begin{aligned} &2 \cdot G \cdot \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial r} - \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial r \partial z} \right) + \\ &+ \lambda \cdot \left(\Delta \Phi + \frac{G}{\lambda + G} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \Delta F \right) - \\ &- \alpha \cdot [3 \cdot \lambda + 2 \cdot G] \cdot T \end{aligned} \right\}; \\
\tau_{rz} &= G \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(\begin{aligned} &\frac{\lambda + 2 \cdot G}{\lambda + G} \Delta - \\ &- 2 \cdot \frac{\partial^2}{\partial z^2} \end{aligned} \right) \cdot F + 2 \cdot G \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z \partial r}. \tag{2.43}
\end{aligned}$$

Висновки

Викладені у цьому розділі матеріали досліджень дали нам змогу зробити такі висновки:

1) розрізняють плоскі та глибинні ґрунтові колектори теплових насосів. У першому типі ґрунтового колектора використовується тепло поверхневого шару ґрунту, а у другому – тепло глибинних шарів основи;

2) сьогодні розрахунок і проектування теплових насосів виконують з використанням емпіричних формул, таблиць і графіків, яких в умовах України недостатньо.

Крім того, аналіз поданих у цьому розділі даних дає нам можливість встановити таке:

1) для економії території доцільно розташовувати плоскі колектори під будівлями і спорудами. Однак у цьому разі від'ємні температури основи можуть призвести до морозного здимання ґрунту і як наслідок – до пошкоджень (аж до руйнування) розташованих на ньому фундаментів будівель і споруд. Тому важливо зрозуміти, як виконувати розрахунок і проектування таких основ і розташованих на них фундаментів;

2) для економії коштів доцільно замінювати один, розташований у глибокій свердловині глибинний ґрунтовий U -подібний ґрунтовий зонд, кількома, розташованими в свердловинах меншої глибини. Однак щодо цього у наукових джерелах немає жодних рекомендацій;

3) доцільно поєднувати пальові фундаменти з U -подібними ґрунтовими зондами. Однак, треба враховувати, що під час заморожування і розморожування ґрунту навколо палі істотно змінюється її несуча здатність. Тому важливо зрозуміти, як потрібно проектувати такі пальові фундаменти;

4) необхідно дати відповідь, як треба розраховувати параметри ґрунтових теплових насосів, що працюють у реверсному режимі.

5) розглянуто та проаналізовано методи розрахунку температурних полів у ґрунтових основах. На цій підставі вибрано необхідні для виконання подальших досліджень: рівняння теплопереносу; граничні та початкові умови;

6) розглянуто та проаналізовано методи розрахунку напружено-деформованого стану гірських порід, що дало можливість вибрати необхідні для виконання подальших досліджень: рівняння рівноваги; рівняння стану.

7) В декартовій та циліндричній (з осевою симетрією) системах координат отримано загальне рішення задачі теорії взаємозв'язаної термоупругості. При цьому у якості вихідного було отримано авторами роботи загальне рішення задачі теорії взаємозв'язаної фільтраційної консолідації.

Загалом зроблено висновок, що для отримання відповідей на сформульовані вище питання необхідно вміти визначати температурні поля в основах теплових насосів та їх трансформацію в просторі та часі під впливом різних факторів. На вирішення цієї проблеми і спрямовані викладені нижче дослідження.

РОЗДІЛ 3.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ У ҐРУНТОВИХ ОСНОВАХ

Температурний вплив на гірські породи є причиною виникнення в них додаткових напружень і деформацій, а також фазових перетворень (тобто заморожування і розморожування) порової рідини.

Тому цього цього розділі ми мали мету напрацювати експериментальний матеріал, необхідний для розроблення методики, спрямованої на визначення температурних полів у гірських породах, у яких розташовані колектори теплових насосів.

Під час виконання досліджень ми врахували, що температура ґрунту має дві складові:

- 1) температури навколишнього середовища, яка сезонно коливається і залежить від пори року;
- 2) температури, причиною зміни якої є теплообмін між гірською породою і розташованим у ній колектором теплового насоса.

Тому викладені в цьому розділі матеріали досліджень мають наступну структуру.

У підрозділі 3.1 наведено експериментальні закономірності сезонної зміни температури на денній поверхні основи в різних областях України.

Для зручності використання цих матеріалів під час подальших досліджень, а також для зручності їх аналізу апроксимовано залежності температури повітря від часу у вісімнадцяти областях України.

У підрозділі 3.2 подано матеріали експериментальних досліджень закономірностей сезонної зміни температури в ґрунтовій товщі.

Для зручності використання цих матеріалів упродовж подальших досліджень, а також для зручності їх аналізу апроксимовано залежності температури повітря від часу в двох областях України.

У підрозділі 3.3 наведено отримані нами експериментальні закономірності розподілу температури в основі моделі U -подібного колектора теплового насоса. Наприкінці розділу сформовано висновки до розглянутого вище.

3.1. Експериментальні закономірності сезонної зміни температури в різних областях України

Під час виконання поданих у цьому розділі досліджень проаналізовано дані Гідрометеоцентру України за середньомісячною температурою повітря в 18 областях України.

Упродовж досліджень фіксувалися залежності температури земної поверхні від часу.

Ці дані наведено в графічній (рис. 3.1-3.18) і табличній (табл. 3.1-3.18) формі.

Крім того, наведені на рисунках і в таблицях експериментальний залежності апроксимовані поліноміальними функціями.

Ступінь поліномів визначалась так:

1. Спочатку було використано поліном першого ступеню.
2. Після цього з використанням коефіцієнтів кореляції та відносної середньої квадратичної похибки оцінювалась точність апроксимації.
3. Далі ступінь полінома підвищувалася і процес апроксимації повторювався.

Під час апроксимації розглядалась перевизначена систем:

$$\left. \begin{aligned} a_0 + a_1 \cdot t_1 + a_2 \cdot t_1^2 + a_3 \cdot t_1^3 + a_4 \cdot t_1^4 &= T_{v,1}; \\ a_0 + a_1 \cdot t_2 + a_2 \cdot t_2^2 + a_3 \cdot t_2^3 + a_4 \cdot t_2^4 &= T_{v,2}; \\ a_0 + a_1 \cdot t_3 + a_2 \cdot t_3^2 + a_3 \cdot t_3^3 + a_4 \cdot t_3^4 &= T_{v,3}; \\ \dots & \dots \\ a_0 + a_1 \cdot t_i + a_2 \cdot t_i^2 + a_3 \cdot t_i^3 + a_4 \cdot t_i^4 &= T_{v,i}; \\ \dots & \dots \\ a_0 + a_1 \cdot t_n + a_2 \cdot t_n^2 + a_3 \cdot t_n^3 + a_4 \cdot t_n^4 &= T_{v,n}; \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

яка вирішувалася методом найменших квадратів [74, 133, 134].

Тут a_0, a_1, a_2, a_3 та a_4 – емпіричні коефіцієнти що підлягають визначенню; $T_{v,i}$ – середньомісячна температура i -го місяця (експериментальні дані); t_i – номер i -го місяця.

У ході розв’язання системи рівнянь (3.1) вона приводилася до так званого нормального вигляду:

$$\left. \begin{aligned} A_{11} \cdot a_0 + A_{12} \cdot a_1 + A_{13} \cdot a_2 + A_{14} \cdot a_3 + A_{15} \cdot a_4 &= b_1; \\ A_{21} \cdot a_0 + A_{22} \cdot a_1 + A_{23} \cdot a_2 + A_{24} \cdot a_3 + A_{25} \cdot a_4 &= b_2; \\ A_{31} \cdot a_0 + A_{32} \cdot a_1 + A_{33} \cdot a_2 + A_{34} \cdot a_3 + A_{35} \cdot a_4 &= b_3; \\ A_{41} \cdot a_0 + A_{42} \cdot a_1 + A_{43} \cdot a_2 + A_{44} \cdot a_3 + A_{45} \cdot a_4 &= b_4; \\ A_{51} \cdot a_0 + A_{52} \cdot a_1 + A_{53} \cdot a_2 + A_{54} \cdot a_3 + A_{55} \cdot a_4 &= b_5. \end{aligned} \right\}$$

Тут:

$$\left. \begin{aligned} A_{11} &= n; \\ A_{22} &= \sum_{i=1}^n (t_i)^2; \\ A_{33} &= \sum_{i=1}^n \left(t_i^2 \right)^2 = \sum_{i=1}^n t_i^4; \\ A_{44} &= \sum_{i=1}^n \left(t_i^3 \right)^2 = \sum_{i=1}^n t_i^6; \\ A_{55} &= \sum_{i=1}^n \left(t_i^4 \right)^2 = \sum_{i=1}^n t_i^8; \end{aligned} \right\}$$

$$A_{12} = A_{21} = \sum_{i=1}^n 1 \cdot t_i = \sum_{i=1}^n t_i;$$

$$A_{13} = A_{31} = \sum_{i=1}^n 1 \cdot t_i^2 = \sum_{i=1}^n t_i^2;$$

$$A_{14} = A_{41} = \sum_{i=1}^n 1 \cdot t_i^3 = \sum_{i=1}^n t_i^3;$$

$$A_{15} = A_{51} = \sum_{i=1}^n 1 \cdot t_i^4 = \sum_{i=1}^n t_i^4;$$

$$b_1 = \sum_{i=1}^n 1 \cdot T_{v,i}$$

$$A_{23} = A_{32} = \sum_{i=1}^n t_i \cdot t_i^2 = \sum_{i=1}^n t_i^3;$$

$$A_{24} = A_{42} = \sum_{i=1}^n t_i \cdot t_i^3 = \sum_{i=1}^n t_i^4;$$

$$A_{25} = A_{52} = \sum_{i=1}^n t_i \cdot t_i^4 = \sum_{i=1}^n t_i^5;$$

$$b_2 = \sum_{i=1}^n t_i \cdot T_{v,i};$$

$$A_{34} = A_{43} = \sum_{i=1}^n t_i^2 \cdot t_i^3 = \sum_{i=1}^n t_i^5;$$

$$\left. \begin{aligned}
 A_{35} = A_{53} &= \sum_{i=1}^n t_i^2 \cdot t_i^4 = \sum_{i=1}^n t_i^6; \\
 b_3 &= \sum_{i=1}^n t_i^2 \cdot T_{v,i}; \\
 A_{45} = A_{54} &= \sum_{i=1}^n t_i^3 \cdot t_i^4 = \sum_{i=1}^n t_i^7; \\
 b_4 &= \sum_{i=1}^n t_i^3 \cdot T_{v,i}; \\
 b_5 &= \sum_{i=1}^n t_i^4 \cdot T_{v,i}.
 \end{aligned} \right\}$$

Далі з використанням методу Гауса визначались невідомі емпіричні коефіцієнти a_0, a_1, a_2, a_3 та a_4 .

Далі з використанням електронних таблиць Excel виконувалась перевірка отриманих таким чином даних.

Крім того, для додаткового контролю результатів апроксимації експериментальні та розрахункові криві наносилися на одну діаграму і виконувався візуальний їх контроль.

Результати визначення емпіричних коефіцієнтів наведені в табл. 3.1.

Отримані так емпіричні залежності температури на поверхні основи від часу мають вигляд:

$$T_v = \sum_{i=0}^4 a_i \cdot (t)^i; \quad t \in (0,12). \quad (3.2)$$



Рис. 3.1. Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Львові протягом 12 місяців

Таблиця 3.1

Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Львові

Назва	Температура												
	І (січень)	ІІ (лютий)	ІІІ (березень)	ІV (квітень)	V (травень)	VI (червень)	VII (липень)	VIII (серпень)	IX (вересень)	X (жовтень)	XI (листопад)	XII (грудень)	Середня 1 рік
Середньомісячна протягом року	-4,6	-3,1	1,1	7,7	13,2	16,1	17,3	16,8	13	8	2,5	-2,1	7,2
Денна максимальна	-0,1	1,3	6,3	13,6	19,4	22,0	23,9	23,5	18,3	12,9	6,0	0,9	12,3
Нічна мінімальна	-6,1	-5,5	-1,7	3,6	8,4	11,3	13,2	12,5	8,4	4,1	-0,3	-4,6	3,6

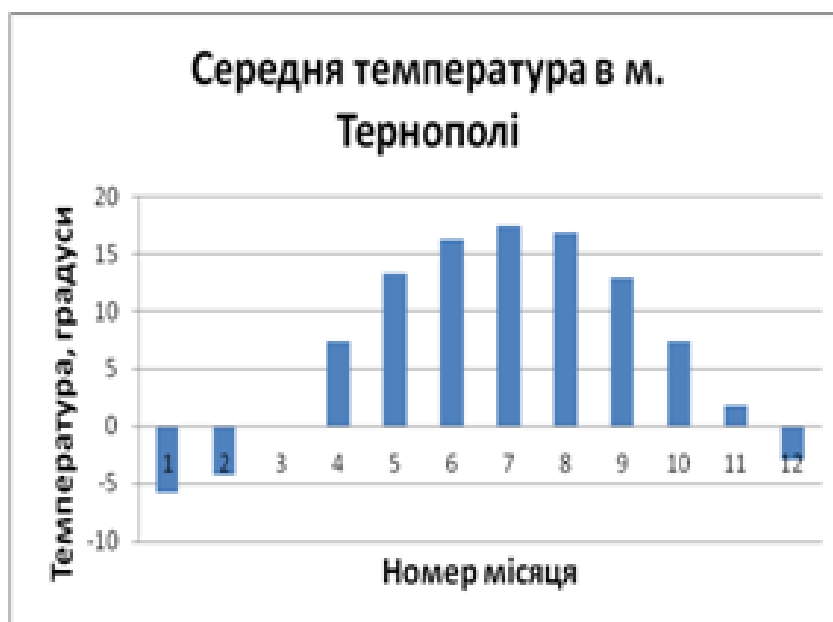


Рис. 3.2. Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Тернополі протягом 12 місяців

Таблиця 3.2

Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Тернополі

Назва	Температура												
	І (січень)	ІІ (лютий)	ІІІ (березень)	ІV (квітень)	V (травень)	VI (червень)	VII (липень)	VIII (серпень)	IX (вересень)	X (жовтень)	XI (листопад)	XII (грудень)	Середня 1 рік
Середньомісячна протягом року	-5,8	4,2	0,0	7,4	13,3	16,2	17,4	16,8	12,9	7,4	1,8	-2,9	6,7
Денна максимальна	-1,9	-0,4	4,7	12,7	18,8	21,4	23,2	23,0	18,1	12,1	4,8	-0,4	11,2
Нічна мінімальна	-4,4	-3,4	0,7	7,8	13,6	16,5	18,1	17,5	12,9	7,4	1,9	-2,8	7,1

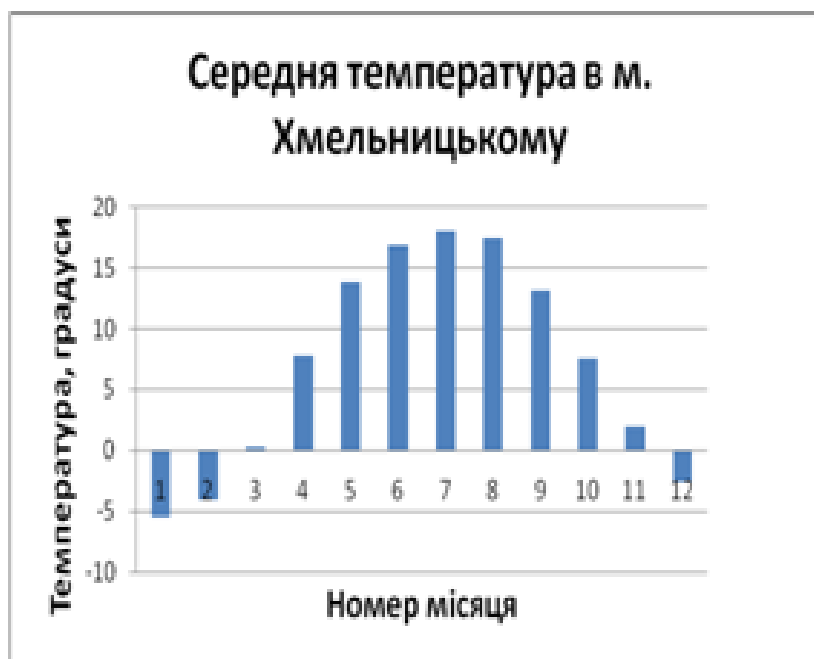


Рис. 3.3. Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Хмельницькому протягом 12 місяців

Таблиця 3.3

Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Хмельницькому

Температура	I (січень)	II (лютий)	III (березень)	IV (квітень)	V (травень)	VI (червень)	VII (липень)	VIII (серпень)	IX (вересень)	X (жовтень)	XI (листопад)	XII (грудень)	Середня 1 рік
Середня	-5,5	-4,0	0,3	7,8	13,9	16,8	18,0	17,4	13,2	7,6	2,0	-2,6	7,1
Денна максимальна	-3	-1	3	13	18	23	24	23	19	12	5	-1	11
Нічна мінімальна	-8	-6	-3	3	9	11	12	11	8	4	0	-5	4



Рис. 3.4. Закономірності зміни середньомісячної температури у м. Вінниці протягом 12 місяців

Таблиця 3.4

Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Вінниці

Температура	I (січень)	II (лютий)	III (березень)	IV (квітень)	V (травень)	VI (червень)	VII (липень)	VIII (серпень)	IX (вересень)	X (жовтень)	XI (листопад)	XII (грудень)	Середня 1 рік
Середня	-5,8	-4,3	0,2	8,0	14,1	17,1	18,3	17,7	13,4	7,6	1,9	-2,5	7,1
Денна максимальна	-4	-2	3	12	18	21	23	22	17	11	4	-1	10
Нічна мінімальна	-8	-7	3	3	9	12	14	12	9	3	0	-5	3



Рис. 3.5. Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Києві протягом 12 місяців

Таблиця 3.5

Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Києві

Температура	I (січень)	II (лютий)	III (березень)	IV (квітень)	V (травень)	VI (червень)	VII (липень)	VIII (серпень)	IX (вересень)	X (жовтень)	XI (листопад)	XII (грудень)	Середня 1 рік
Середня	-5,6	-4,2	0,7	8,7	15,1	18,2	19,3	18,6	13,9	8,1	2,1	-2,3	7,7
Денна максимальна	-0,9	0,0	5,6	14,0	20,7	23,5	25,6	24,9	19,0	12,5	4,6	0,0	12,5
Нічна мінімальна	-9	-8	3	3	10	13	15	14	9	4	-1	-5	2

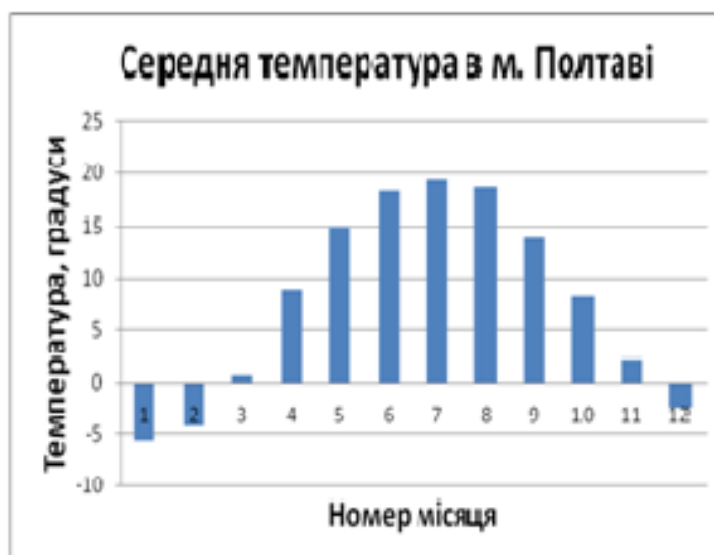


Рис. 3.6. Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Полтаві протягом 12 місяців

Таблиця 3.6

Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Полтаві

Температура	I (січень)	II (лютий)	III (березень)	IV (квітень)	V (травень)	VI (червень)	VII (липень)	VIII (серпень)	IX (вересень)	X (жовтень)	XI (листопад)	XII (грудень)	Середня 1 рік
Середня	-6,6	-5,3	0,1	8,8	15,4	18,7	20,1	19,4	14,3	7,6	1,5	-3,1	7,6
Денна максимальна	-3	-2	3	12	20	23	24	23	18	11	3	-1	11
Нічна мінімальна	-8	-7	-2	5	10	13	15	13	10	3	-1	-5	3

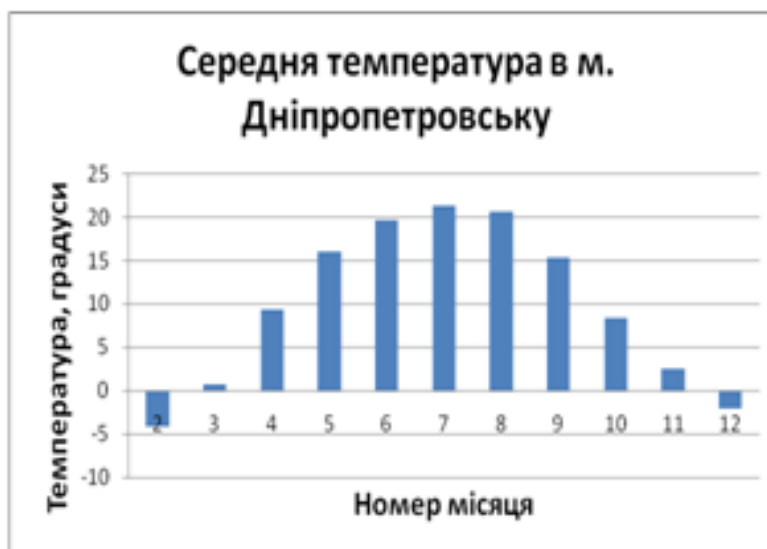


Рис. 3.7. Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Дніпропетровську протягом 12 місяців

Таблиця 3.7

Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Дніпропетровську

Температура	I (січень)	II (лютий)	III (березень)	IV (квітень)	V (травень)	VI (червень)	VII (липень)	VIII (серпень)	IX (вересень)	X (жовтень)	XI (листопад)	XII (грудень)	Середня 1 рік
Середня	-5,5	-4,1	0,8	9,4	16,0	19,6	21,3	20,6	15,4	8,4	2,5	-2,1	8,5
Денна максимальна	-2	-1	4	3	21	24	25	25	20	12	4	0	12
Нічна мінімальна	-7	-6	1	5	11	15	16	15	11	5	1	-3	5

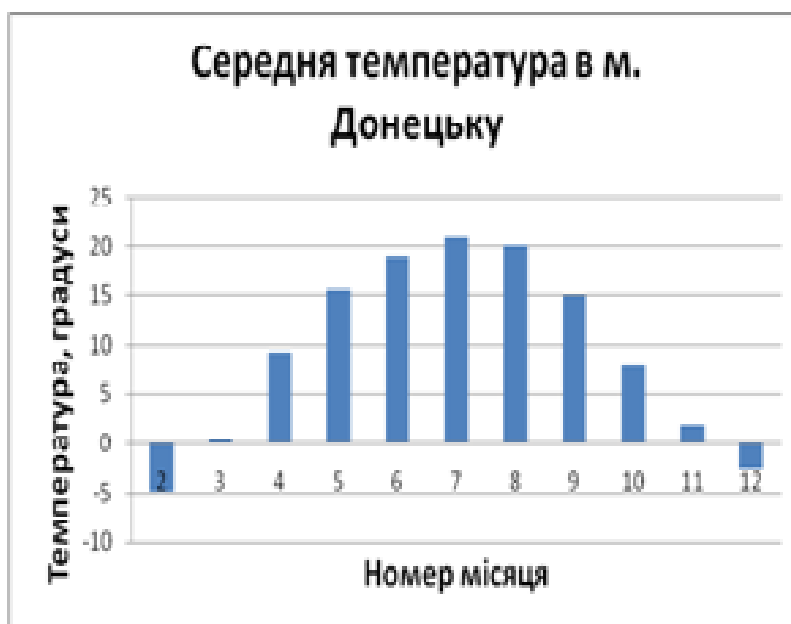


Рис. 3.8. Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Донецьку протягом 12 місяців

Таблиця 3.8

Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Донецьку

Температура	I (січень)	II (лютий)	III (березень)	IV (квітень)	V (травень)	VI (червень)	VII (липень)	VIII (серпень)	IX (вересень)	X (жовтень)	XI (листопад)	XII (грудень)	Середня 1 рік
Середня	-6,1	-4,8	0,4	9,3	15,5	19,0	20,9	20,1	14,9	7,8	2,0	-2,6	8,0
Денна максимальна	-3	-1	3	13	20	23	25	24	19	11	4	0	11
Нічна мінімальна	-8	-6	-2	5	10	13	15	14	10	4	-1	-5	4

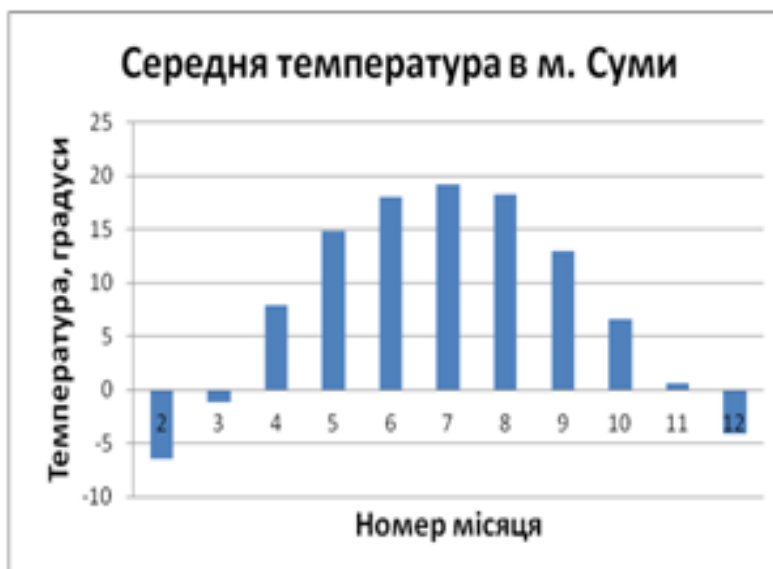


Рис. 3.9. Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Сумах протягом 12 місяців

Таблиця 3.9

Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Сумах

Температура	I (січень)	II (лютий)	III (березень)	IV (квітень)	V (травень)	VI (червень)	VII (липень)	VIII (серпень)	IX (вересень)	X (жовтень)	XI (листопад)	XII (грудень)	Середня 1 рік
Середня	-7,7	-6,4	-1,1	7,9	14,9	18,0	19,2	18,2	13,0	6,6	0,6	-4,1	6,6
Денна максимальна	-3	-3	2	12	19	22	23	22	17	10	2	-1	10
Нічна мінімальна	-10	-9	-3	3	9	13	14	13	8	3	-1	-6	3

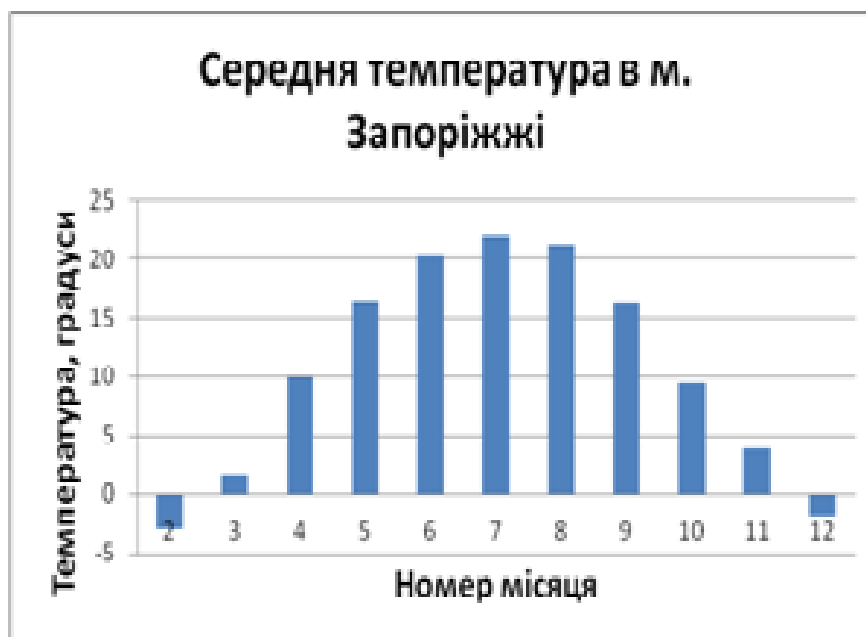


Рис. 3.10. Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Запоріжжі протягом 12 місяців

Таблиця 3.10

Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Запоріжжі

Температура	I (січень)	II (лютий)	III (березень)	IV (квітень)	V (травень)	VI (червень)	VII (липень)	VIII (серпень)	IX (вересень)	X (жовтень)	XI (листопад)	XII (грудень)	Середня 1 рік
Середня	-4,2	-2,9	1,7	9,9	16,4	20,2	22,0	21,2	16,2	9,5	3,8	-1,8	9,4
Денна максимальна	-2	-1	5	14	21	25	26	25	20	12	6	0	13
Нічна мінімальна	-6	-5	-1	5	11	15	16	15	11	6	1	-3	5



Рис. 3.11. Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Одесі протягом 12 місяців

Таблиця 3.11

Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Одесі

Температура	I (січень)	II (лютий)	III (березень)	IV (квітень)	V (травень)	VI (червень)	VII (липень)	VIII (серпень)	IX (вересень)	X (жовтень)	XI (листопад)	XII (грудень)	Середня 1 рік
Середня	-1,7	-1,0	2,6	9,0	15,1	19,4	21,4	21,2	17,1	11,1	5,9	1,4	10,1
Денна максимальна	1	1	5	12	19	24	26	26	21	15	8	4	14
Нічна мінімальна	-4	-4	0	6	12	16	18	17	13	8	3	-1	7

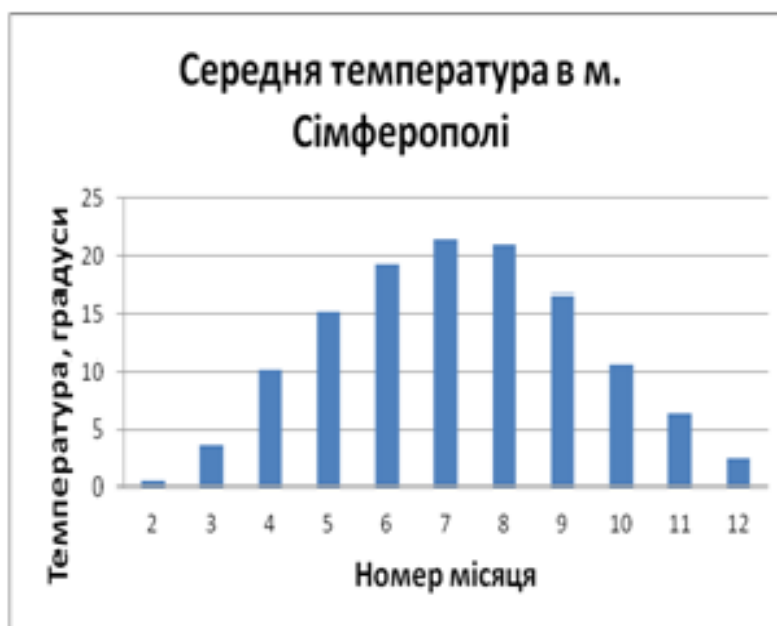


Рис. 3.12. Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Сімферополі протягом 12 місяців

Таблиця 3.12

Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Сімферополі

Температура	I (січень)	II (лютий)	III (березень)	IV (квітень)	V (травень)	VI (червень)	VII (липень)	VIII (серпень)	IX (вересень)	X (жовтень)	XI (листопад)	XII (грудень)	Середня 1 рік
Середня	-0,5	0,4	3,6	10,2	15,2	19,2	21,5	21,0	16,6	10,7	6,3	2,4	10,6
Денна максимальна	2	4	7	14	20	23	26	26	21	15	9	5	14
Нічна мінімальна	-3	-2	0	5	10	13	16	15	11	7	3	0	6

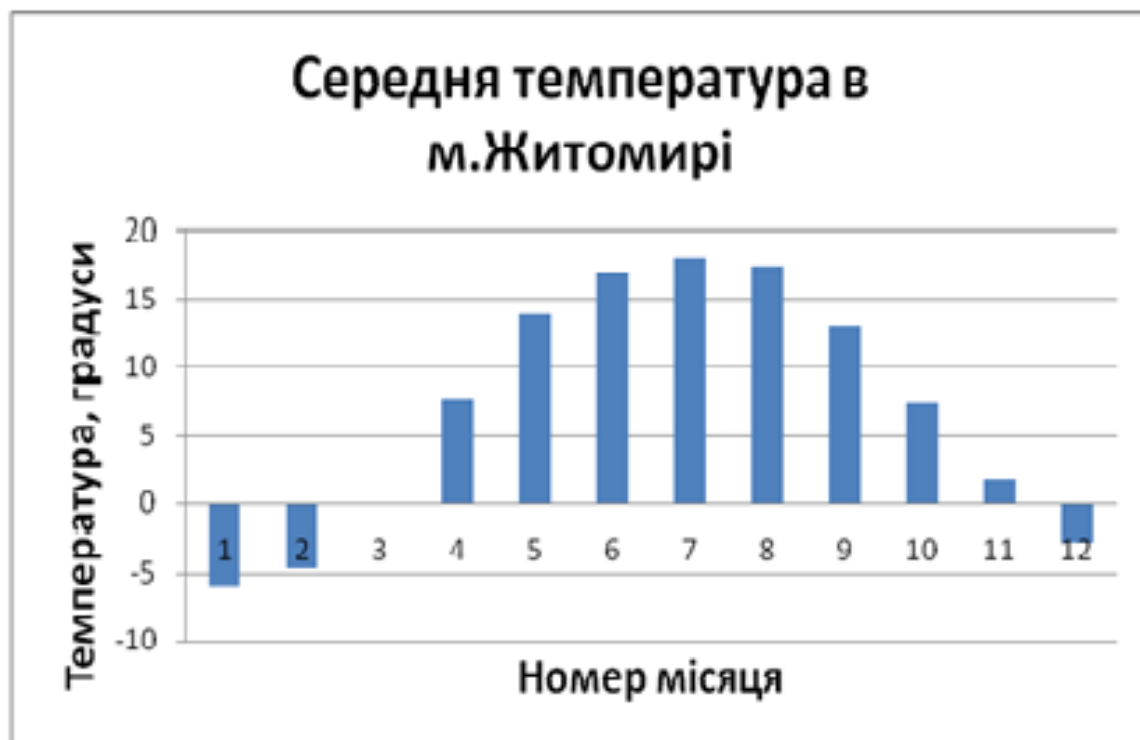


Рис. 3.13. Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Житомирі протягом 12 місяців

Таблиця 3.13

Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Житомирі

Температура	I (січень)	II (лютий)	III (березень)	IV (квітень)	V (травень)	VI (червень)	VII (липень)	VIII (серпень)	IX (вересень)	X (жовтень)	XI (листопад)	XII (грудень)	Середня 1 рік
Середня	-6,0	-4,6	-0,1	7,7	13,9	17,0	18,0	17,4	13,0	7,4	1,8	-2,7	6,9
Денна максимальна	-4	-2	3	12	18	21	23	22	17	11	4	-1	0
Нічна мінімальна	-8	-7	-3	3	9	12	14	12	9	3	0	-5	3



Рис. 3.14. Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Кіровограді протягом 12 місяців

Таблиця 3.14

Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Кіровограді

Температура	I (січень)	II (лютий)	III (березень)	IV (квітень)	V (травень)	VI (червень)	VII (липень)	VIII (серпень)	IX (вересень)	X (жовтень)	XI (листопад)	XII (грудень)	Середня 1 рік
Середня	-5,7	-4,3	0,5	8,9	15,3	18,6	20,0	19,4	14,7	8,1	2,3	-2,3	8,0
Денна максимальна	-2	-1	3	13	20	23	25	24	19	12	5	0	11
Нічна мінімальна	-8	-6	-2	5	10	13	15	14	10	4	0	-4	5



Рис. 3.15. Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Миколаєві протягом 12 місяців

Таблиця 3.15

Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Миколаєві

Температура	I (січень)	II (лютий)	III (березень)	IV (квітень)	V (травень)	VI (червень)	VII (липень)	VIII (серпень)	IX (вересень)	X (жовтень)	XI (листопад)	XII (грудень)	Середня 1 рік
Середня	-3,1	-1,8	2,6	10,2	16,5	20,4	22,3	21,8	16,9	10,3	4,4	-0,1	10,0
Денна максимальна	-1	1	5	14	21	25	27	26	20	14	8	2	14
Нічна мінімальна	-6	-5	0	6	11	15	17	26	11	6	0	-2	6

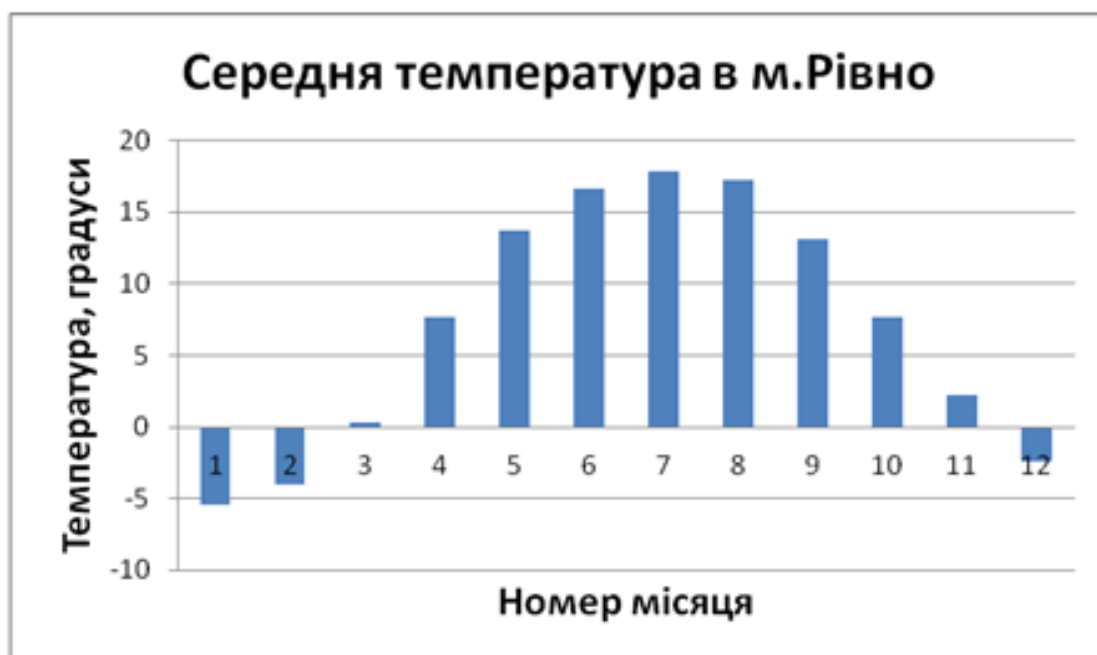


Рис. 3.16. Закономірності зміни середньомісячної температури у м. Рівному протягом 12 місяців

Таблиця 3.16

Закономірності зміни середньомісячної температури у м. Рівне

Температура	I (січень)	II (лютий)	III (березень)	IV (квітень)	V (травень)	VI (червень)	VII (липень)	VIII (серпень)	IX (вересень)	X (жовтень)	XI (листопад)	XII (грудень)	Середня 1 рік
Середня	-5,4	-4,0	0,3	7,7	13,7	16,6	17,8	17,2	13,1	7,7	2,2	-2,4	7,0
Денна максимальна	-2	-1	4	11	18	20	22	22	17	11	4	0	10
Нічна мінімальна	-7	-6	-1	3	8	11	12	12	9	4	0	-4	3

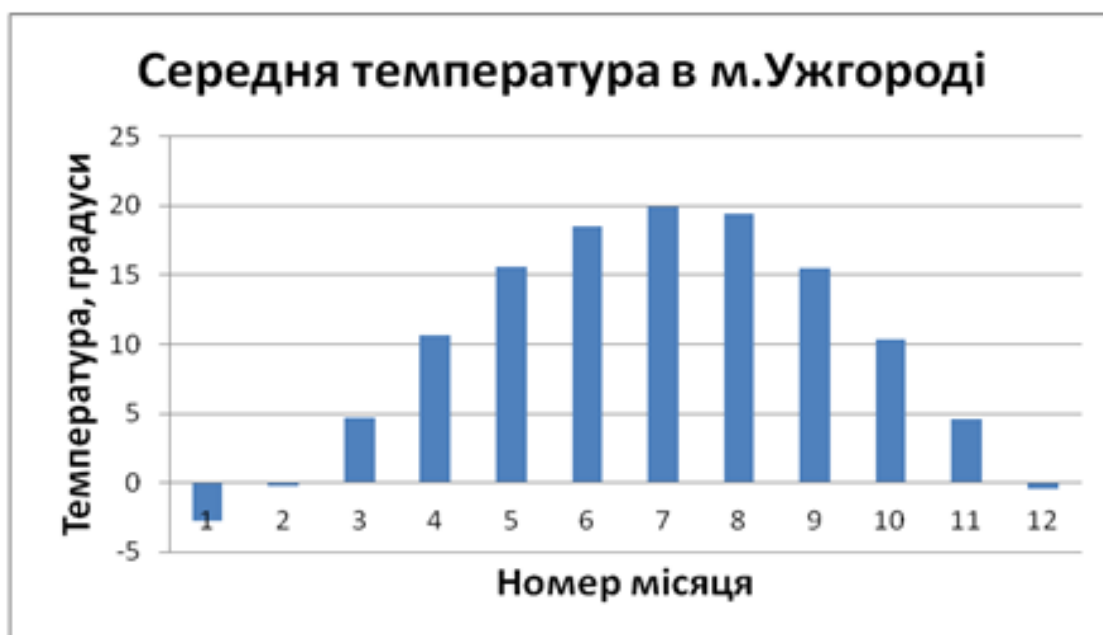


Рис. 3.17. Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Ужгороді протягом 12 місяців

Таблиця 3.17

Закономірності зміни середньомісячної температури в м. Ужгороді

Температура	I (січень)	II (лютий)	III (березень)	IV (квітень)	V (травень)	VI (червень)	VII (липень)	VIII (серпень)	IX (вересень)	X (жовтень)	XI (листопад)	XII (грудень)	Середня 1 рік
Середня	-2,8	-0,2	4,7	10,7	15,6	18,5	19,9	19,4	15,5	10,3	4,6	-0,4	9,7
Денна максимальна	-1	2	7	16	20	25	26	25	21	15	8	2	14
Нічна мінімальна	-6	-3	1	6	9	13	14	13	10	6	3	-2	5



Рис. 3.18. Закономірності зміни середньомісячної температури у м. Черкасах протягом 12 місяців

Таблиця 3.18

Закономірності зміни середньомісячної температури у м. Черкаси

Температура	I (січень)	II (лютий)	III (березень)	IV (квітень)	V (травень)	VI (червень)	VII (липень)	VIII (серпень)	IX (вересень)	X (жовтень)	XI (листопад)	XII (грудень)	Середня 1 рік
Середня	-5,9	-4,6	4,8	8,7	15,3	18,4	19,8	19,1	14,2	7,8	2,1	-2,5	7,7
Денна максимальна	-3	-1	3	12	20	23	25	24	19	12	5	0	11
Нічна мінімальна	-8	-6	-2	5	10	13	15	14	10	4	0	-5	4

Значення коефіцієнтів a_i

Назва міста	Значення коефіцієнта					Коефіцієнт кореляції r
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	
Львів	-0,59570	-7,84680	4,27950	-0,53060	0,01900	0,99
Тернопіль	-1,36970	-8,61720	4,65650	-0,57890	0,02080	0,99
Хмельницький	-0,66920	-9,22320	4,88930	-0,60800	0,02200	0,99
Вінниця	-1,84850	-11,3050	5,94230	-0,74690	0,02740	0,99
Київ	-0,40250	-10,0250	5,31830	-0,66580	0,02430	0,99
Полтава	-0,73610	-11,1680	5,83860	-0,73030	0,02670	0,99
Дніпропетровськ	1,26060	-12,1200	6,07290	-0,75200	0,02730	0,99
Донецьк	0,30030	-11,7730	6,00420	-0,74700	0,02720	0,99
Суми	-1,84850	-11,3050	5,94230	-0,74690	0,02740	0,99
Запоріжжя	2,39700	-11,7300	5,81130	-0,71180	0,02560	0,99
Одеса	6,19090	-12,6530	5,63090	-0,66580	0,02350	0,99
Сімферополь	7,04720	-12,0690	5,41710	-0,64810	0,02310	0,99
Житомир	-0,96240	-9,65630	5,09910	-0,63590	0,02310	0,99
Кіровоград	0,16720	-10,9040	5,62050	-0,69850	0,02540	0,99
Миколаїв	4,00860	-12,1290	5,83740	-0,71120	0,02550	0,99
Рівне	-0,68890	-9,05140	4,80110	-0,59640	0,02150	0,99
Ужгород	-0,89600	-4,94630	3,47410	-0,44510	0,01590	0,99
Черкаси	-0,11920	-10,8810	5,64080	-0,70370	0,02570	0,99

Загалом викладені в цьому підрозділі матеріали досліджень дали нам змогу зробити такі висновки:

- 1) середньомісячна температура на денній поверхні основи, залежно від пори року, може набувати як позитивних, так і негативних значень;
- 2) залежності середньомісячної температури основи від пори року в різних обласних центрах України відрізняються одна від одної;
- 3) залежності середньомісячної температури основи від часу в різних обласних центрах України з достатнім ступенем точності можна описати поліномом четвертого ступеня, коефіцієнти якого для різних регіонів України мають різні значення;
- 4) середньорічні температури повітря на всій території України коливаються в діапазоні 6,1–10,1 °С. Оскільки на інтервалі глибин 1,6–50 м температура основи приблизно дорівнює її середньорічним значенням і значно вище від нуля (розділ 3.2), використання як опалювального приладу ґрунтового теплового насоса ефективно по всій території України.

3.2. Експериментальні закономірності сезонної зміни температури в ґрунтовій товщі

Для перевірки розрахункових температурних полів всередині ґрунтової основи на адекватність їхніх розрахункових значень необхідно знати фактичні значення температур в глибині ґрунтової товщі.

Для цього ми проаналізували дані спостережень за температурою основи на глибинах 1,6 і 3,2 м, виконані Дніпропетровським Гідрометеоцентром.

Результати вимірювання середньомісячних температур у часі на глибині 1,6 і 3,2 м у м. Дніпропетровську подані на рис. 3.19, 3.20 і табл. 3.20, 3.21 відповідно.

Результати вимірювання середньомісячних температур у часі на глибині 1,6 м у м. Львові наведені на рис. 3.21 і табл. 3.22.

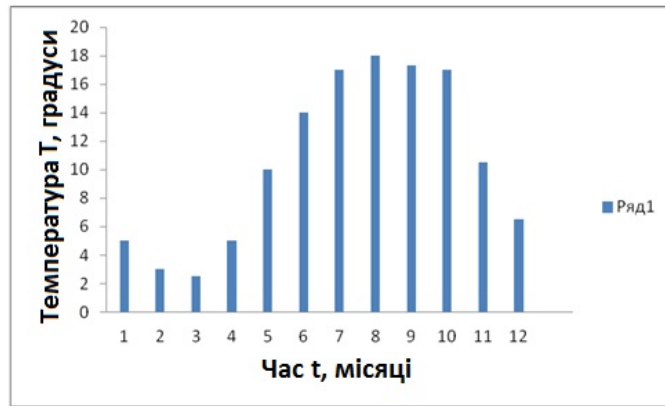


Рис. 3.19. Зміна температури в ґрунтовій основі у м. Дніпропетровську на глибині 1,6 м. Ряд 1 – дані Гідрометеоцентру

Таблиця 3.20

Закономірності зміни середньомісячної температури у Дніпропетровську на глибині 1,6 м

Назва	Температура												
	I (січень)	II (лютий)	III (березень)	IV (квітень)	V (травень)	VI (червень)	VII (липень)	VIII (серпень)	IX (вересень)	X (жовтень)	XI (листопад)	XII (грудень)	Середня за 1 рік
Температура													
Середньомісячна протягом року	5	3	2,5	5	10	14	17	18	17,3	17	10,5	6,5	10,2

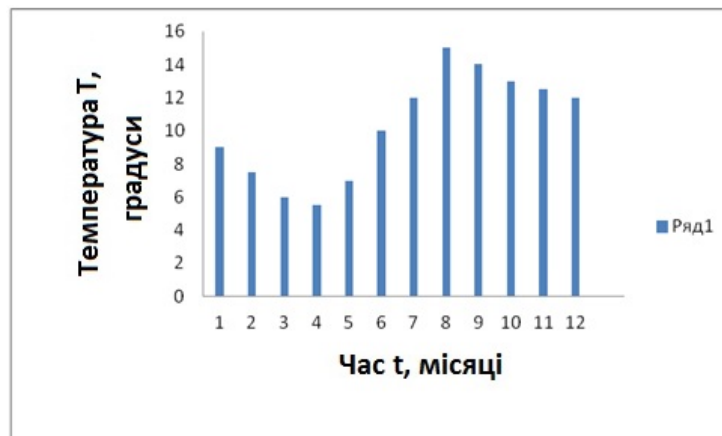


Рис. 3.20. Зміна температури в ґрунтовій основі у м. Дніпропетровську на глибині 3,2 м. Ряд 1 – дані Гідрометеоцентру

Закономірності зміни середньомісячної температури
у Дніпропетровську на глибині 3,2 м

Назва	Температура												
	I (січень)	II (лютий)	III (березень)	IV (квітень)	V (травень)	VI (червень)	VII (липень)	VIII (серпень)	IX (вересень)	X (жовтень)	XI (листопад)	XII (грудень)	Середня 1 рік
Середньомісячна протягом року	9	7,5	6	5,5	7	10	12	15	14	13	12,5	12	10,5

Пізніше ми апроксимували експериментальні залежності середньомісячних температур від часу на різних глибинах від денної поверхні.

Для цієї мети використано стандартний пакет програм Microsoft Excel.

Під час апроксимації визначалися коефіцієнти рівняння регресії і коефіцієнт множинної кореляції r .

Результати цих досліджень наведено на рис. 3.22-3.24.

Виявилось, що незалежно від глибини залежності температури на різній глибині ґрунтової товщі від часу мають поліноміальну залежність та з достатньою точністю описуються поліномом четвертого ступеня, формула (3.2).

При цьому для описання температур на різних глибинах слід використовувати різні коефіцієнти (табл. 3.23).

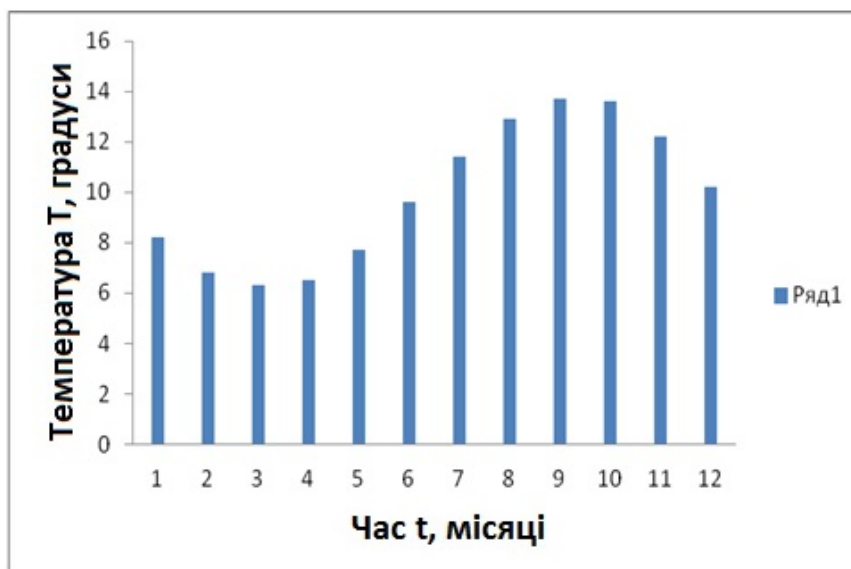


Рис. 3.21. Зміна температури в ґрунтовій основі в м. Львові на глибині 3,2 м. Ряд 1 – дані Гідрометеоцентру

Таблиця 3.22

Закономірності зміни середньомісячної температури у м. Львові на глибині 3,2 м

Назва	Температура												
	І (січень)	ІІ (лютий)	ІІІ (березень)	ІV (квітень)	V (травень)	VI (червень)	VII (липень)	VIII (серпень)	IX (вересень)	X (жовтень)	XI (листопад)	II (грудень)	Середня за 1 рік
Середньомісячна протягом року	8,2	6,8	6,3	6,5	7,7	9,6	11,4	12,9	13,7	13,6	12,2	10,2	9,9

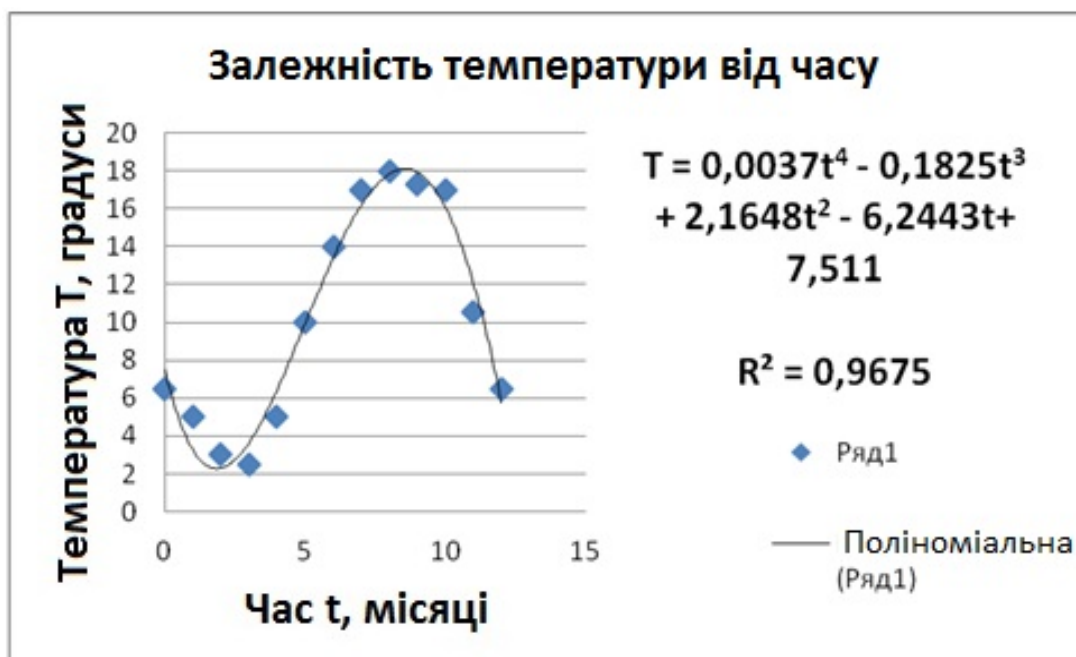


Рис. 3.22. Зміна температури в ґрунтовій основі в м. Дніпропетровську на глибині 1,6 м. Ряд 1 – дані Гідрометеоцентру



Рис. 3.23. Зміна температури в ґрунтовій основі в м. Дніпропетровську на глибині 3,2 м. Ряд 1 – дані Гідрометеоцентру

Отримані під час апроксимації емпіричні коефіцієнти наведено в табл. 3.23.

Виявилося, що їхні значення на різних глибинах і в різних областях України (Львівська та Дніпропетровська) істотно (майже на один десятковий порядок) відрізняються один від одного.

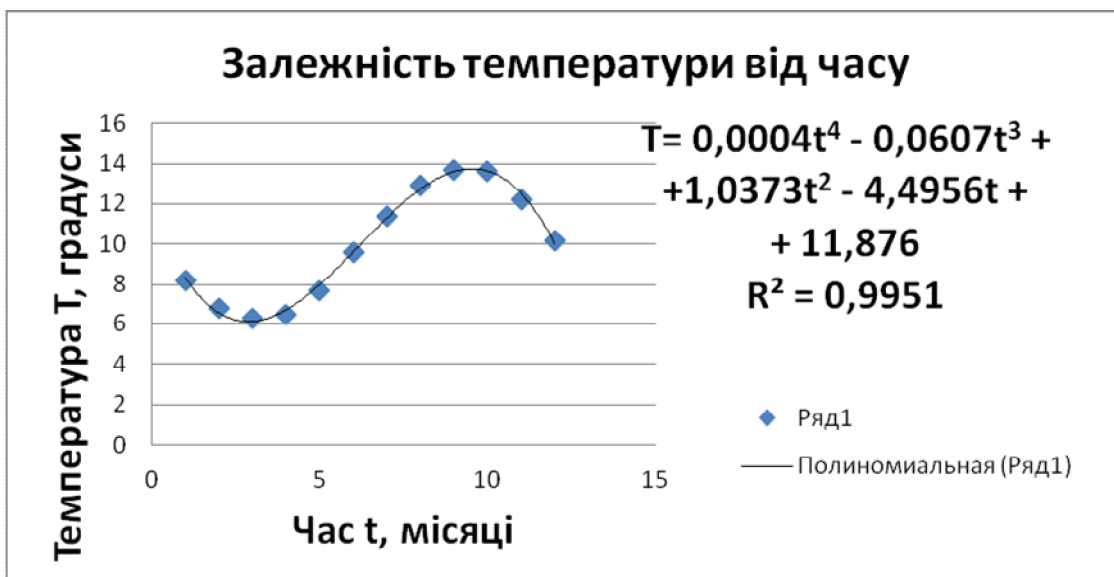


Рис. 3.24. Зміна температури в ґрунтовій основі в м. Львові на глибині 3,2 м. Ряд 1 – дані Гідрометеоцентру

Таблиця 3.23

Закономірності зміни середньомісячної температури
в м. Дніпропетровську та м. Львові

Назва міста	Глибина, м	Значення коефіцієнта					Коефіцієнт кореляції r^2
		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	
1	2	3	4	5	6	7	8
Дніпропетровськ	1,6	7,51100	-6,2443	2,16480	-0,18250	0,00370	0,975
	3,2	12,5920	-5,3566	1,31410	-0,09260	0,00160	0,911
Львів	3,2	11,8760	-4,4956	1,03720	-0,06070	0,00040	0,991

Аналіз зазначених у цьому підрозділі матеріали досліджень дали змогу зробити такі висновки:

- 1) середньомісячна температура всередині основи незалежно від пори року строго позитивна;
- 2) залежності середньомісячної температури всередині основи від пори року в різних обласних центрах України на однаковій глибині відрізняються один від одного;
- 4) залежності середньомісячної температури основи від часу в різних обласних центрах України та на різній глибині з достатнім ступенем точності можуть бути описані поліномом четвертого ступеня, коефіцієнти якого для різних регіонів України беруть різні значення;
- 5) що більша глибина вимірювання, то ближче температура ґрунту всередині основи до її середньорічного значенням на денній поверхні;
- 6) що більша глибина вимірювання, то менше відхилення температури ґрунту всередині основи від її середнього значення.

3.3. Експериментальні закономірності розподілу температури в основі джерела тепла циліндричної форми

Необхідність проведення наведених у цьому розділі матеріалів досліджень зумовлена тим, що для перевірки розрахункових температурних полів всередині ґрунтової основи, зумовлених роботою теплових насосів, на адекватність їхнім фактичним значенням необхідно знати фактичні значення температур у глибині ґрунтової товщі.

Для цієї мети ми провели спеціальний експеримент, суть якого полягала в створенні температурного поля навколо джерела циліндричної форми (рис. 3.25) і його вимірюванні.

Під час експериментів відрізок труби зі завареним нижнім кінцем поміщали в піщаний ґрунт. У середину труби наливали воду і поміщали нагрівальний елемент (ТЕН). Для того, щоб мати можливість вимірювати температуру всередині основи, ми створили спеціальні пристрої (рис. 3.26), які містили металевий прут з наклеєними на нього тензорезисторами.

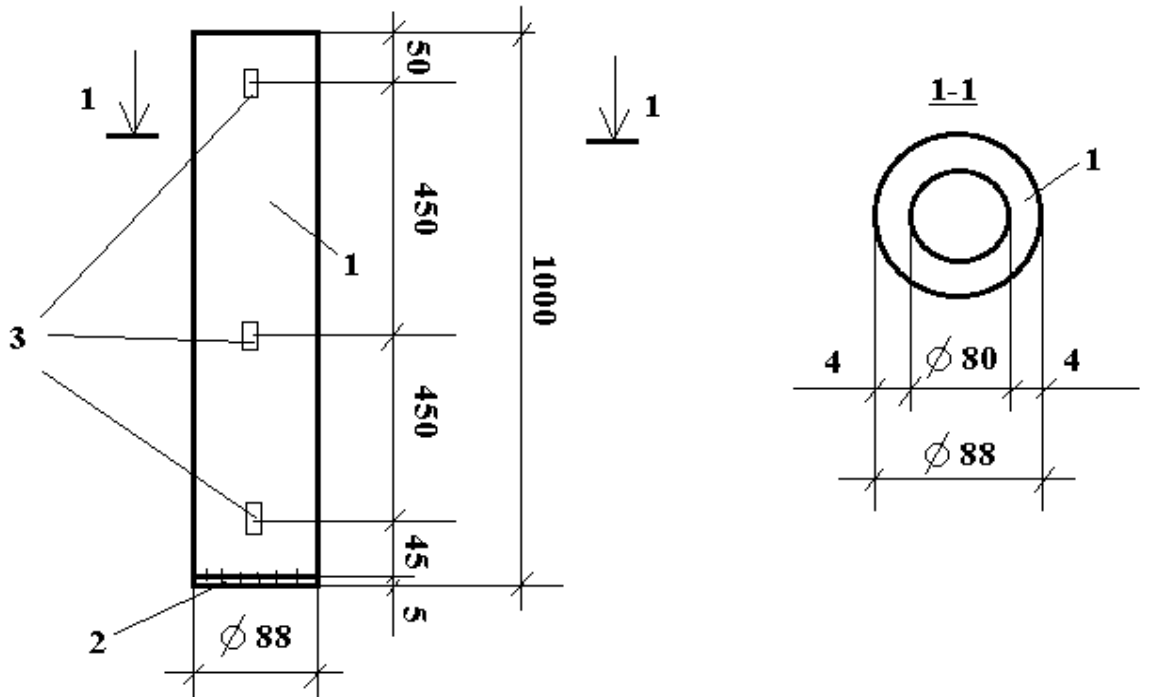


Рис. 3.25. Експериментальна установка: 1 – сталевая труба; 2 – днище – пластина завтовшки 5 мм; 3 – тензорезистори

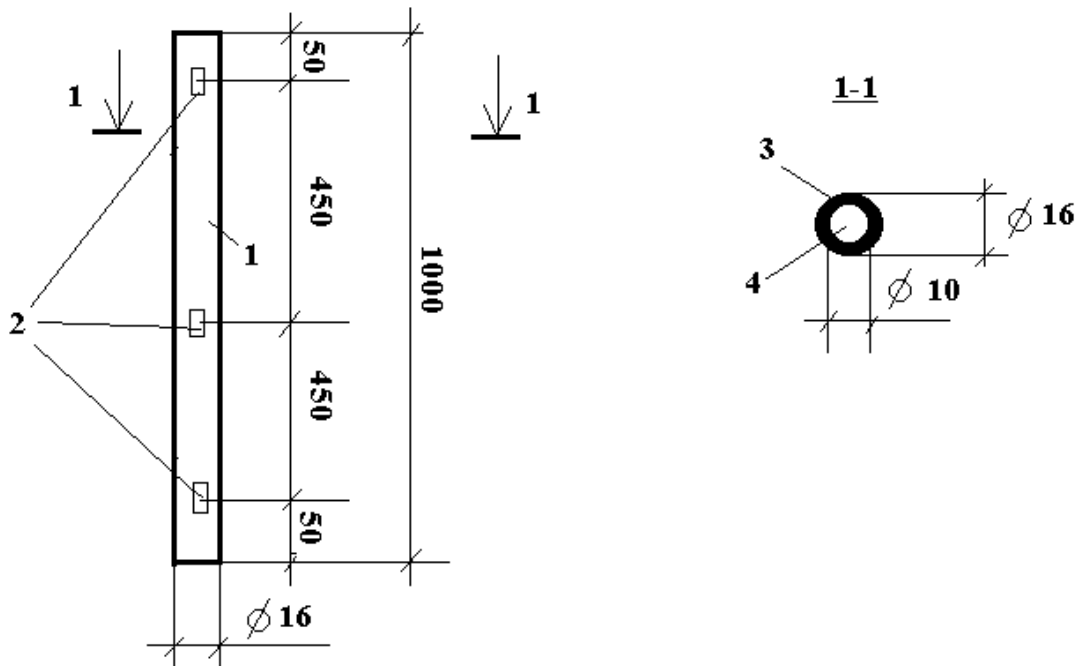


Рис. 3.26. Пристрій для вимірювання температури: 1 – стрижень з приклеєними до нього тензорезисторами; 2 – тензорезистори; 3 – поліуретанове покриття; 4 – сталевий стрижень

Оскільки процес теплопередачі в металі відбувається істотно інтенсивніше, ніж у ґрунті, на металевий прут наносили покриття з пінистого поліуретану завтовшки 3 мм, до якого приклеювали тензорезистори.

На відстані від центру труби і в основі помістили сталеві прути з наклеєними на них терморезисторами (рис. 3.26 та рис. 3.27).

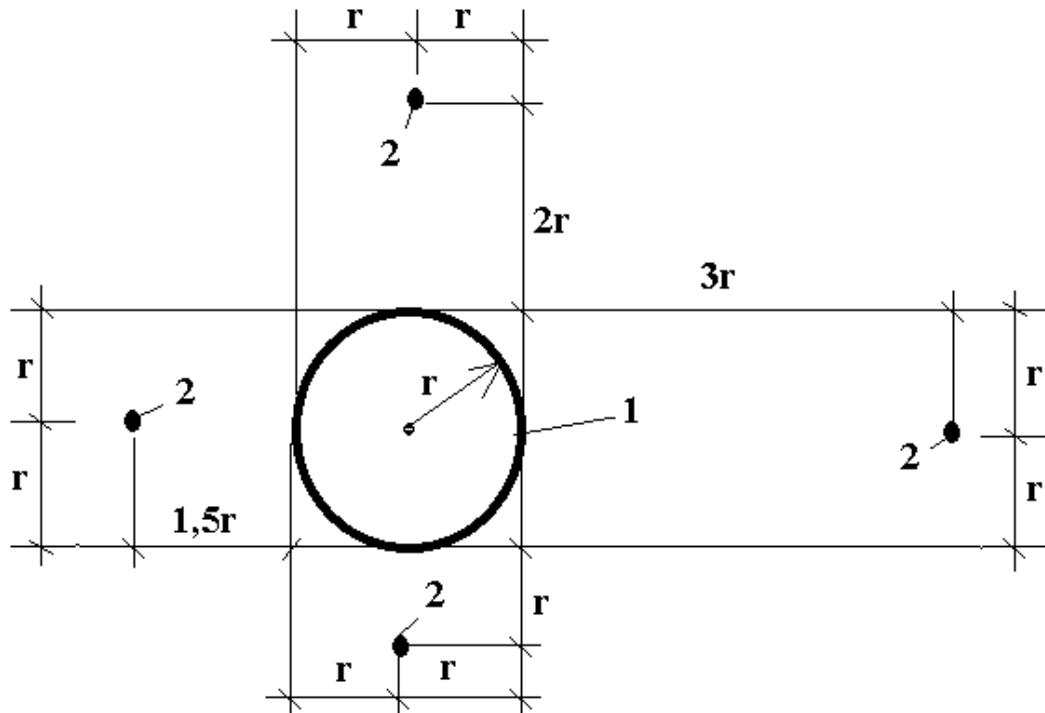


Рис. 3.27. Схема проведення експерименту: 1 – джерело температури (рис. 3.25); 2 – пристрої для вимірювання температури (рис. 3.26)

Після цього в металевій трубі монтувався нагрівач, в ємність наливали воду і починали випробування.

Випробування проводилися в такій послідовності.

1. Спочатку виконували тарювання датчиків температури. Їх опускали в ємність з водою, температура якої поступово підвищувалася. Під час тарювання реєстрували температуру води в ємності і опір резистора. На основі цих даних будували тарювальну криву.

2. Після цього джерело температури (рис. 3.25) занурювали в піщаний ґрунт і на зазначених на рис. 3.27 відстанях від джерела розставлялися пристрої, призначені для вимірювання температури (рис. 3.26).

3. Далі в джерело тепла наливали воду.

4. Після цього знімалися початкові відліки з датчиків температури.

5. Далі вмикали нагрівач і починалися випробування.

Під час експериментів за допомогою ваттметра реєстрували кількість спожитої енергії, час і температуру основи в точках вимірювання.

Відліки знімалися через 6 хвилин, 12 хвилин, 1 година, 2 години, 4 години, 6 і 8 годин після початку експерименту.

Отримані так залежності температури від координат для різних моментів часу наведені на рис. 3.28-3.30.

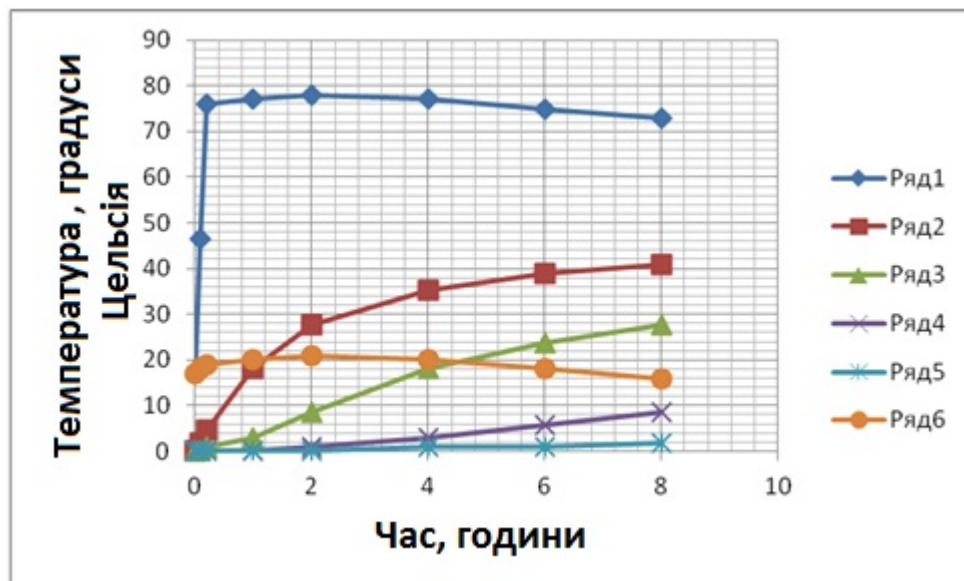


Рис. 3.28. Експериментальні залежності «температура – час» на глибині $z = 0,1$ м. Ряд 1 – на стінці джерела температури; ряд 2 – те саме, на відстані від джерела 22 мм; ряд 3 – те саме, 44 мм; ряд 4 – те саме, 88 мм; ряд 5 – те саме, 132 мм; ряд 6 – зміна температури навколишнього середовища

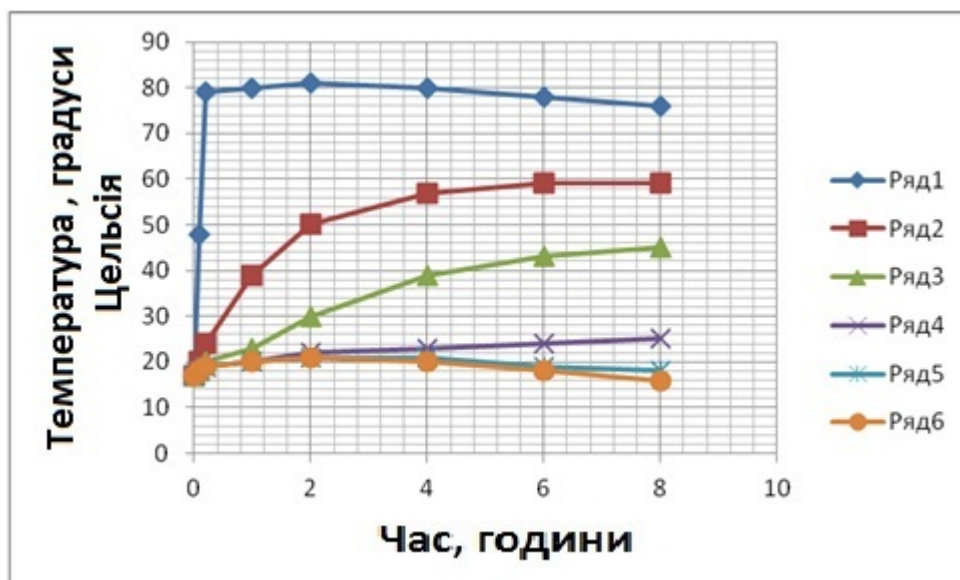


Рис. 3.29. Експериментальні залежності «температура–час» на глибині $z = 0,5$ м. Ряд 1 – на стінці джерела температури; ряд 2 – те саме, на відстані від джерела 22 мм; ряд 3 – те саме, 44 мм; ряд 4 – те саме, 88 мм; ряд 5 – те саме, 132 мм; ряд 6 – зміна температури навколишнього середовища

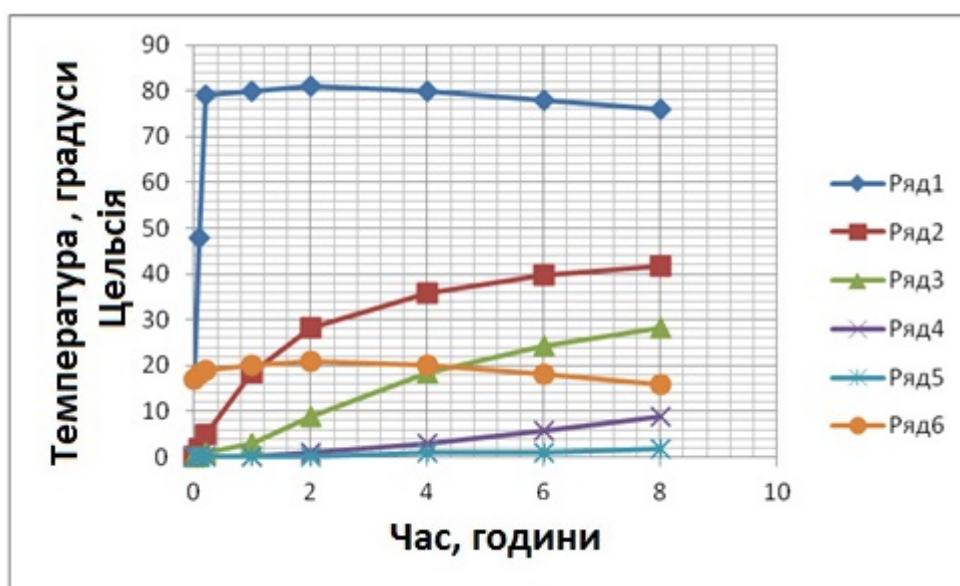


Рис. 3.30. Експериментальні залежності «температура–час» на глибині $z = 0,9$ м. Ряд 1 – на стінці джерела температури; ряд 2 – те саме, на відстані від джерела 22 мм; ряд 3 – те саме, 44 мм; ряд 4 – те саме, 88 мм; ряд 5 – те саме, 132 мм; ряд 6 – зміна температури навколишнього середовища

Аналіз наведених на рисунках залежностей дав нам змогу зробити такі висновки:

- 1) температурне поле неоднорідне в просторі і змінюється в часі;
- 2) однозначною є тенденція збільшення температури з часом;
- 3) що більше відстань від джерела температури, то менший вплив він чинить на температуру навколишнього середовища;
- 4) напрацьований і зазначений у цьому підрозділі матеріал цілком можна використати для перевірки теоретичних результатів на адекватність експерименту.

Висновки

Загалом викладені в цьому розділі матеріали досліджень дали нам змогу зробити такі висновки:

- 1) залежності середньомісячної температури основи від пори року в різних обласних центрах України відрізняються один від одного;
- 2) середньомісячна температура всередині основи на території України незалежно від пори року строго позитивна. Залежності середньомісячної температури всередині основи від часу в різних обласних центрах України та на різній глибині з достатньою ступенем точності можна описати поліномом четвертого ступеня, коефіцієнти якого для різних регіонів України набувають різних значень;
- 3) напрацьований нами і поданий у цьому розділі матеріал цілком можна використати для перевірки теоретичних результатів на адекватність експерименту;
- 4) сформульовано наукове положення, за яким на території України залежність середньомісячної температури на денній поверхні основи від часу описується поліномом четвертого ступеня, коефіцієнти якого для різних регіонів України мають різні значення. Це дає змогу урахувати зовнішнє температурне поле під час визначення напружено-деформованого стану ґрунту в зоні впливу колектора теплового насоса.

РОЗДІЛ 4.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗНАКОЗМІННОГО ЗАМОРОЖУВАННЯ-РОЗМОРОЖУВАННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ ҐРУНТУ І МАТЕРІАЛУ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Необхідно зазначити, що бетони, полімерні колектори теплообмінників та ґрунти в загальному випадку мають пружні, в'язко-пружні та пластичні властивості, на які істотно впливає волога, що знаходиться в порах бетонного каменю та ґрунту, а також хімічний склад та фізичний стан компонентів цих матеріалів [1, 10, 17, 23, 24, 45, 57, 60, 63, 91, 92, 96, 111, 112, 126, 131, 132, 157, 164, 168, 191, 231, 232, 236, 239, 248, 252–254, 259–263, 313, 321].

Правила експлуатації теплових насосів у розвинених країнах допускають циклічне заморожування-розморозування їхніх колекторів [51, 202]. Оскільки під час заморожування порова рідина збільшується в об'ємі приблизно на 10 %, а міцність і модуль деформації льоду мають один порядок з аналогічними характеристиками матеріалів будівельних конструкцій, і є істотно вищими, ніж у звичайних ґрунтів. Тому під час проектування основ і конструкцій, у яких розташовані колектори теплових насосів, необхідно враховувати це явище.

Сьогодні у практиці будівництва зазначені явища враховують у таких випадках:

1) під час визначення деформацій морозного здимання (в умовах України цей вид розрахунку виконують під час визначення глибини закладення підшви фундаменту);

2) у разі циклічного заморожування-розморозування відбувається погіршення властивостей ґрунту [208, 209, 210]. 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, 233];

3) у разі циклічного заморожування-розморозування погіршуються властивості бетону. Це явище враховують під час проектування, визначаючи кіль-

кість циклів заморожування-розморожування бетону, за якого його властивості знижуються незначно (морозостійкість) [96];

4) бетонні елементи будівельних конструкцій, у яких розташовуються полімерні колектори теплових насосів, мають коефіцієнт температурного розширення на 1-2 десяткових порядки менше, ніж у колекторів за подібних значень деформаційних властивостей бетону і полімеру, в силу чого в разі зміни температури в конструкціях можуть виникати додаткові температурні деформації;

5) колектори теплових насосів можуть перебувати нижче від рівня підземних вод, через що заморожування-розморожування в цьому разі має дещо інші умови, ніж це відбувається під час випробувань за стандартною методикою.

Відповідно до викладеного під час написання цього розділу ми прийняли такий підхід до послідовності досліджень:

1) спочатку виконувався якісний експеримент, під час якого досягалася мета візуального позначення проблеми;

2) після цього виконувався експеримент, під час якого визначалися кількісні характеристики.

Матеріали досліджень викладено в такій послідовності:

У підрозділі 4.1 зазначено матеріали досліджень для виявлення закономірностей впливу циклічного заморожування-розморожування на міцнісні і деформаційні властивості ґрунту.

У підрозділі 4.2 наведено матеріали досліджень з виявлення закономірностей впливу циклічного заморожування-розморожування на міцнісні та деформаційні властивості бетону.

Під час написання підрозділу 4.3 досягнуто мети оцінити вплив деформацій, зумовлених морозним здиманням на деформації розташованих на ґрунтовій основі будівель і споруд.

Нарешті, під час написання підрозділу 4.4 зроблено спробу визначити несучу здатність моделі пальового фундаменту в разі циклічного заморожування-розморожування прилеглого до нього ґрунту.

Ми також врахували загальні вимоги щодо випробування ґрунтів, бетону та паль у різних умовах [18, 42, 56, 74–82, 87, 89, 96–99, 168, 213, 248, 249, 305, 324, 327, 345].

4.1. Вплив циклічного заморожування-розморозування на міцнісні та деформаційні властивості ґрунту

У цьому розділі наведено матеріали – результати експериментів, під час проведення яких визначали, як циклічне заморожування-розморозування ґрунту впливає на його властивості.

4.1.1. Якісний експеримент

Відомо, що навіть укріплені ґрунти в водонасиченому стані під час циклічного заморожування-розморозування піддаються деструкції, внаслідок чого в разі їх використання в дорожньому будівництві виконують спеціальні випробування, суть яких полягає в циклічному заморожуванні-розморозуванні повністю занурених у воду ґрунтових зразків [196, 97].

Не зрозуміло, як це вплине на не укріплений ґрунт. Як наслідок, наступний якісний експеримент полягав у знакозмінному заморожуванні-розморозуванні ґрунтових зразків.

Розглянемо послідовність випробування.

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. 4.1). Властивості ґрунту наведено в табл. 4.1.

2. Після цього їх поміщували в посудину з водою і витримували в ній протягом двох діб (рис. 4.2).

3. Згодом ємність з зануреними у воду ґрунтовими зразками поміщали в холодильну камеру і заморожували за мінусової температури $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4.3).

4. Далі, не виймаючи з води, зразки розморожували.
5. Після кожного циклу розморожування зразки фотофіксували, не виймаючи з води, і візуально аналізували їхній стан (рис. 4.4-4.8).



Рис. 4.1. Польова лабораторія Литвинова ПЛЛ 9. Загальний вигляд



Рис. 4.2. Ґрунтові зразки. Початковий стан (перед зануренням у воду і заморожуванням)



Рис. 4.3. Ґрунтові зразки в замерзлому стані (перший цикл заморожування-розморожування)



Рис. 4.4. Ґрунтові зразки після розморожування (перший заморожування-розморожування)



Рис. 4.5. Ґрунтові зразки після розморожування (другий цикл заморожування-розморожування)



Рис. 4.6. Ґрунтові зразки після розморожування (третій цикл заморожування-розморожування)



Рис. 4.7. Ґрунтові зразки після розморожування (четвертий цикл заморожування-розморожування)



Рис. 4.8. Ґрунтові зразки після розморожування (п'ятий цикл заморожування-розморожування)

Встановлено, із зростанням кількості циклів заморожування-розморожування збільшується кількість і змінюються особливості пошкоджень

зразків (спочатку – деструкція граней, потім – лушення, далі – утворення тріщин, і, нарешті, остаточне руйнування).

Загалом виконані якісні експерименти дали нам змогу зробити висновок, що в цьому разі циклічне заморожування-розморожування ґрунту призвело до повного руйнування ґрунту.

У зв'язку з цим необхідно з'ясувати, як зміняться властивості ґрунту під час його циклічного заморожування і розморожування.

Матеріали цих досліджень подані в розділі 4.1.2.

4.1.2. Міцнісні властивості

Випробовували три виду ґрунту – пісок середньої крупності, суглинок і глина. Властивості ґрунту подано в табл. 4.1.

Міцність визначалася з використанням приладу одноплощинного зсуву (рис. 4.9).

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 0,05, 0,10 і 0,15 МПа.

Циклічне заморожування-розморожування виконувалося відповідно до викладених у розділі 4.1.1 методик.

Таблиця 4.1

Фізичні і механічні властивості ґрунту у вихідному стані

з/п	Назва характеристики	Позначення	Назва ґрунту		
			Пісок середній	Суглинок	Глина
1	Питома вага ґрунтових частин	$\gamma_s, \text{кН/м}^3$	26,2	26,8	27,2
2	Питома вага ґрунту	$\gamma, \text{кН/м}^3$	18,4	17,5	19,3

3	Питома вага сухого ґрунту	$\gamma_d, \text{кН/м}^3$	15,9	14,6	15,6
4	Коефіцієнт пористості	$e, \text{ч.од.}$	0,65	0,84	0,74
5	Вологість на границі розкочування	$W_p, \text{ч.од.}$	–	0,16	0,15
6	Вологість на границі текучості	$W_L, \text{ч.од.}$	–	0,29	0,34
7	Число пластичності	$I_p, \text{ч.од.}$	–	0,13	0,19
8	Коефіцієнт Пуассона	$\nu, \text{ч.од.}$	0,3	0,35	0,42
9	Природний стан				
9.1	Вагова вологість ґрунту	$W, \text{ч.од.}$	0,16	0,20	0,24
9.2	Показник консистенції	$I_L, \text{ч.од.}$	–	0,31	0,47
9.3	Ступінь вологості	$S_r, \text{ч.од.}$	0,65	0,64	0,88
9.4	Кут внутрішнього тертя	$\varphi, \text{град.}$	33,00	19,00	17,00
9.5	Питоме зчеплення	$C, \text{кПа}$	2,00	18,00	45,00
9.6	Модуль деформації	$E, \text{кПа}$	25000,0	11000	18000
10	Водонасичений стан				
10.1	Вагова вологість ґрунту	$W_{,sat}, \text{ч.од.}$	0,25	0,31	0,27
10.2	Показник консистенції	$I_{L,sat}, \text{ч.од.}$	–	1,15	0,63
10.3	Ступінь вологості	$S_{r,sat}, \text{ч.од.}$	1	1	1
10.4	Кут внутрішнього тертя	$\varphi_{,sat}, \text{град.}$	30	18	14
10.5	Питоме зчеплення	$C_{,sat}, \text{кПа}$	2	16	37
10.6	Модуль деформації	$E_{,sat}, \text{кПа}$	24000	8000	15000



Рис. 4.9. Прилад одноплщинного зрізу

За отриманими під час випробувань експериментальними даними будувалися залежності «руйнівне зусилля – кількість циклів. Ці дані подано на рис. 4.10-4.12.

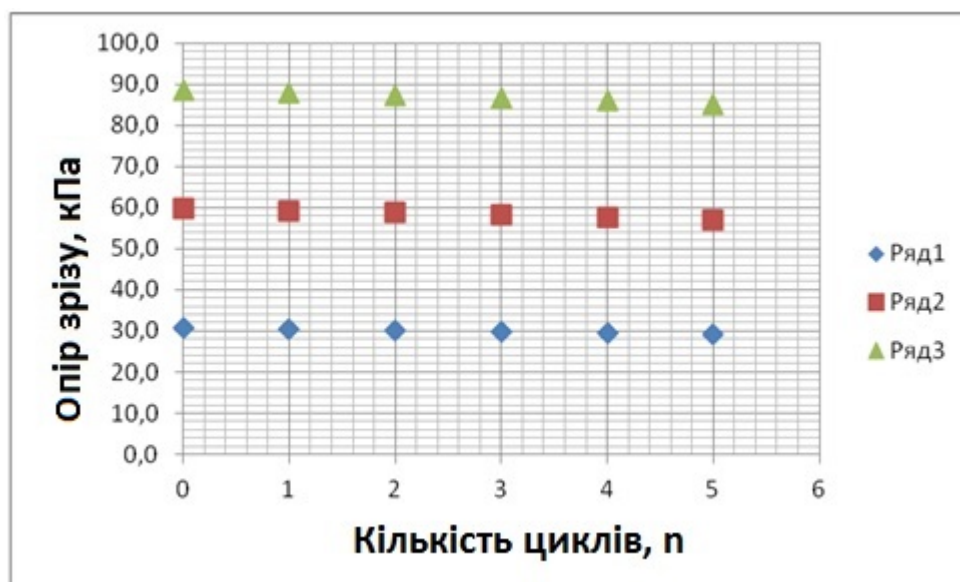


Рис. 4.10. Залежність опору зрізу піску від кількості циклів заморожування-розморожування. Ряд 1 – вертикальний тиск на зразок 50 кПа; ряд 2 – те саме, 100 кПа; ряд 3 – те ж, 150 кПа

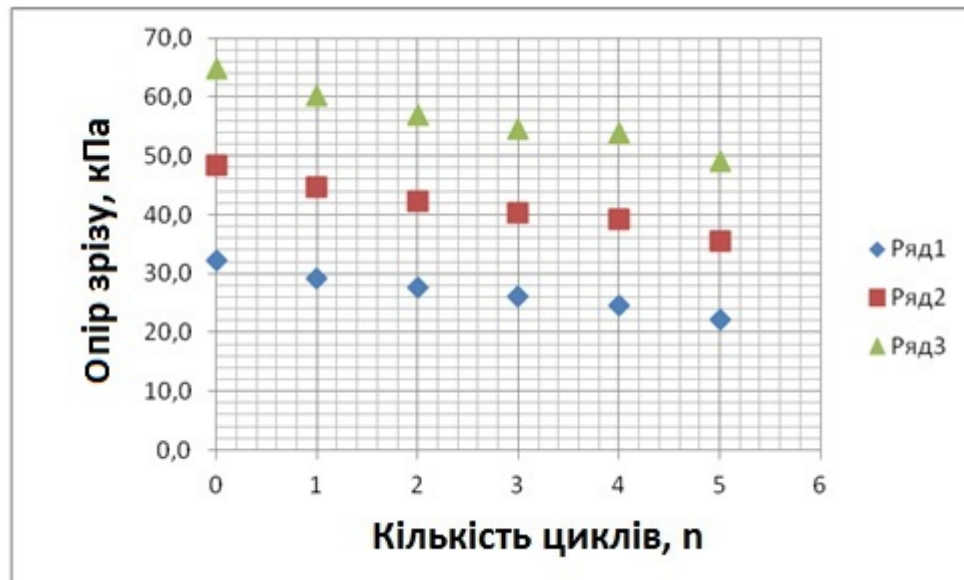


Рис. 4.11. Залежність опору зрізу суглинку від кількості циклів заморозування-розморозування. Ряд 1 – Вертикальний тиск на зразок $\sigma = 50$ кПа; ряд 2 – те саме, $\sigma = 100$ кПа; ряд 3 – те саме, $\sigma = 150$ кПа

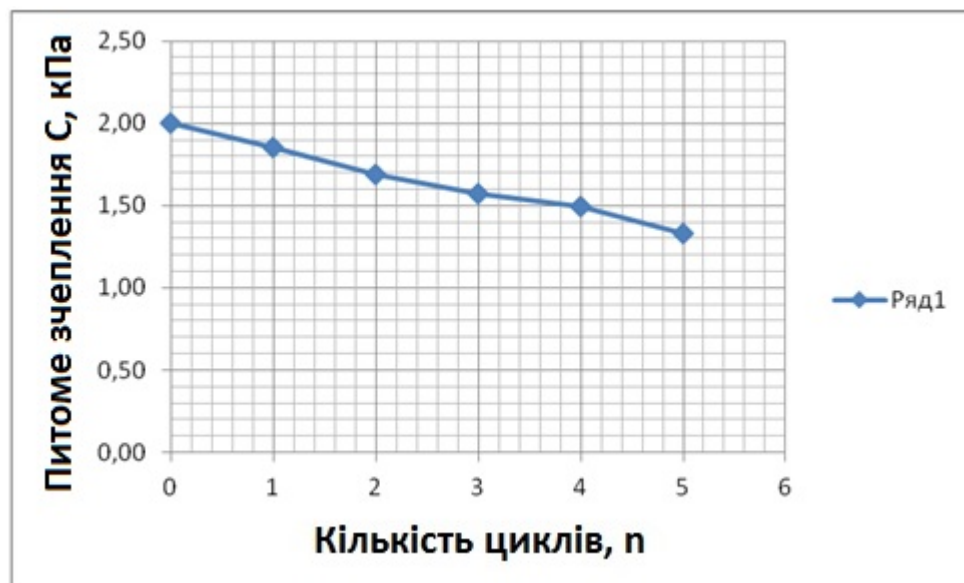


Рис. 4.12. Залежність питомого зчеплення піску від кількості циклів заморозування-розморозування

Після цього експериментальні залежності з використанням методу найменших квадратів апроксимовано експонентними залежностями:

$$\tau_i = a_i \cdot \exp(b_i \cdot n) \quad , \quad (4.1)$$

де τ_i – руйнівний дотичне напруження за середнього тиску на зразок σ_i ; a_i і b_i – емпіричні коефіцієнти; n – кількість циклів. Результати апроксимації наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Результати апроксимації

Назва ґрунту	№ з/п	Тиск σ_i кПа	Емпіричні коефіцієнти		Коефіцієнт кореляції r
			a_i , кПа	b_i , ч.од.	
Пісок	1	50	30,89	-0,011	0,997
	2	100	59,80	-0,009	0,996
	3	150	88,71	-0,008	0,9954
Суглинок	1	50	31,88	-0,07	0,985
	2	100	47,875	-0,057	0,977
	3	150	63,886	-0,051	0,967
Глина	1	50	47,628	-0,08	0,97
	2	100	59,887	-0,07	0,965
	3	150	72,154	-0,063	0,959

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

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg}(\varphi) + c. \quad (4.2)$$

Нормативні значення кута внутрішнього тертя φ і питомого зчеплення c обчислювалися за формулами:

$$\left. \begin{aligned} \Delta &= n \cdot \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \sigma_i \right)^2; \\ c^H &= \left(\sum_{i=1}^n \tau_i \cdot \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot \sum_{i=1}^n \tau_i \cdot \sigma_i \right) / \Delta; \\ \operatorname{tg}(\varphi)^H &= \left(n \cdot \sum_{i=1}^n \tau_i \cdot \sigma_i - \sum_{i=1}^n \tau_i \cdot \sum_{i=1}^n \sigma_i \right) / \Delta \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

Тут $i = 1, 2, 3$ – номер випробування, а n – кількість випробувань, σ_i і τ_i – відповідно нормальне напруження і дотичне руйнівне зусилля в i -му випробуванні.

Результати цих визначень наведено на рис. 4.13-4.18.

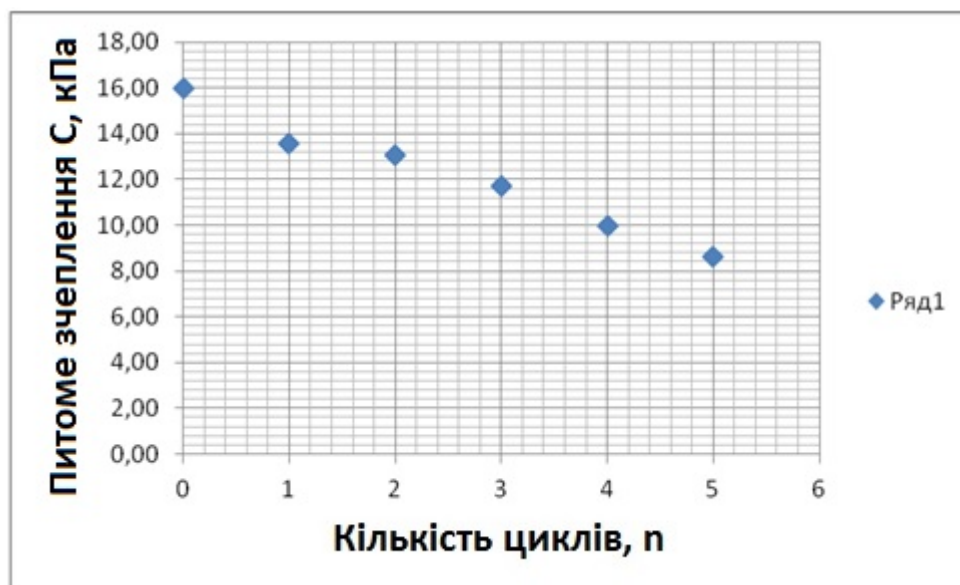


Рис. 4.13. Залежність питомого зчеплення суглинка від кількості циклів заморожування-розморожування

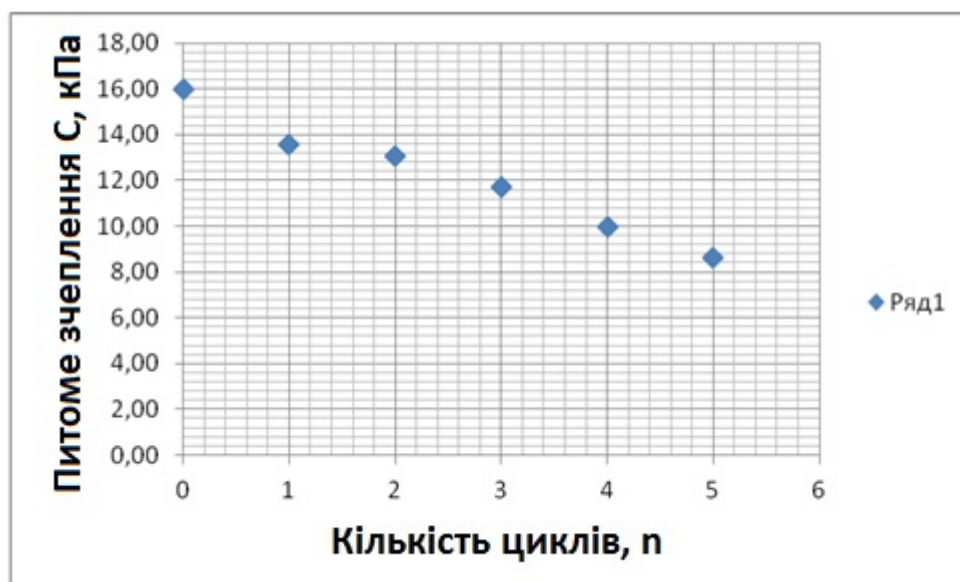


Рис. 4.14. Залежність питомого зчеплення суглинка від кількості циклів заморожування-розморожування

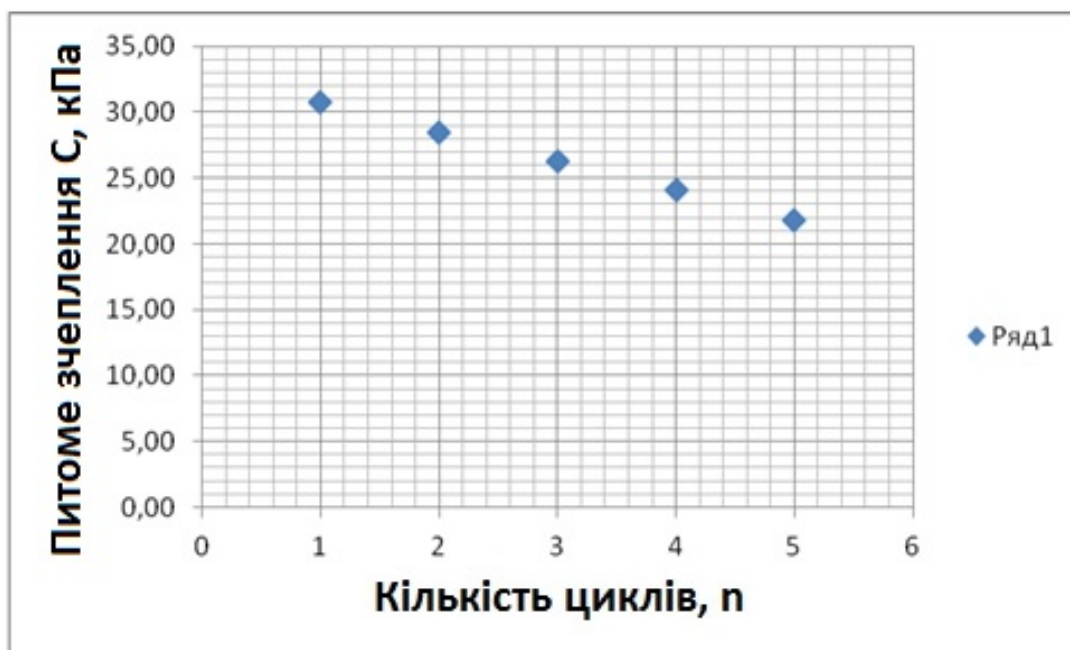


Рис. 4.1.15. Залежність питомого зчеплення глини від кількості циклів заморозування-розморозування

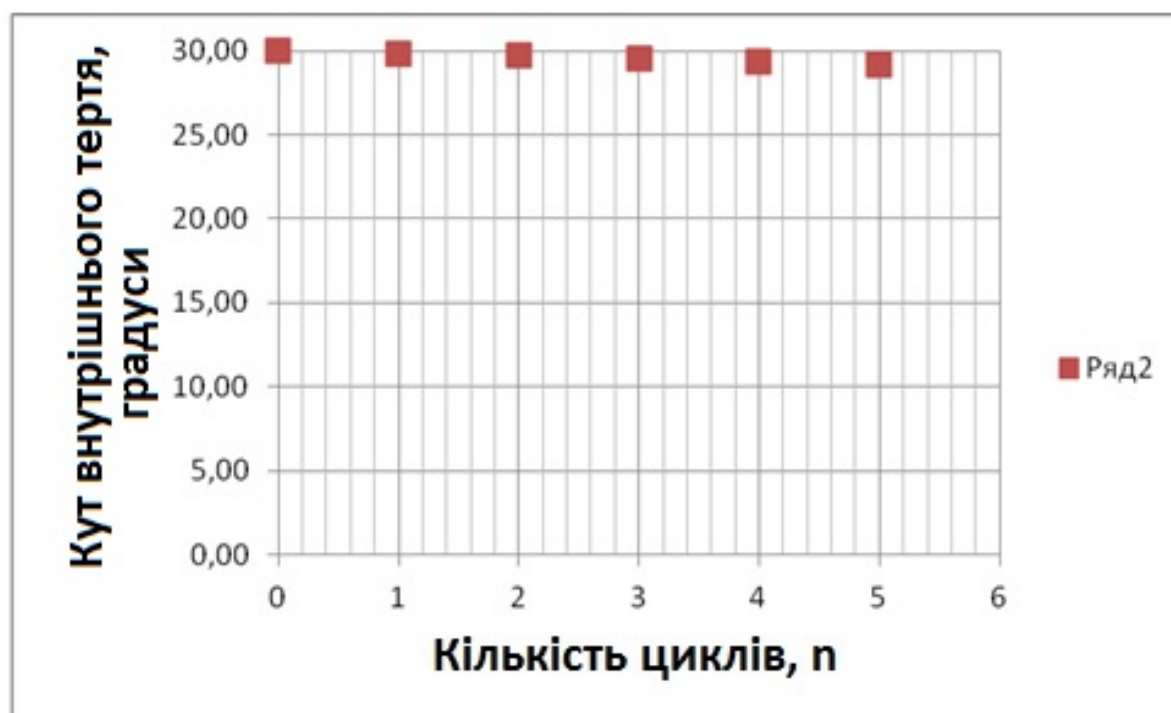


Рис. 4.16. Залежність кута внутрішнього тертя піску від кількості циклів заморозування-розморозування

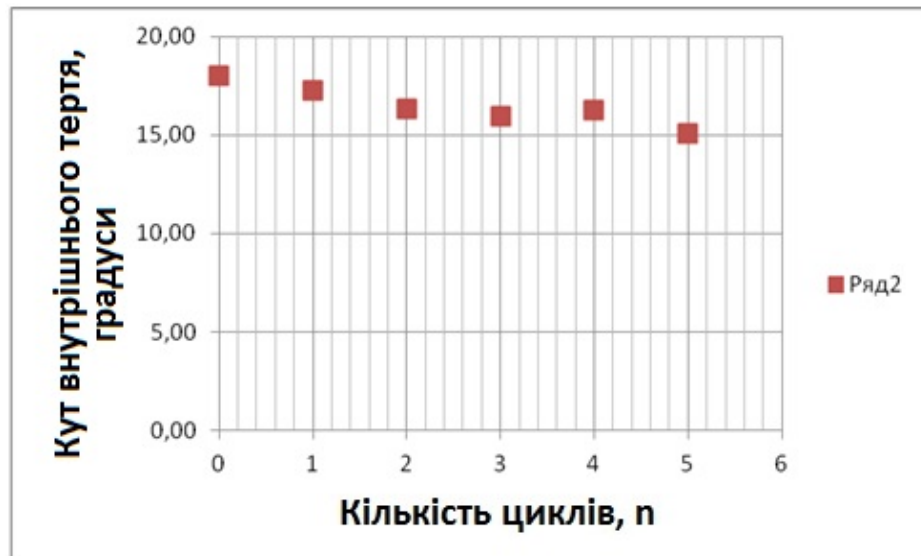


Рис. 4.17. Залежність кута внутрішнього тертя суглинку від кількості циклів заморожування-розморожування

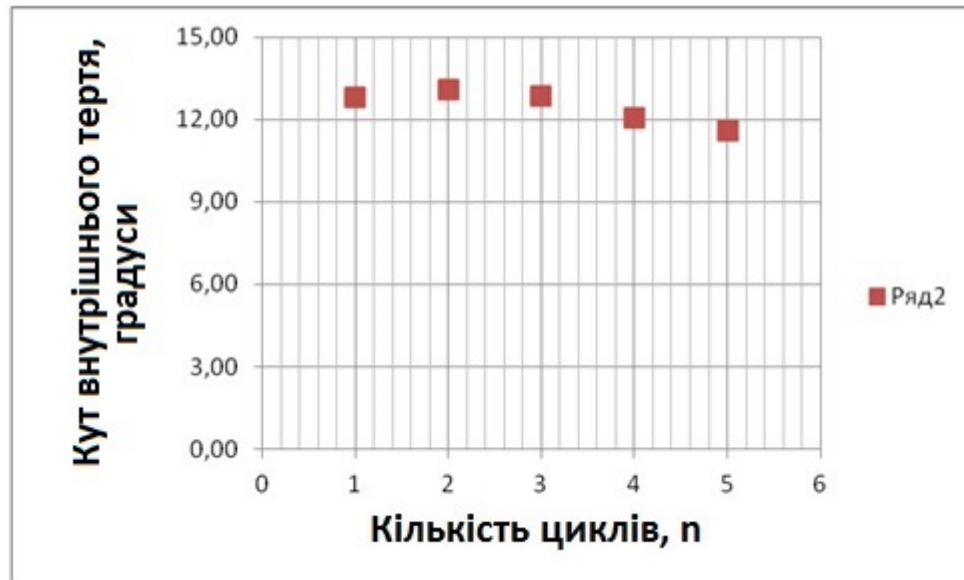


Рис. 4.18. Залежність кута внутрішнього тертя глини від кількості циклів заморожування-розморожування

Для кількісної оцінки поданих на рис. 4.13-4.18 залежностей вони апроксимовані експонентними функціями:

$$\left. \begin{aligned} c &= a \cdot \exp(b \cdot n); \\ \varphi &= e \cdot \exp(d \cdot n); \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

де c – питоме зчеплення; φ – кут внутрішнього тертя; a, b, e і d – емпіричні коефіцієнти; n – кількість циклів заморожування-розморожування.

Емпіричні коефіцієнти a, b, e і d наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Результати апроксимації

Назва ґрунту	Назва характеристики	Емпіричні коефіцієнти				Коефіцієнт кореляції r
		a_i , кПа	b_i , ч.од.	e_i , кПа	d_i , ч.од.	
Пісок	c	2	-0,079	–	–	0,99
	φ	–	–	30,4	-0,006	0,99
Суглинок	c	15,98	-0,117	–	–	0,98
	φ			17,77	-0,031	0,88
Глина	c	33,69	-0,085	–	–	1,00
	φ	–	–	13,58	-0,028	0,76

Викладені у цьому підрозділі матеріали досліджень дали нам зробити такі висновки:

1) циклічне заморожування – розморожування ґрунту призводить до зниження опору його зрізу на 4 % (пісок) – 35 % (глина). Виявлене нами зниження міцнісних характеристик піску знаходиться в межах експериментального розкиду;

2) під час циклічного заморожування-розморожування ґрунту зменшується як кут внутрішнього тертя ґрунту, так і його питоме зчеплення. Найбільший вплив заморожування-розморожування ґрунту чинить на питоме зчеплення.

4.1.3. Деформаційні властивості

Згідно з описаними в літературі даними, під час циклічного заморожування-розморожування супіщаного ґрунту відбувається зниження його модуля загальної деформації до 30 % [208-210].

Незрозуміло, яким чином під час циклічного замороження-розморожування змінюються властивості піщаного, суглинистого і глинистого ґрунтів.

Випробовувалися три види ґрунту – пісок середньої крупності, суглинок і глина. Властивості ґрунту подано в табл. 4.1.

Міцність визначалася з використанням компресійного приладу (рис. 4.19).



Рис. 4.19. Компресійний прилад. Загальний вигляд

Випробування та оброблення експериментальних даних проводили за стандартною методикою, дренавання – за консолідованою схемою [98, 99, 80, 305]. Спочатку визначався компресійний модуль ґрунту, після чого з використанням коефіцієнтів Агішева [305] визначався штамповий модуль загальної деформації.

На рис. 4.20, 4.21 подано результати випробувань піщаного ґрунту, на рис. 4.22, 4.23 – супіщаного, а на рис. 4.24, 4.25 – глинистого.

На рис. 4.21, 4.23 і 4.25 апроксимована ступінь залежності:

$$E = a \cdot \exp(b \cdot n), \quad (4.5)$$

де E – штамповий модуль загальної деформації; a і b – емпіричні коефіцієнти; n – кількість циклів заморозування-розморозування.

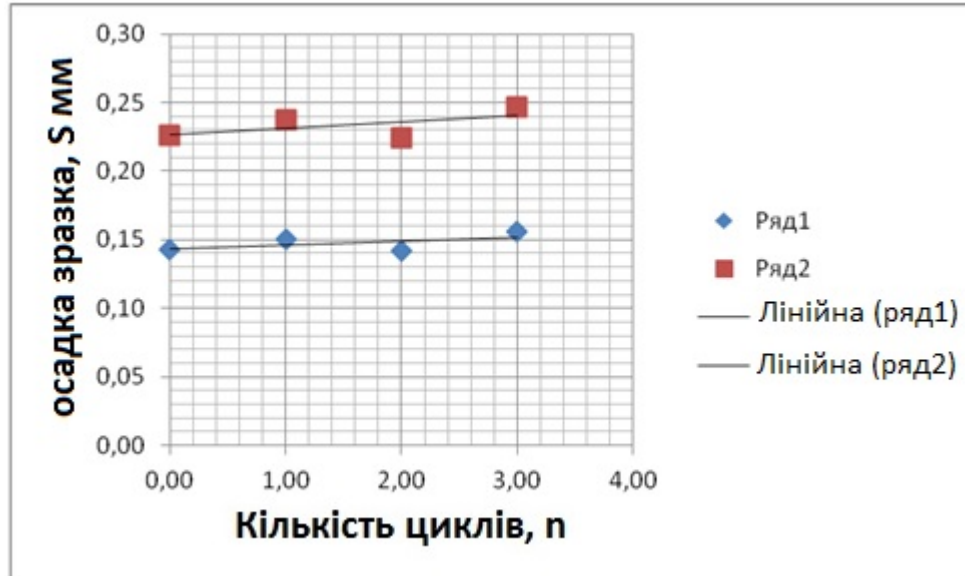


Рис. 4.20. Залежності осідань ґрунтових зразків S з піщаного ґрунту від кількості циклів заморозування-розморозування n . Ряд 1 – тиск на зразок 0,1 МПа; ряд 2 – те ж, 0,2 МПа

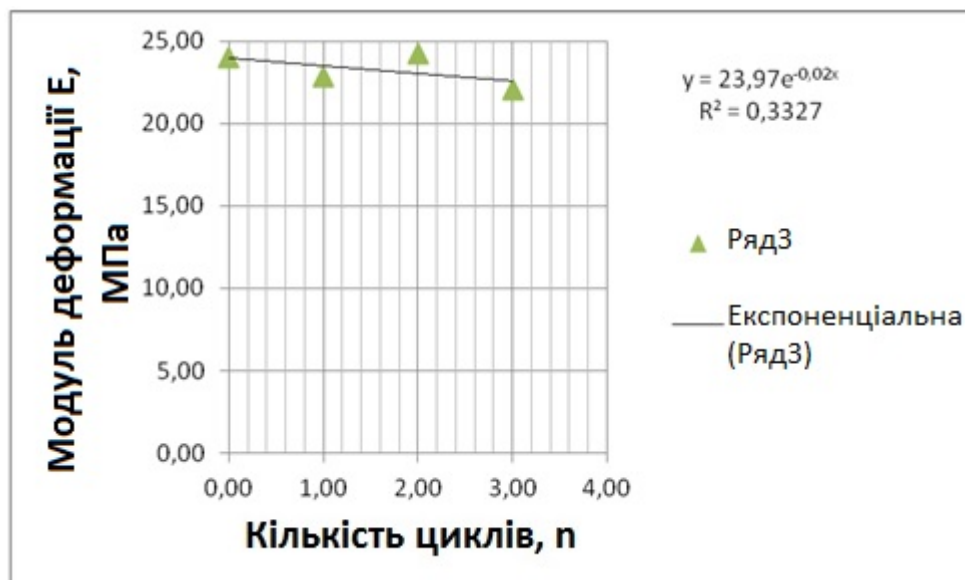


Рис. 4.21. Залежність модуля загальної деформації E піску від кількості циклів заморозування-розморозування n

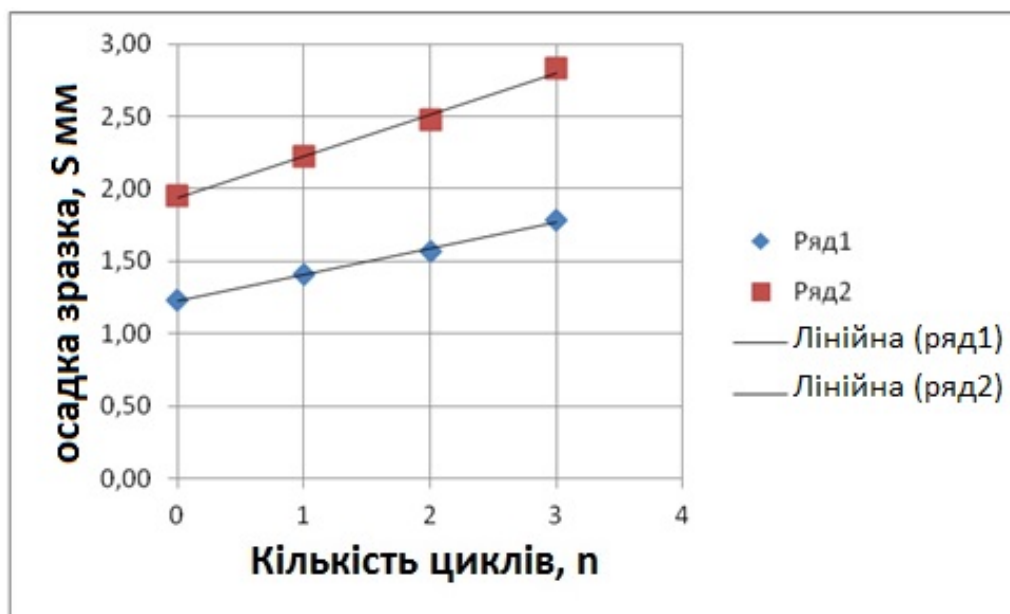


Рис. 4.22. Залежності осідання ґрунтових зразків S з глинистого ґрунту від кількості циклів заморозування-розморозування n . Ряд 1 – тиск на зразок 0,1 МПа; ряд 2 – те саме, 0,2 МПа

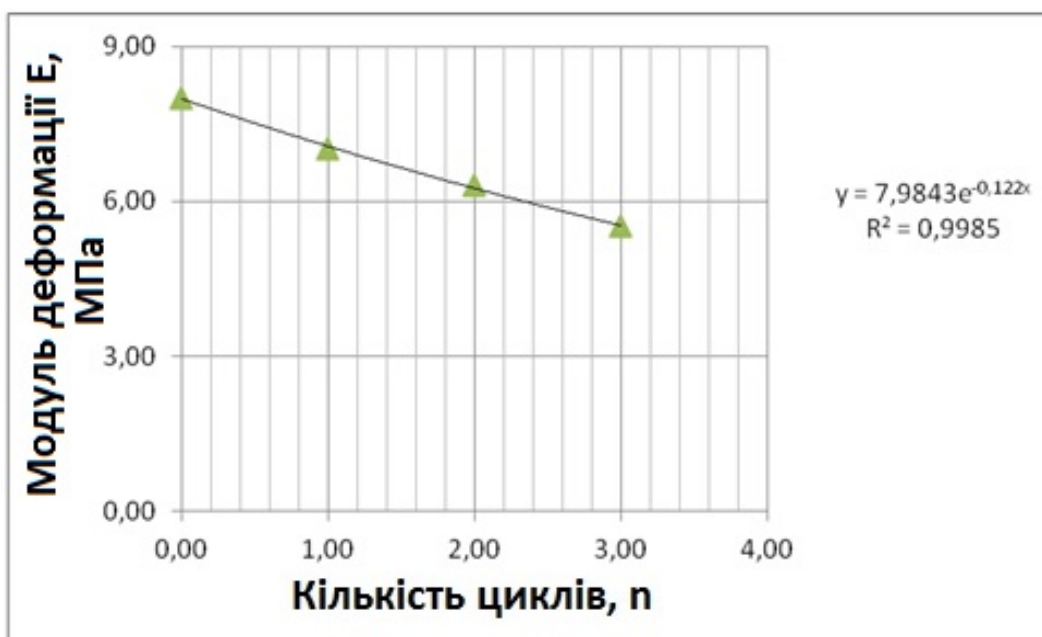


Рис. 4.23. Залежність модуля загальної деформації E суглинку від кількості циклів заморозування-розморозування n

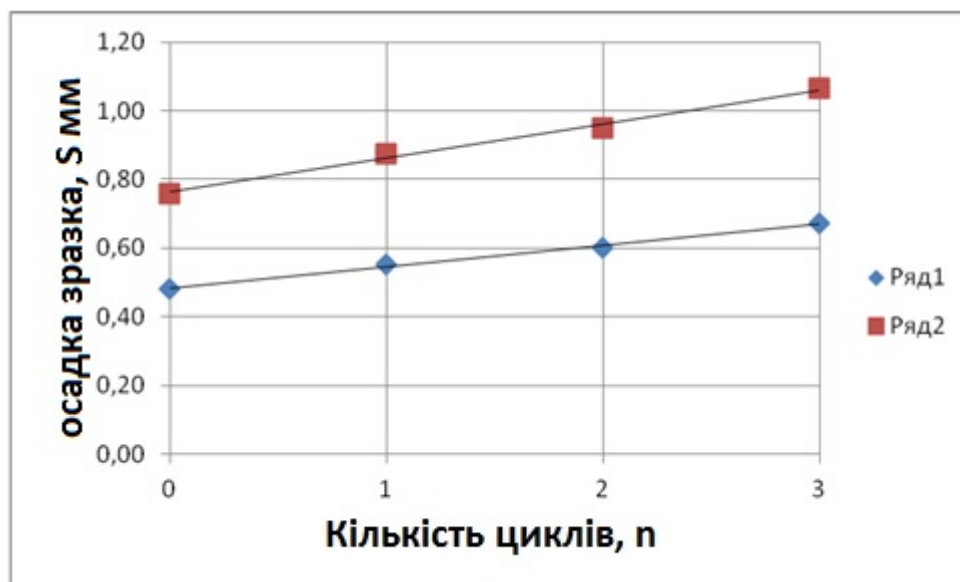


Рис. 4.24. Залежності осідань ґрунтових зразків S з глинистого ґрунту від кількості циклів заморожування-розморожування n . Ряд 1 – тиск на зразок 0,1 МПа; ряд 2 – те саме, 0,2 МПа

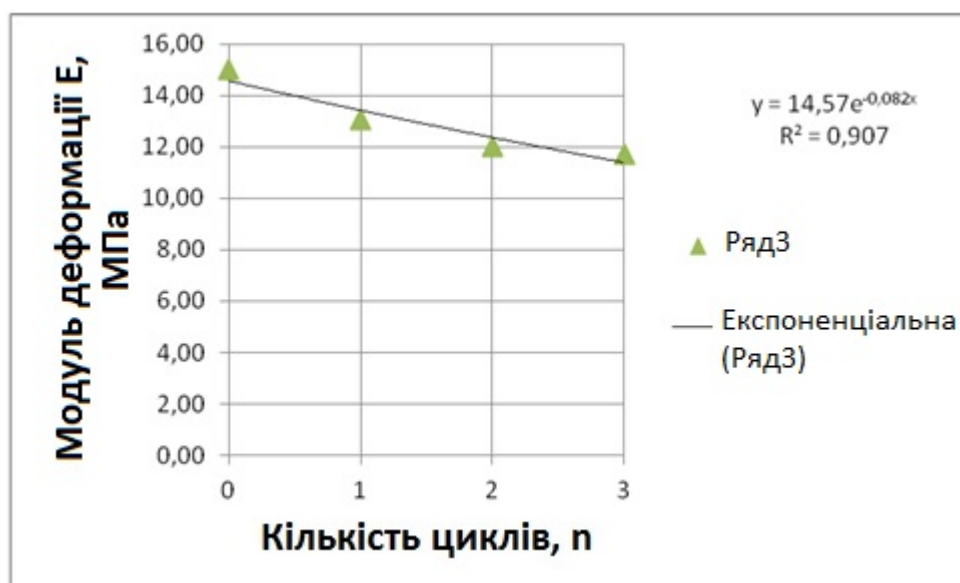


Рис. 4.25. Залежність модуля загальної деформації E глини від кількості циклів заморожування-розморожування n

Вертикальні навантаження на ґрунт дорівнювали 0,10 і 0,2 МПа.

Циклічне заморожування-розморожування виконувалося відповідно до викладеної в розділі 4.1.1 методики.

Результати апроксимації наведені в табл. 4.4.

Результати апроксимації

Назва ґрунту	Емпіричні коефіцієнти		Коефіцієнт кореляції r
	a_i , кПа	b_i , ч.од.	
Пісок	23,97	-0,02	0,58
Суглинок	7,984	-0,122	0,99
Глина	14,57	-0,082	0,95

З таблиці помітно, що найбільше змінюється модуль загальної деформації суглинку.

4.2. Вплив циклічного заморожування-розморозування на міцність і деформаційні властивості бетону

У цьому розділі наведено матеріали результати експериментів, метою проведення яких було виявити, як циклічне заморожування-розморозування бетону впливає на його властивості.

4.2.1. Якісний експеримент

У ґрунтових основах під час роботи теплових насосів виникають температурні поля.

Оскільки коефіцієнт лінійного розширення (КЛТР) полімерів більше від КЛТР бетону на 0,5-2 десяткових порядку (табл. 4.5), а модулі загальної деформації цих матеріалів відрізняються в 1–10 разів, у суміщених фундаментах під час підведення (відведення) з них тепла неминуче виникатимуть температурні напруження і деформації. У зв'язку з цим ставилося завдання виявити, яким чином і наскільки температурні деформації та напруження впливають на утворення тріщин у суміщених конструкціях бетонних і залізобетонних фундаментів теплових насосів.

Модулі початкової деформації і коефіцієнти лінійного розширення бетону і полімерних матеріалів

Назва матеріалу	КЛТР $\times 10^6$, $^{\circ}\text{C}^{-1}$	$E \times 10^{-3}$, МПа
Бетон	10	7–21
Поліамід (РА)	110	20–35
Полівінілхлорид (PVC)	50,4	24–30
Полістирол (PS)	70	30–33
Поліестер	123,5	13–45
Поліетилен (PE)	200	5–10
Фенол – формальдегідні смола	135	80
Епоксидна смола	55	21–55

Експериментальні дослідження виконували спільно з А.С. Фартушним (Дніпропетровський НГУ) у такій послідовності:

1) спочатку за температури навколишнього середовища 20°C виготовлені бетонні зразки з бетону на основі портландцементу. Розміри зразків становили $60 \times 60 \times 400$ мм (рис. 4.26);



Рис. 4.26. Зразки з композитного матеріалу (бетонні балочки з полімерними вкладками; загальний вигляд)

2) у кожному з них була поміщена і закріплена трубка з поліетилену діаметром 30 мм і товщиною стінки 1,5 мм (рис. 4.27);



Рис. 4.27. Розташування полімерної труби в бетонному зразку

3) після набору бетоном проектної міцності, відповідної класу бетону В 12,5, частину виготовлених таким чином зразків (див. п. 4.2.1) нагрівали до температури $+40$ (рис.4.28). Так моделювався випадок перегріву суміщеного фундаменту під час роботи теплового насоса в режимі кондиціонування;



Рис. 4.28. Наскрізні тріщини в зразку з композитного матеріалу після його нагрівання до температури $+40$ °C і охолодження до температури $+20$ °C

4) частина виготовлених відповідно до викладеної вище (див. п. 1.2) методики зразків з композитного матеріалу охолоджувалася до температури $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Так моделювалася ситуація охолодження суміщеного фундаменту під час роботи теплового насоса в режимі опалення (рис. 4.29).

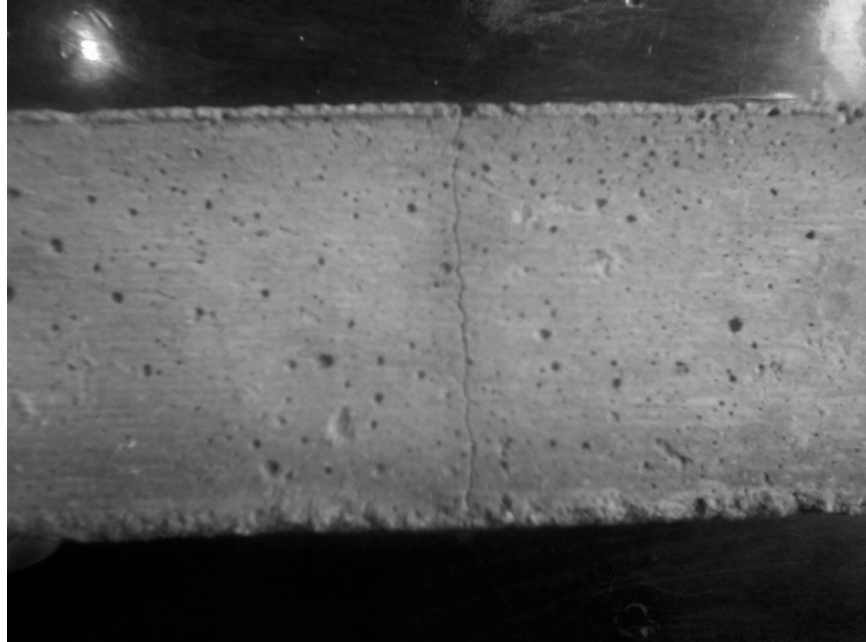


Рис. 4.29. Наскрізні тріщини в зразку з композитного матеріалу після його охолодження до температури $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ і нагрівання до температури $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Всього випробувано 18 зразків (з них 6 штук нагрівали, а 6 штук – охолоджували).

Бетонний зразок був моделлю фрагмента фундаменту, а полімерна трубка, розміщена в зразку, моделювала колектор теплового насоса.

До того ж 6 зразків (зразки-близнюки) не містили полімерної вставки (3 з них нагрівали, а 3 – охолоджували).

Встановлено, що під час нагрівання зразків на $+40$ у випробування зразках утворилися наскрізні тріщини (рис. 4.28).

Аналогічне трапилося під час охолодження зразків з композитного матеріалу (рис. 4.29).

Тріщин у зразках-близнюках не виявлено.

Так експериментально доведено вплив температурних напружень і деформацій на утворення тріщин у виконаних з композитного матеріалу балочках.

Отже, у цьому разі почав руйнуватися бетон і утворилися в ньому тріщини. Цей висновок має практичну цінність у тому сенсі, що під час розташування пластикових колекторів теплових насосів у бетонних фундаментах і елементах будівель і споруд потрібно враховувати додаткові зусилля, які виникають під час роботи теплових насосів.

Інакше кажучи, під час проектування суміщених фундаментів теплових насосів необхідно враховувати додаткові навантаження і впливи, що не враховані у чинних сьогодні нормативних документах.

У підземних конструкціях, у яких розташовані елементи колекторів теплових насосів, дуже часто можуть бути технологічні порожнини.

Якщо ці конструкції розташовані нижче від рівня підземних вод, ці порожнини заповнені водою [81, 82].

Тому під час проведення наступного експерименту (спільно з А. С. Фартушним) ми ставили завдання з'ясувати, як заморожування-розморожування води, яка знаходиться в порожнинах бетонних конструкцій впливає на їхню міцність.

Розглянемо послідовність випробування.

1. Спочатку за температури навколишнього середовища 20 °С виготовлено бетонні зразки з бетону на основі портландцементу. Розміри зразків становили 60×60×400 мм (рис. 4.26).

2. У кожному з них поміщено і закріплено трубку з поліетилену діаметром 30 мм і товщиною стінки 1,5 мм (рис. 4.27).

3. Після набору бетоном проектної міцності, відповідної класу бетону В 12,5, полімерну трубку витягали, а в порожнину поміщували тонку гумову оболонку, заповнену водою.

4. Після цього зразки з розташованої усередині з гумової заповненою водою оболонкою охолоджували до температури -2 до повного заморожування води.

Усього випробувано 12 зразків.

У шести з них містилася оболонка з водою, а шість (зразки-свідки) під час експериментів залишалися з вільною порожниною.

Встановлено, що під час охолодження балочок до -2 в зразках, у порожнинах яких була вода, утворилися наскрізні поздовжні тріщини (рис. 4.30).



Рис. 4.30. Наскрізні тріщини в бетонному зразку, зумовлені заморожуванням води, яка знаходиться всередині порожнини

До того ж у зразках-свідках тріщини не виявлено. Тож заморожування води в порожнинах бетонних конструкцій може призвести до руйнування останніх.

Також відомо, що бетонні конструкції у водонасиченому стані в разі циклічного заморожування-розморожування можуть зазнати деструкції [232].

4.2.2. Міцнісні властивості

У цьому розділі подано матеріали досліджень, спрямовані на вивчення зміни міцності властивостей бетонних зразків у разі їх циклічного заморожування-розморожування.

Експерименти проводили спільно з А.С. Фартушним.

На першому етапі випробувано фрагмент пальового фундаменту з розмірами $400 \times 400 \times 300$ мм з розташованими в ньому полімерними ставками (рис. 4.31).



Рис. 4.31. Досліджуваний фрагмент бетонної конструкції

Обмежені розміри зразка зумовлені розмірами морозильної камери.

Досліди проводилися за такою схемою:

- 1) після набору міцності бетоном визначалася його міцність неруйнівним методом (молотком Кашкарова, табл. 4.6);
- 2) потім протягом 2 діб зразок насичувався водою;
- 3) після цього вироблялося його заморожування протягом 2 діб;
- 4) далі виконувалося розморожування бетонного зразка за кімнатної температури;
- 5) після закінчення кожних 10 циклів випробувань знову визначалася міцність зразка (табл. 4.7).

Таблиця 4.6

Результати визначення властивостей бетону молотком Кашкарова
(початкове визначення)

№ Опр	Діам. відбитка, мм		H=dб/dэ	Ri, МПа	Rн МПа	Sdis, МПа	B МПа	Rb, МПа	Rbt, МПа	E, МПа
	dб	dэ								
1	7,50	2,50	3,00	3,2	19,7	13,2	15,0	8,5	0,8	23000,
2	7,00	4,60	1,52	24,8						
3	8,00	4,00	2,00	14,0						
4	7,40	4,10	1,80	17,1						
5	5,00	4,10	1,22	45,6						
6	8,20	4,00	2,05	13,6						

Таблиця 4.7

Результати визначення міцніших властивостей бетону молотком Кашкарова
(після 10 циклів заморожування-розморозування)

№ опр	Діам. від- битка, мм		H=dб/dэ	Ri, МПа	Rн МПа	Sdis, МПа	B МПа	Rb, МПа	Rbt, МПа	E, МПа
	dб	dэ								
1	8,40	4,10	2,05	13,6	15,5	2,2	10,0	6,0	0,6	18000
2	7,20	4,20	1,71	19,1						
3	8,60	4,10	2,10	13,1						
4	8,30	4,70	1,77	17,8						
5	8,90	4,70	1,89	15,6						
6	9,00	4,50	2,00	14,0						

Усього проведено 120 циклів випробувань.

За їхніми даними побудовано такі залежності:

- 1) залежність нормативної міцності бетону R_n від кількості циклів заморожування-розморожування (рис. 4.32);
- 2) залежність класу бетону B від кількості циклів заморожування-розморожування (рис. 4.33);
- 3) залежність розрахункової міцності бетону на стиск R_b від кількості циклів заморожування-розморожування (рис. 4.34);
- 4) залежність розрахункової міцності бетону на розтяг R_{bt} від кількості циклів заморожування-розморожування (рис. 4.2.35);
- 5) залежність розрахункової модуля загальної деформації від кількості циклів заморожування-розморожування (рис. 4.36).

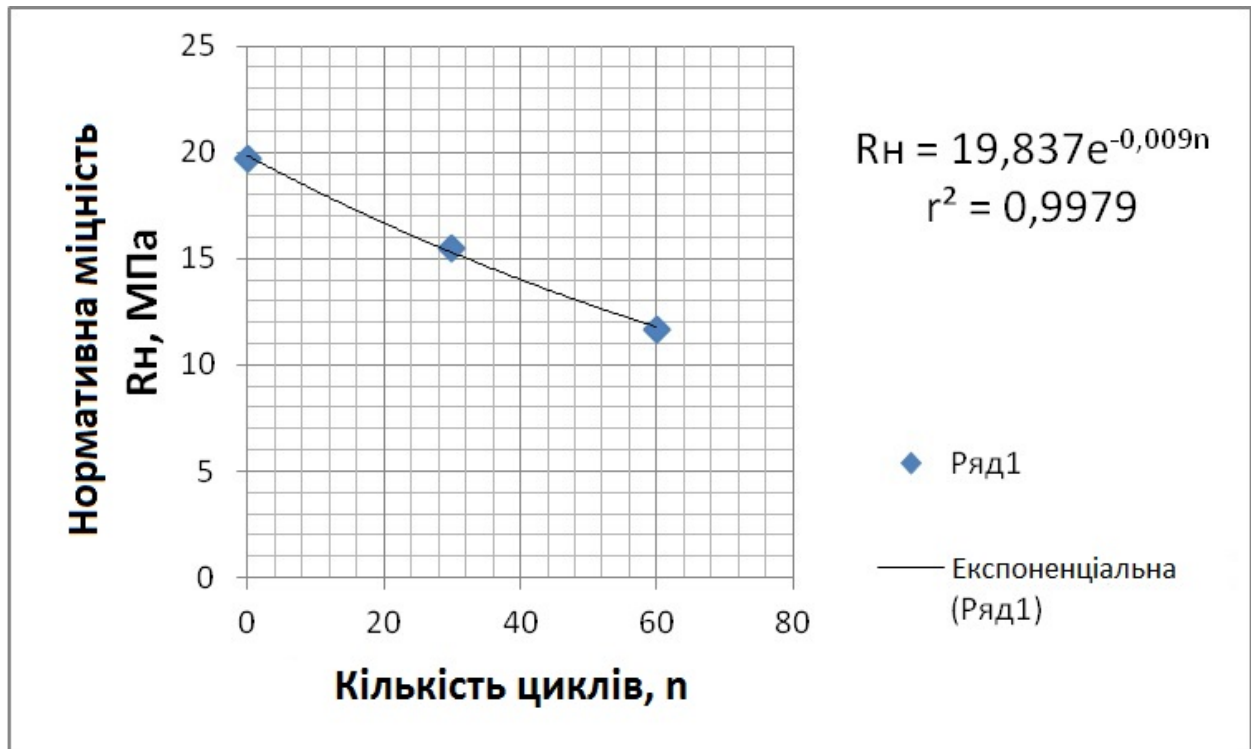


Рис. 4.32. Залежність нормативної міцності бетону R_n від кількості циклів заморожування-розморожування

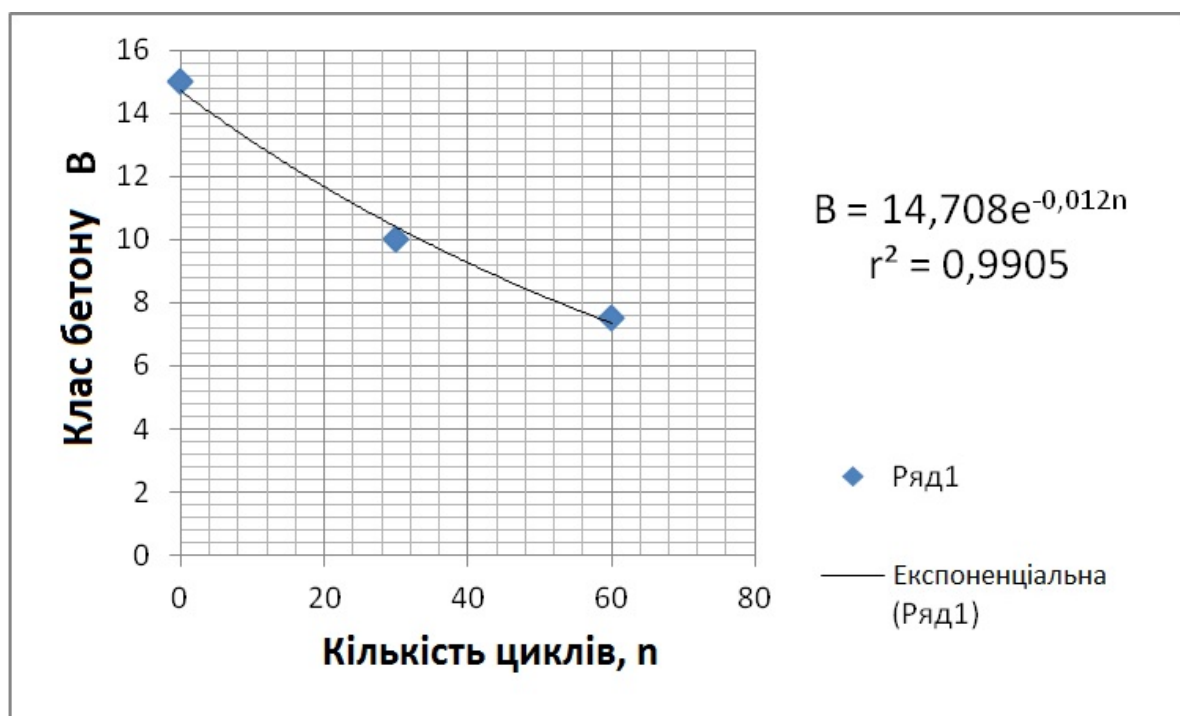


Рис. 4.33. Залежність класу бетону В від кількості циклів заморозування-розморозування

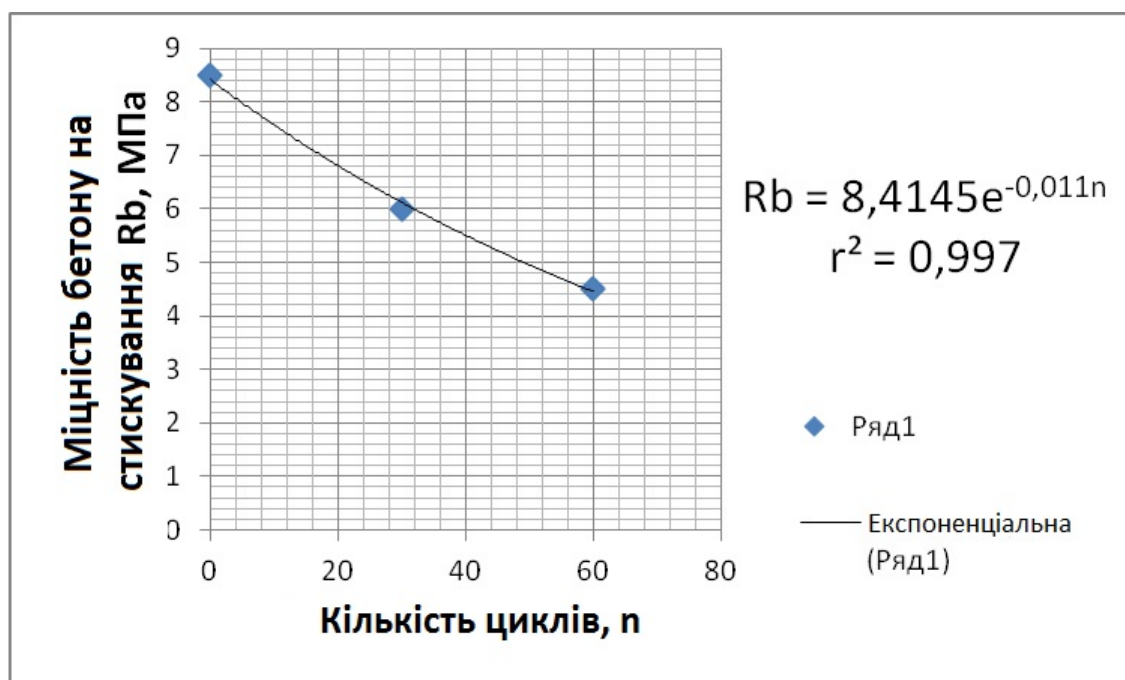


Рис. 4.34. Залежність розрахункової міцності бетону R_b на стиск від кількості циклів заморозування-розморозування

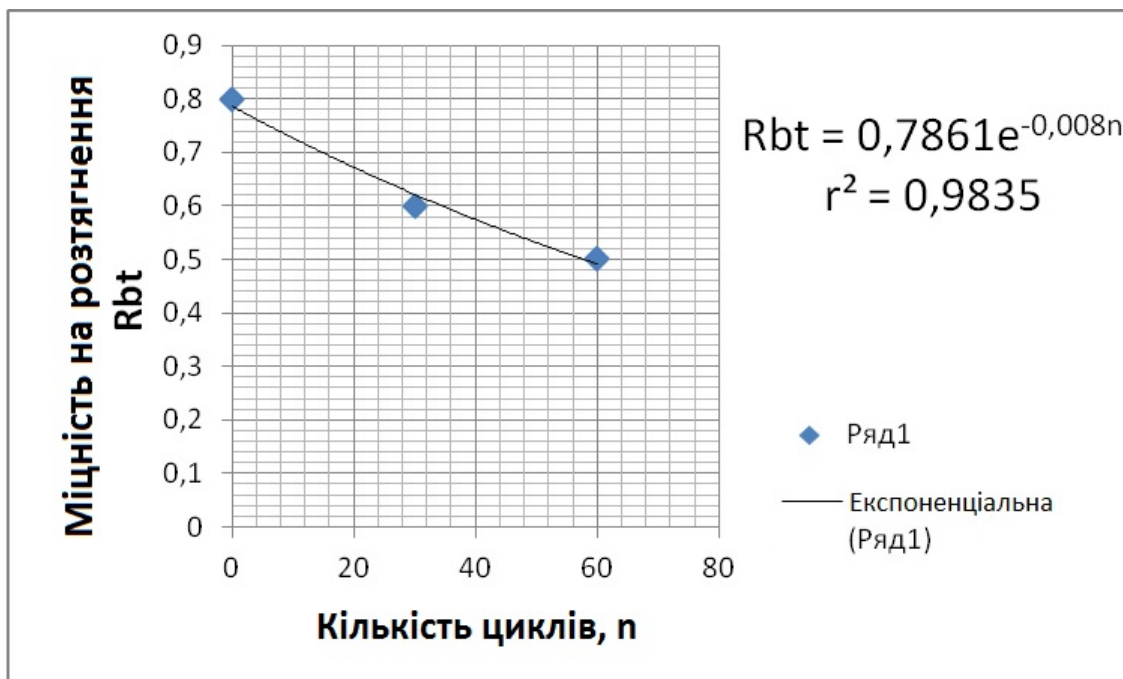


Рис. 4.35. Залежність розрахункової міцності бетону R_b на стиск від кількості циклів заморозування-розморозування

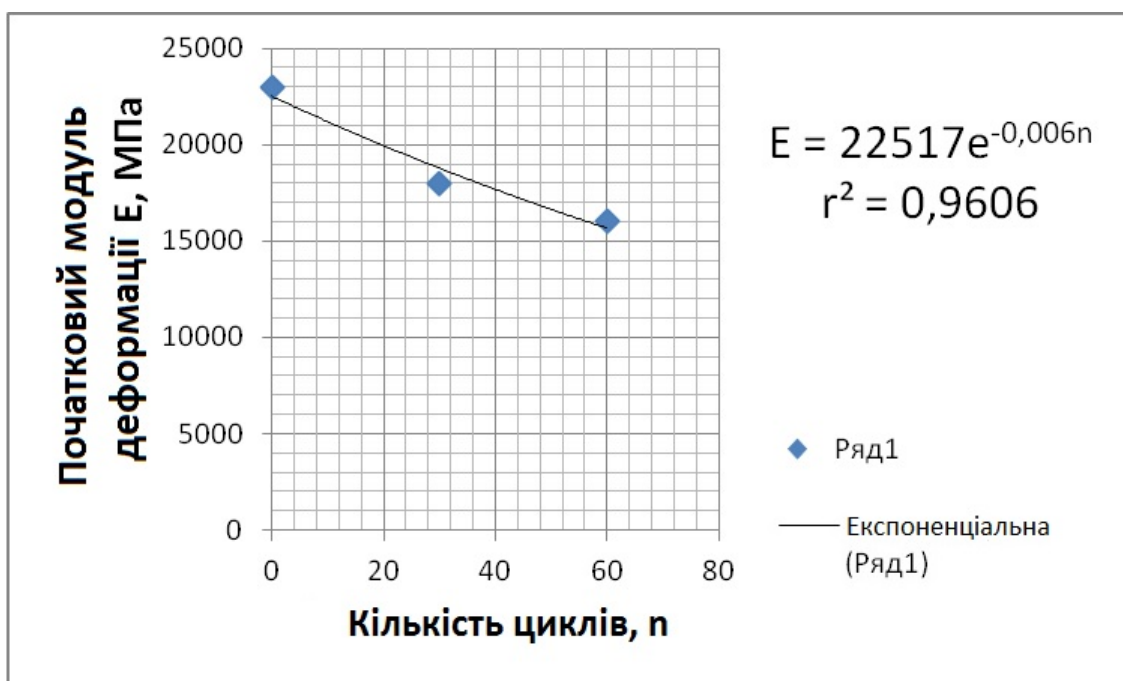


Рис. 4.36. Залежність розрахункового модуля загальної деформації бетону E від кількості циклів заморозування-розморозування

Після цього апроксимовані експериментальні табличні залежності функцією

$$Y = a \cdot \exp(-b \cdot n), \quad (4.6)$$

де Y – що підлягає апроксимації функція (тобто або нормативна міцність, або клас бетону, або його міцність на розтягування тощо.), a і b – емпіричні коефіцієнти; n – кількість циклів заморожування-розморозування.

Встановлено, що всі експериментальні рівняння задовольняють експоненціальні залежності з різними коефіцієнтами при експонентах та подібними показниками експонент (табл. 4.8).

Таблиця 4.8

Результати апроксимації

№	Назва	a	b	r ²
1	R _n	19,837	-0,009	0,998
2	B	14,71	-0,012	0,991
3	R _b	8,42	-0,011	0,997
4	R _{bt}	0,79	-0,008	0,984
5	E	22517	-0,006	0,961

Аналіз наведених у таблиці даних дає змогу зробити висновок про те, що під час циклічного заморожування-розморозування досліджуваного зразка найшвидше знижується клас бетону і його розрахункова міцність на стиск, а найповільніше – його початковий модуль деформації.

Загалом зроблено такі висновки:

1) якщо полімерні колектори теплових насосів розташовані всередині бетонних елементів конструкцій, то під час проектуванні треба враховувати суттєву різницю в значеннях їхніх коефіцієнтів температурного розширення [8, 104];

2) наявність у підземних частинах розташованих нижче від рівня ґрунтових вод підземних конструкцій порожнин може призвести до їх руйнування че-

рез заморожування порової рідини за рахунок відтоку тепла з породи внаслідок теплообміну колектора теплового насоса з основою;

3) у разі циклічного заморожування і розморожування бетону відбувається зниження всіх його експлуатаційних властивостей – нормативної міцності, розрахункової міцності на стиск і розтяг, класу бетону і модуля загальної деформації.

4.3. Визначення несучої здатності моделі пального фундаменту під час циклічного заморожування-розморожування ґрунту

У цьому підрозділі наведені матеріали результати експериментів, під час проведення яких ставилася мета виявити, як циклічне заморожування-розморожування ґрунту впливає на несучу здатність моделей паливних фундаментів. Випробування виконувалися на глинистій пасти за методикою влаштування моделей, які вдавлювалися у ґрунт. Ми також врахували основні вимоги щодо конструювання паливних фундаментів та їх занурення в ґрунт [10, 40, 81, 82, 138, 170, 204, 225, 235, 277, 278].

Властивості ґрунту подано в табл. 4.1.

Випробування проводили в ґрунтовому лотку (рис. 4.37, 4.38). Розглянемо послідовність, у якій їх виконували.

1. Спочатку в ґрунтовий лоток – металевий ящик з розмірами 300×500×600 (рис. 4.37, поз. 1) укладали ґрунтову пасту, виготовлену зі зволоженої і перем'ятої палево-жовтого супіску (рис. 4.37, поз. 2).

2. У ґрунт забивали моделі паль – металеві відрізки труб із закритим нижнім кінцем, довжиною 250 мм і діаметром 24 мм (рис. 4.37, поз. 3). Глибина занурення у всіх випадках дорівнювала 180 мм.

3. Після цього в такому стані ґрунтовий лоток витримувався протягом 6 місяців за постійного зволоження ґрунту для утворення структурних зв'язків і набору ґрунтом структурної міцності [36, 37, 39, 41, 216, 247].

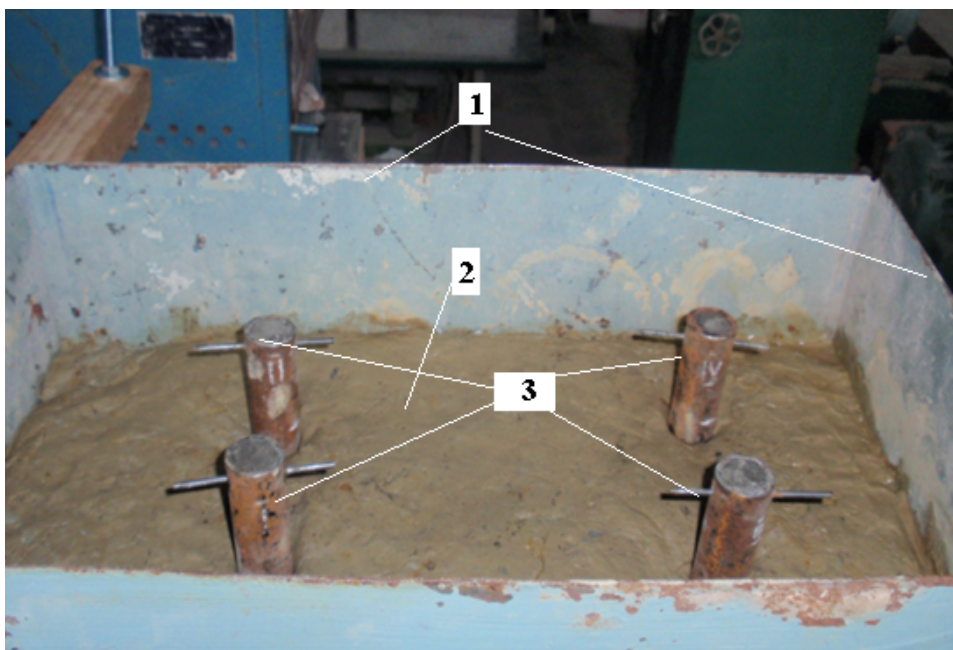
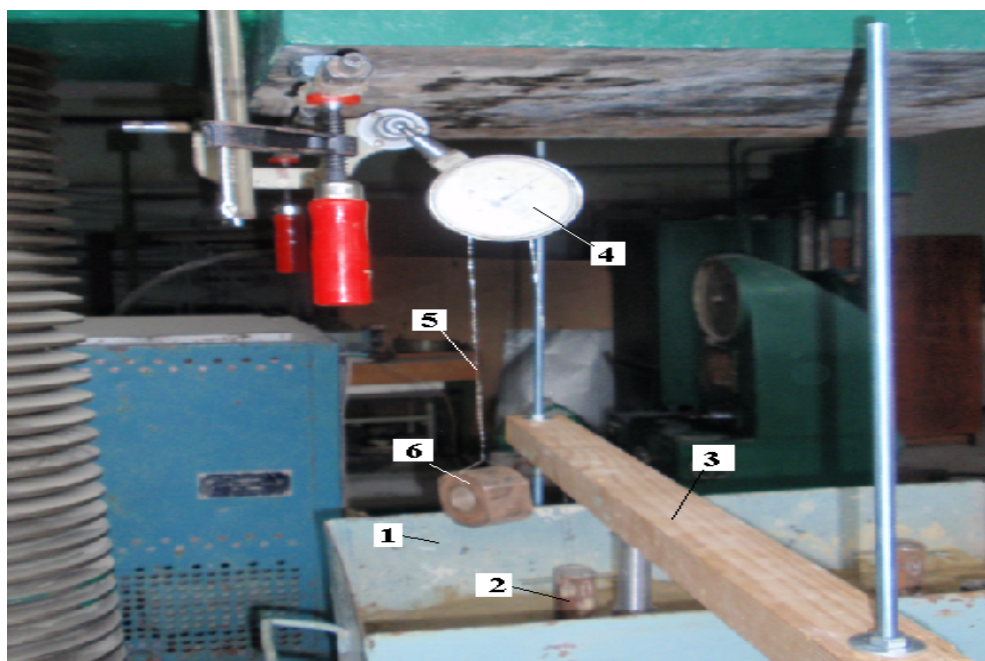


Рис. 4.37. Експериментальна установка (фото): 1 – ґрунтовий лоток; 2 – ґрунт; 3 – моделі паль

4. Після цього виконували випробування двох перших моделей паль і визначали середнє значення їх несучої здатності (рис. 4.38).



4.38. Експериментальна установка (схема): 1 – ґрунтовий лоток; 2 – палля; 3– пристрій для передавання навантаження на палю; 4 – прогиномір; 5 – струна; 6 – вантаж

Навантаження на палі передавалася через спеціальний завантажувальний пристрій (рис. 4.38, поз. 3).

Осідання моделей паль визначалися з використанням зразкового прогину міру 6 ПАТ Лісі (рис. 4.38, поз. 4).

5. Після цього лоток з двома випробуваними палями поміщали в морозильну камеру і витримували в ній протягом 7 діб за температури $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Далі лоток поміщали в приміщення з кімнатною температурою і витримували в такому стані 7 діб, після чого визначали несучу здатність паль (рис. 4.39-4.40).

6. Після цього виконували два цикли заморожування-розморожування (п. 4 і 5 цього підрозділу) і знову визначали несучу здатність моделей паль (рис. 4.41).

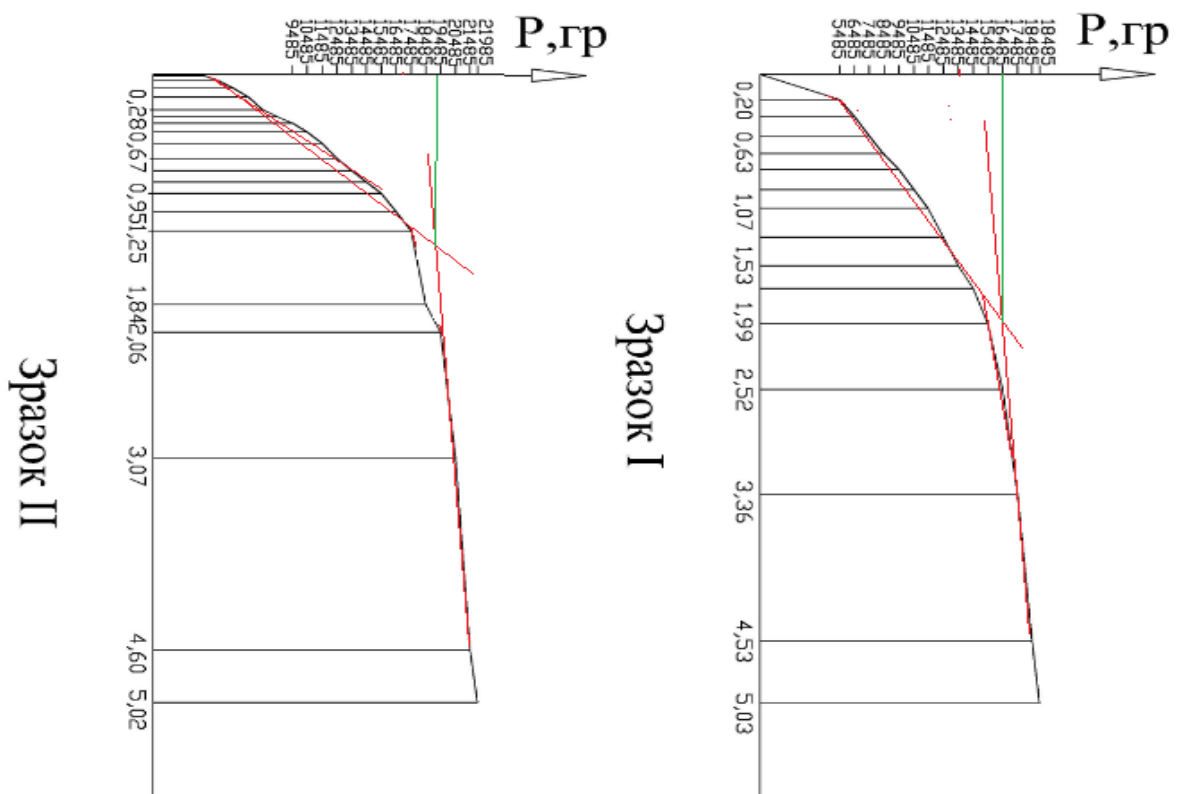


Рис. 4.39. Результати випробування моделей паливих фундаментів. Середня несуча здатність палі $F_d = 180\text{ Н}$

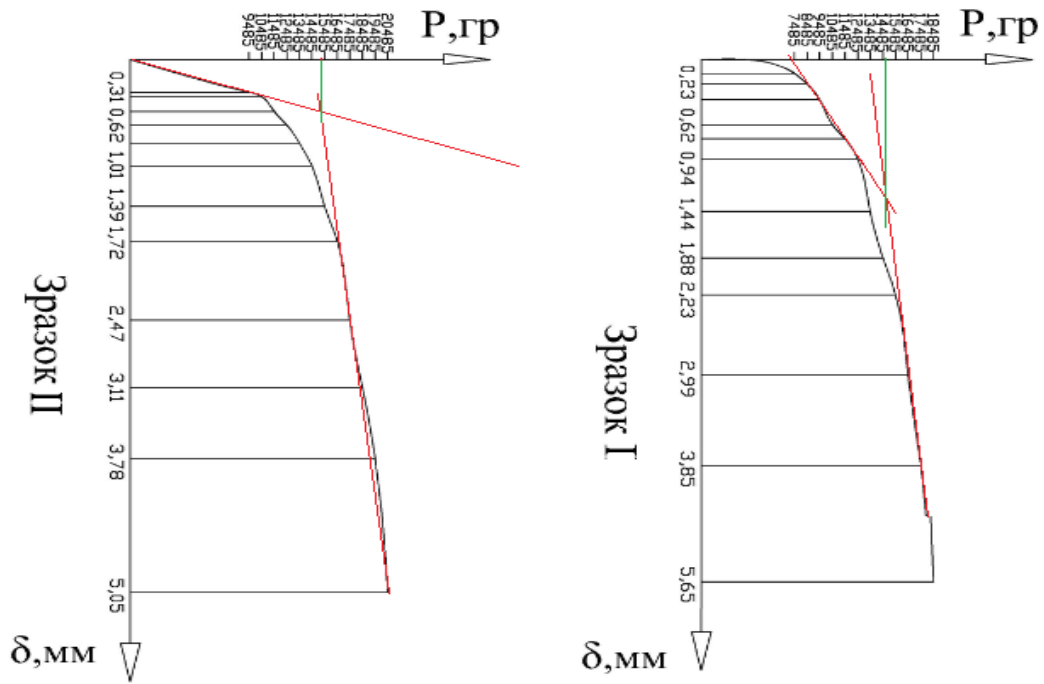


Рис. 4.40. Результати випробування моделей пальових фундаментів. Середня несуча здатність палі $F_d = 154,5$ Н

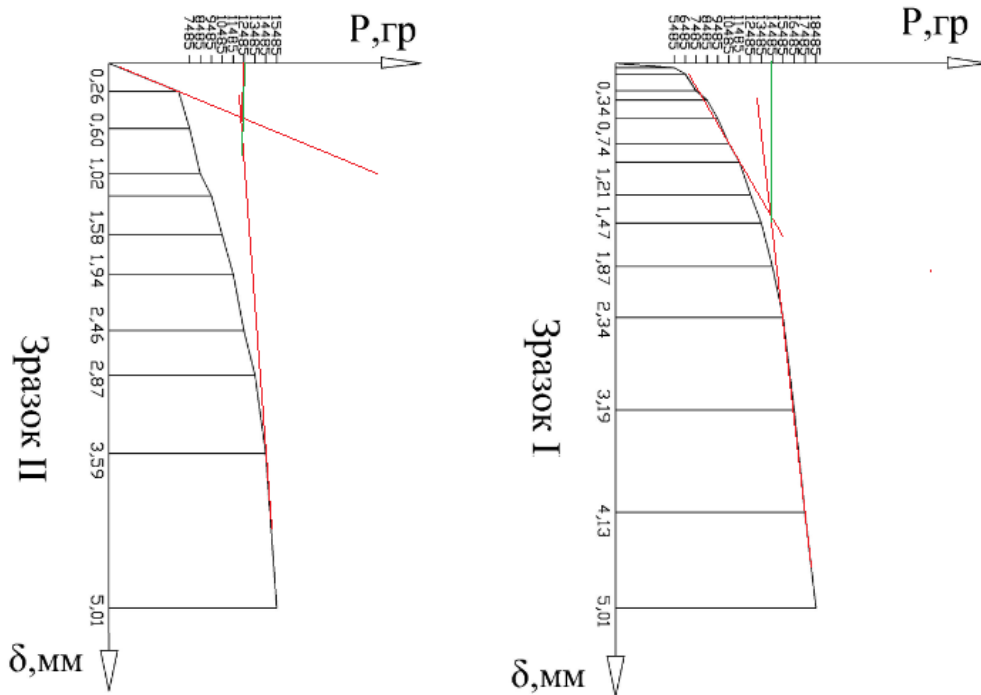


Рис. 4.41. Результати випробування моделей пальових фундаментів. Середня несуча здатність палі $F_d = 134$ Н

Залежність несучої здатності моделей пальових фундаментів від кількості циклів заморожування-розморожування ґрунту подано на рис. 4.42.

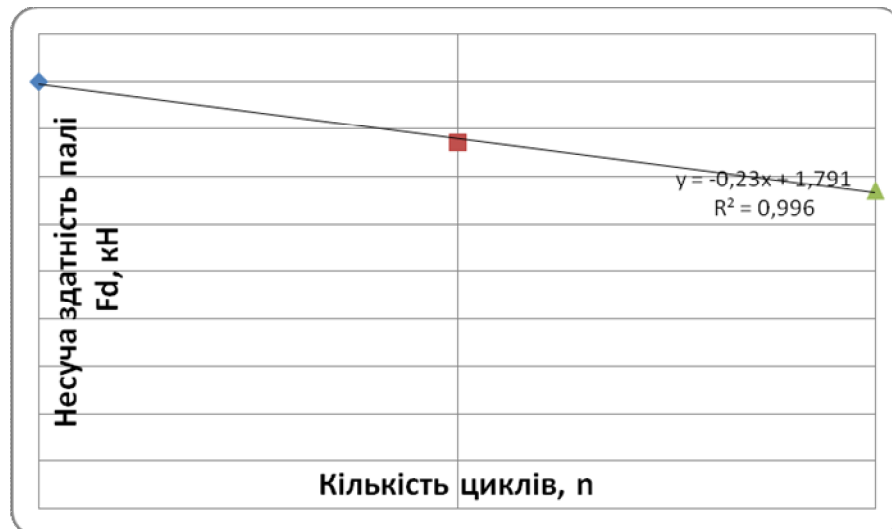


Рис. 4.42. Залежність несучої здатності моделей пальових фундаментів від кількості циклів заморожування-розморожування ґрунту

З рисунка зрозуміло, що циклічне заморожування-розморожування ґрунту призводить до зниження несучої здатності моделей пальових фундаментів.

4.4. Вплив деформацій, зумовлених морозним здиманням, на деформації розташованих на ґрунтовій основі будівель і споруд

Під час написання цього підрозділу була мета визначити значення додаткових деформацій основи у разі морозного здимання ґрунту, яке можливе під час роботи теплових насосів у режимі опалення. Для цього використано теорію подібності [230].

Упродовж експериментальних досліджень, виконаних спільно з А. С. Фартушним, ми розглянули будівлю на суцільній фундаментній плиті, розташованій на основі, в якій відбувається заморожування-розморожування ґрунту, зумовлене роботою ґрунтового теплового насоса (рис. 4.43).

Ділянка основи, в якій відбувається заморожування-розморожування порової рідини, моделювалася з використанням заповненої водою і ґрунтом елас-

тичною ємністю, стінки якої практично не чинять опір надмірному внутрішньому тиску (рис. 4.44).

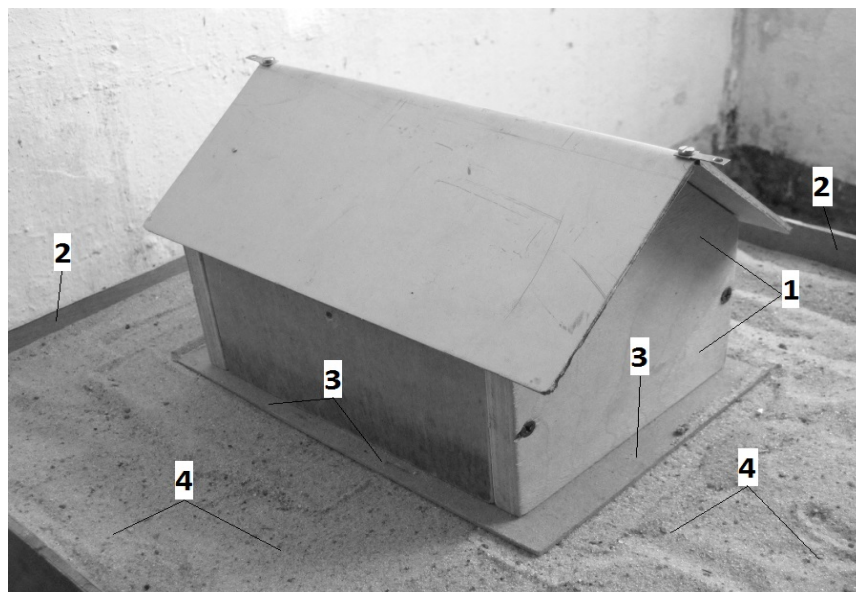


Рис. 4.43. Схема випробувань: 1. – модель будівлі; 2 – ґрунтовий лоток; 3 – плитний фундамент; 4 – ґрунтова основа

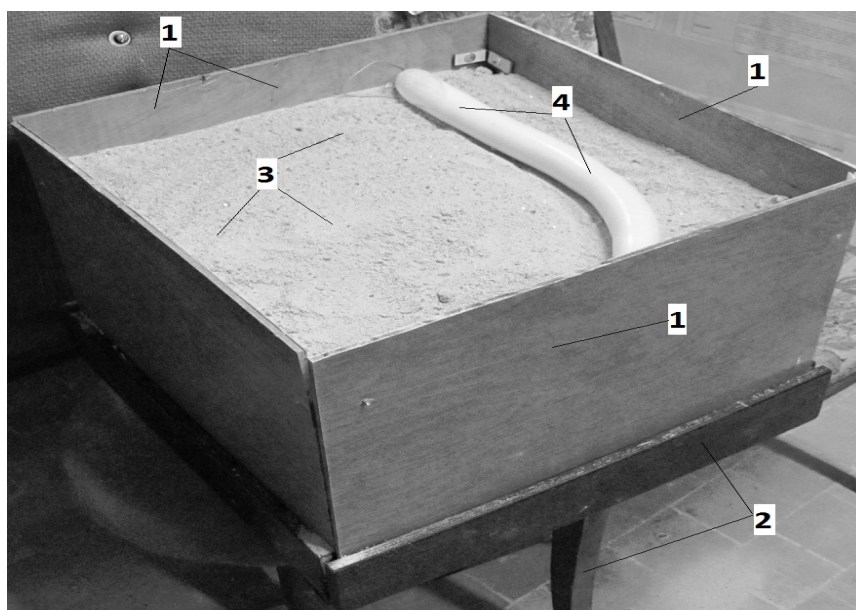


Рис. 4.44. Підготовка основи до випробування: 1 – ґрунтовий лоток; 2 – станина; 3 – ґрунтова основа; 4 – заповнена ґрунтом і водою гумова оболонка

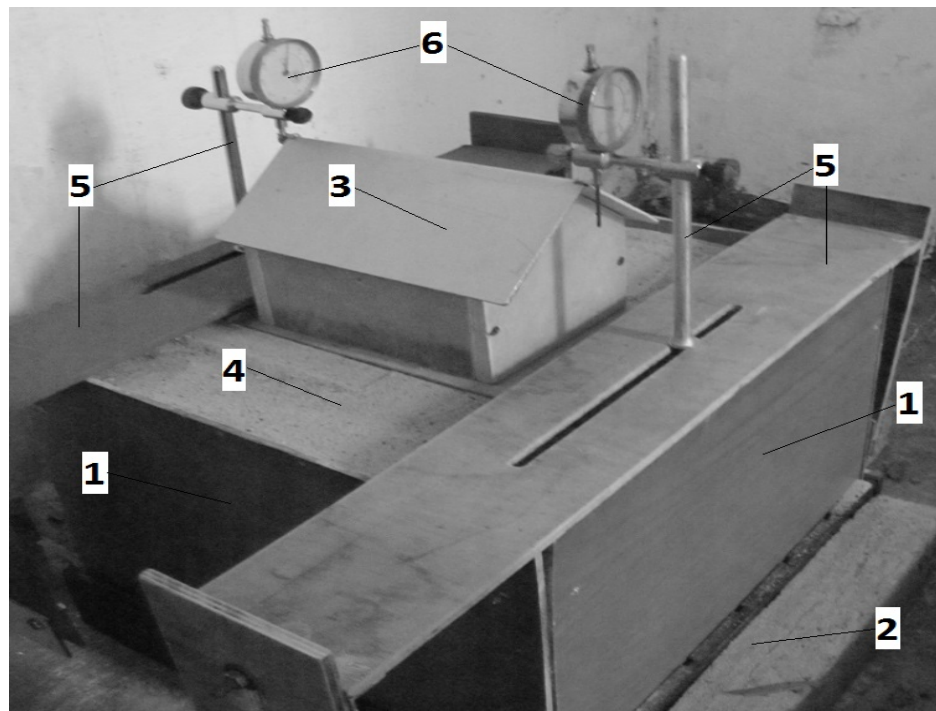


Рис. 4.45. Схема вимірювання переміщень: 1 – ґрунтовий лоток; 2 – станина; 3 – будинок; 4 – ґрунтова основа; 5 – реперна система; 6 – індикатори переміщення годинникового типу

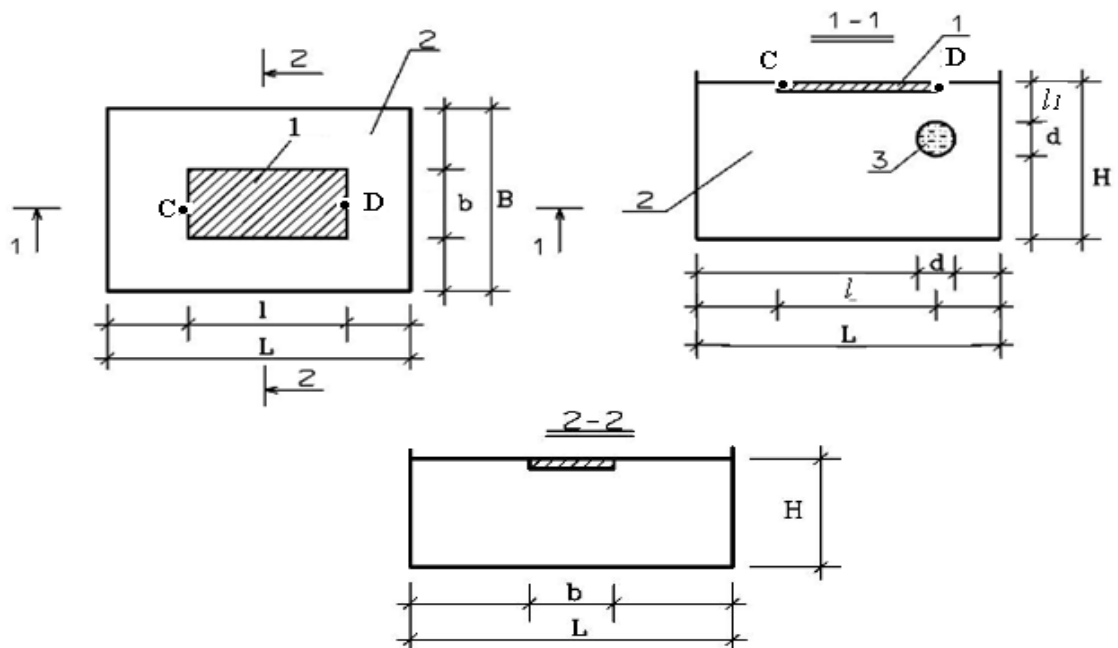


Рис. 4.46. Схема системи «ґрунтовий лоток – основа – фундамент». Примітка: на цій схемі немає розмірів надфундаментної будови

Вертикальні переміщення моделі будівлі вимірювали використанням за допомогою індикаторів переміщень годинного типу, які кріпилися до спеціальної реперної системи (рис. 4.45).

Схема ґрунтового лотка з розташованим на ґрунтовій основі будівлею наведена на рис. 4.46.

Випробування виконували в ґрунтовому лотку з розмірами в плані 40×40 см і заввишки 30 см у такій послідовності:

1) спочатку підготовлено піщану основу до позначки залягання підосви ділянки, що замерзає і розмерзає внаслідок роботи теплового насоса ділянки (рис. 4.43);

2) далі в основу укладалася заповнена ґрунтом і водою гумова оболонка зі стінками, які слабо чинять опір внутрішньому тиску (рис. 4.43);

3) після цього основа нарощувалася до проектної позначки і на неї встановлювалася модель споруди, виконана з водостійкої фанери і полімерного композитного матеріалу (рис. 4.44);

4) для вимірювання вертикальних переміщень моделі будівлі використано спеціальну реперну систему (рис. 4.45);

5) далі модель будівлі поміщено в сухе середовище з температурою повітря -14 °С. Замерзання води в гумовій ємності призвело до морозного здимання основи і як наслідок – вертикального переміщення точок «С» і «D», розташованої на ній моделі будівлі. Ці переміщення вимірювалися через 7 діб після розміщення експериментальної установки в кліматичній камері;

6) після цього температура піднімалася до значення $+20$ °С; в такому стані модель споруди витримували протягом 7 діб і знову вимірювали вертикальні переміщення точок «С» і «D».

У табл. 4.9 подані властивості ґрунтової основи і деякі характерні розміри системи «основа-фундамент».

Під час аналізу результатів експерименту використано елементи теорії розмірностей [230].

Ми розглядали безрозмірні π -комплекси:

$$\left. \begin{aligned} \pi_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i \cdot k_i \cdot h_i}{W} = \frac{\varepsilon_1 \cdot k_1 \cdot d_{\text{обл}}}{W}; \quad \pi_2 = \frac{d_{\text{обл}}}{b}; \\ \pi_3 = \frac{l}{b}; \quad \pi_4 = \frac{l_1}{b}. \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

де π_1, \dots, π_4 – безрозмірні Пі – комплекси; W – зумовлений заморожуванням (розморожуванням) ґрунту підйом (осідання) основи; ε_i – відносна деформація шару ґрунту, зумовлена його заморожуванням (розморожуванням); h_i – його товщина; $k_i = 0,6, \dots, 0,8$ – коефіцієнт умов роботи; $d_{\text{обл}}$ – ефективний діаметр замерзлої ділянки ґрунту; l і b – відповідно довжина і ширина подошви фундаменту; l_1 – відстань від подошви фундаменту до верху замерзлої ділянки основи.

Розраховані з використанням зазначених у табл. 4.9 даних Пі-комплекси наведено в табл. 4.10.

Для фундаментної плити шириною 7 м з урахуванням формул (4.7) і наведених у табл. 4.10 даних розраховано зумовлені заморожуванням-розморожуванням ґрунтової основи її деформації (табл. 4.11). Виявилось, що підйом і осідання основи змінюються в діапазоні 3 – 138 мм.

Подані в табл. 4.9 дані використано для визначення деформацій, зумовлених заморожуванням-розморожуванням реальних ґрунтових основ.

Отож розглянемо зроблені висновки.

1. Робота ґрунтових теплових насосів призводить до циклічного заморожування розморожування ґрунтових основ. Це, своєю чергою, призводить до підйому (під час заморожування порової рідини) та осідання (під час розморожування парової рідини), розташованих на цій основі фундаментів.

Вихідні дані

№	Назва характеристики	Позначення	Од. вим.	Значення
1	Модуль деформації основи	E	МПа	2,02
2	Ступінь вологості водонасиченої ділянки основи	S_r	ч. од.	0,02
3	Ступінь вологості водонасиченої ділянки основи	S_r	ч. од.	0,99
4	Довжина підошви фундаменту	l	м	0,22
5	Ширина підошви фундаменту	B	м	0,18
6	Діаметр замерзає (розмерзає) ділянки	$d_{обв}$	м	0,03
7	Відстань від верху замерзає ділянки до підошви фундаменту	l_1	м	0,04
8	Підйом точки «С» у разі заморожування	$S_{з,А}$	$м \cdot 10^{-3}$	1,32
9	Підйом точки фундаменту «D» під час заморожування	$S_{з,В}$	$м \cdot 10^{-3}$	0,07
10	Осідання точки фундаменту «С» у разі розморожування	$S_{о,А}$	$м \cdot 10^{-3}$	1,25
11	Осідання точки фундаменту «D» у разі розморожування	$S_{о,В}$	$м \cdot 10^{-3}$	0,12

Таблиця 4.10

Діапазон зміни Пі-комплексів

№ з/п	Значення π -комплексів	
1	π_1	0,90–34,32
2	π_2	0,17
3	π_3	1,22
4	π_4	0,22

Результати моделювання

№ з/п	Назва характеристики	Розрахункова формула	Одиниця вимірювання	Значення
1	Ширина підшви фундаменту	-	м	7
2	Довжина підшви	$l = \pi_3 \cdot b$	м	8,54
3	Діаметр замерзлої ділянки	$d_{\text{обл}} = \pi_2 \cdot b$	м	1,19
4	Відстань від покрівлі замерзлого ґрунту до підшви фундаменту	$l_1 = \pi_4 \cdot b$	м	1,55
5	Підйом (або осідання) плитного фундаменту	$W = \frac{\varepsilon_1 \cdot k_1 \cdot d_{\text{обл}}}{\pi_1}$	мм	4–138

2. Зумовлені роботою ґрунтового теплового насоса підйом і осідання плитного фундаменту моделі становлять 138 мм. Ці значення мають один порядок з граничними допустимими деформаціями ґрунтових основ [89, 311].

Тому деформації, зумовлені заморожуванням-розморожуванням порової рідини основ, у яких розташовані колектори ґрунтових теплових насосів, необхідно враховувати під час проектування основ фундаментів будівель і споруд.

Як підсумок варто зазначити, що в чинній на території України нормативній базі під час проектування не враховують явище морозного здимання, зумовленого роботою теплових насосів.

4.5. Аналіз результатів досліджень

Під час написання цього підрозділу ми формували завдання дати кількісну оцінку викладених у розділах 4.1-4.3 матеріалів досліджень.

Для цього використовуємо формулу:

$$\Delta = \left. \left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{Y_0 - Y_i}{Y_0} \right| \cdot 100\%; \\ i = 0, \dots, n \end{array} \right\} \right. \quad (4.8)$$

де Δ – відносна похибка між значеннями параметрів; Y_0 – значення параметра встановленого за відсутності заморожування-розморозування; Y_i – те саме, встановлене на i -му циклі заморожування-розморозування; n – кількість циклів.

На рис. 4.47 і 4.48 наведено залежності (4.8), розраховані для міцності піщаного, на рис. 4.49 і 4.50 – для суглинистого, а на рис. 4.51 і 4.52 – для глинистого ґрунту. З рисунків випливає, що циклічне заморожування-розморозування ґрунту слабо впливає на кут його внутрішнього тертя. Питоме зчеплення зменшується до 30 %.

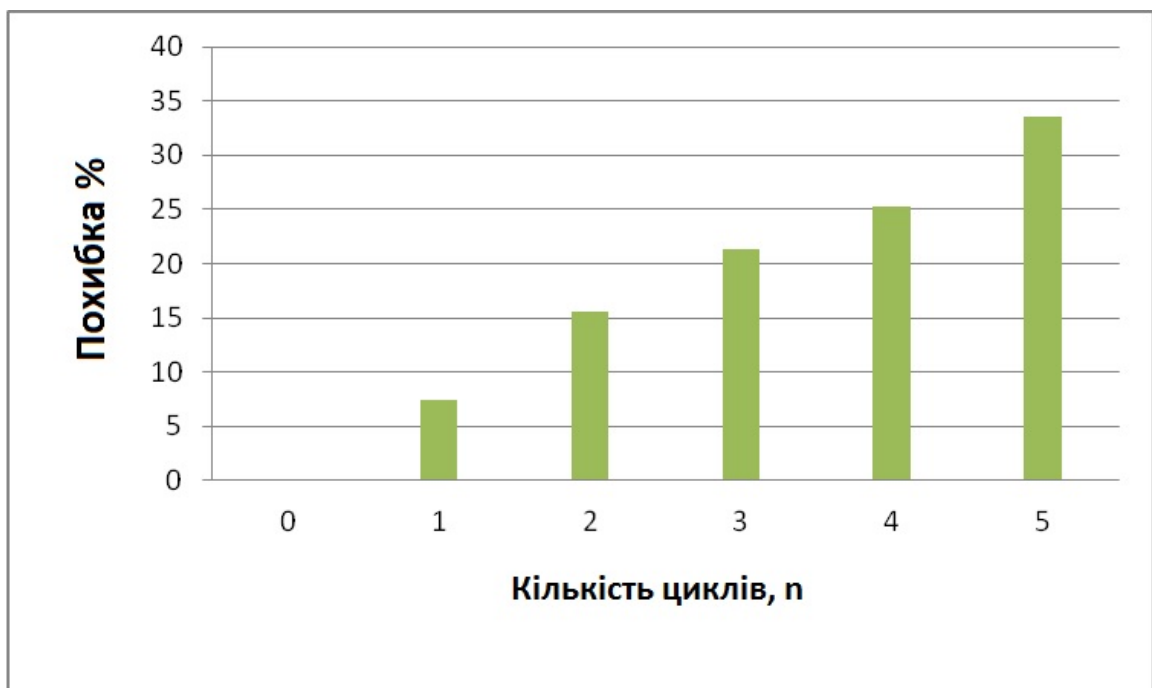


Рис. 4.47. Відносна похибка між питомим зчепленням піщаного ґрунту, випробуваного за відсутності заморожування-розморозування, і питомим зчепленням, встановленим під час циклічного заморожування-розморозування ґрунту

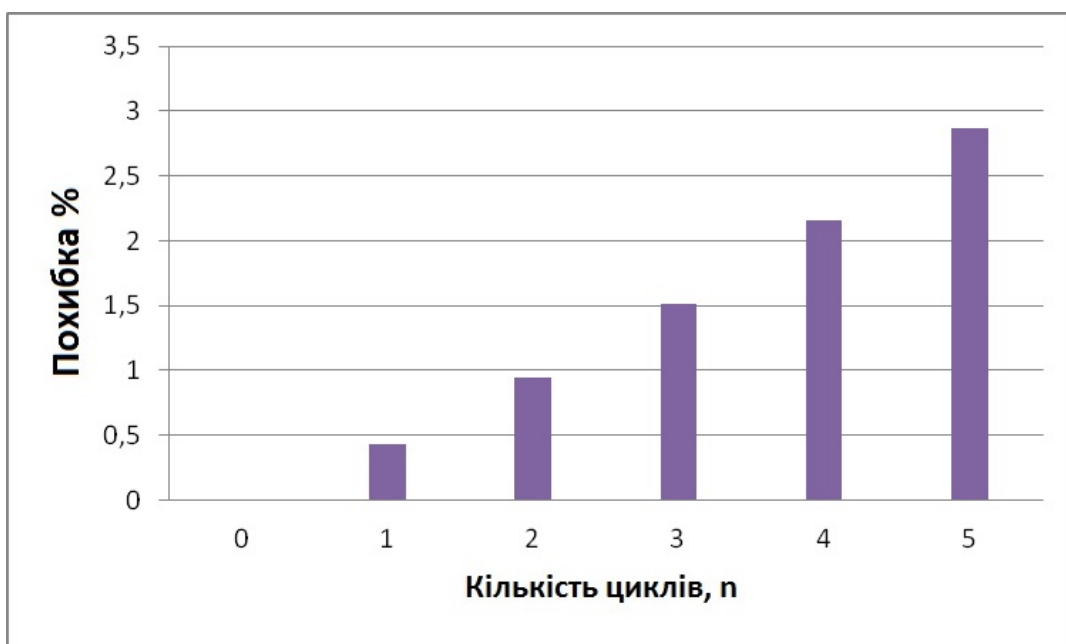


Рис. 4.48. Відносна похибка між кутом внутрішнього тертя піщаного ґрунту, випробуваного за відсутності заморожування-розморозування, і кутом внутрішнього тертя, встановленого під час циклічного заморожування-розморозування ґрунту

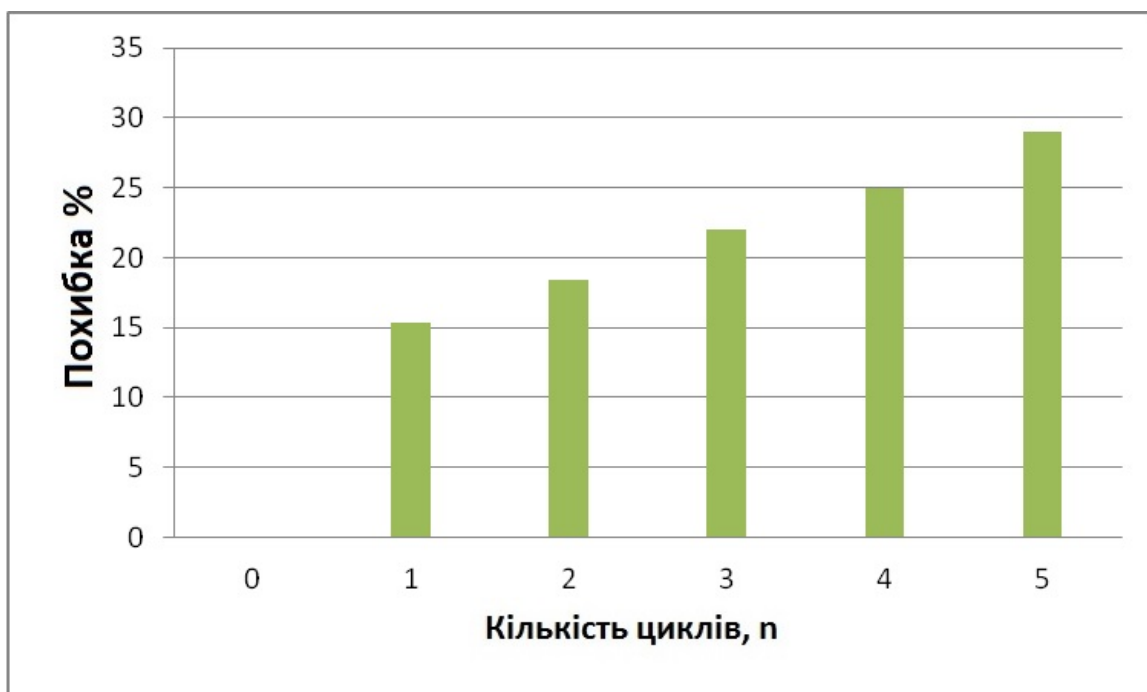


Рис. 4.49. Відносна похибка між питомим зчепленням суглинку, випробуваного за відсутності заморожування-розморозування, і питомим зчепленням, встановленим під час циклічного заморожування-розморозування ґрунту

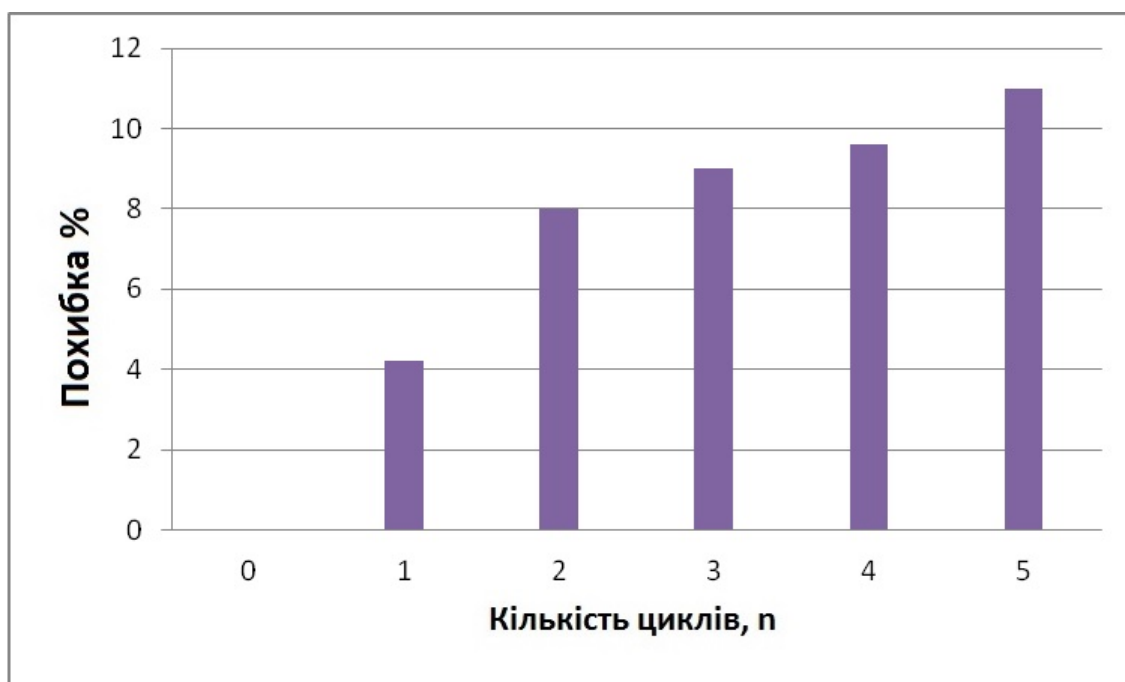


Рис. 4.50. Відносна похибка між кутом внутрішнього тертя суглинку, випробуваного за відсутності заморожування-розморожування, і кутом внутрішнього тертя, встановленого під час циклічного заморожування-розморожування ґрунту

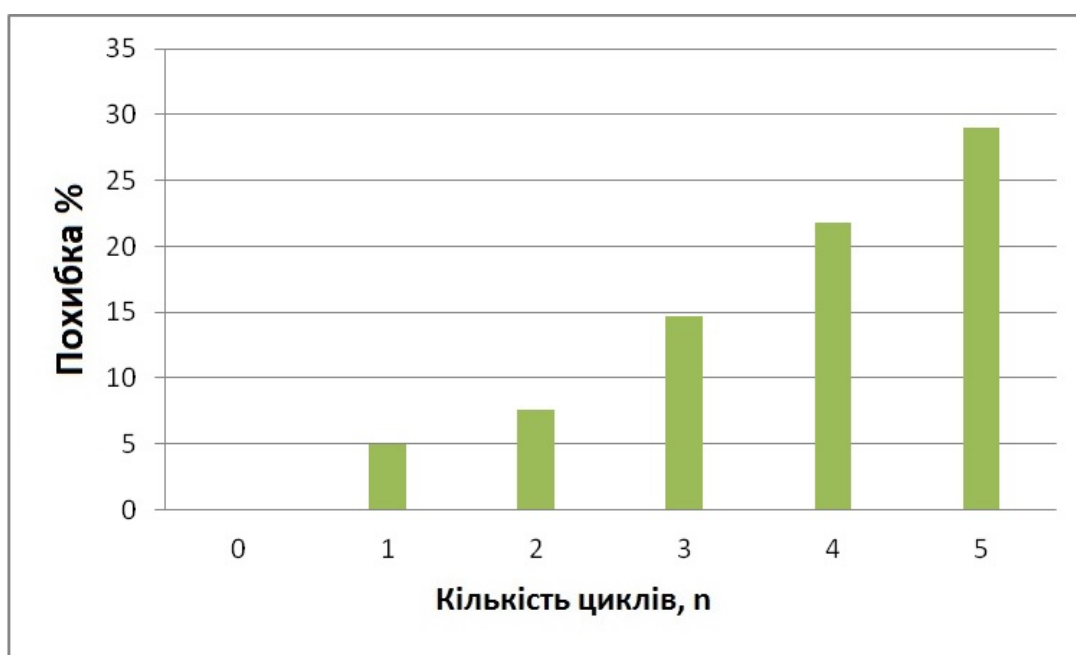


Рис. 4.51. Відносна похибка між питомим зчепленням глинистого ґрунту, випробуваного за відсутності заморожування-розморожування, і питомим зчепленням, встановленим під час циклічного заморожування-розморожування ґрунту

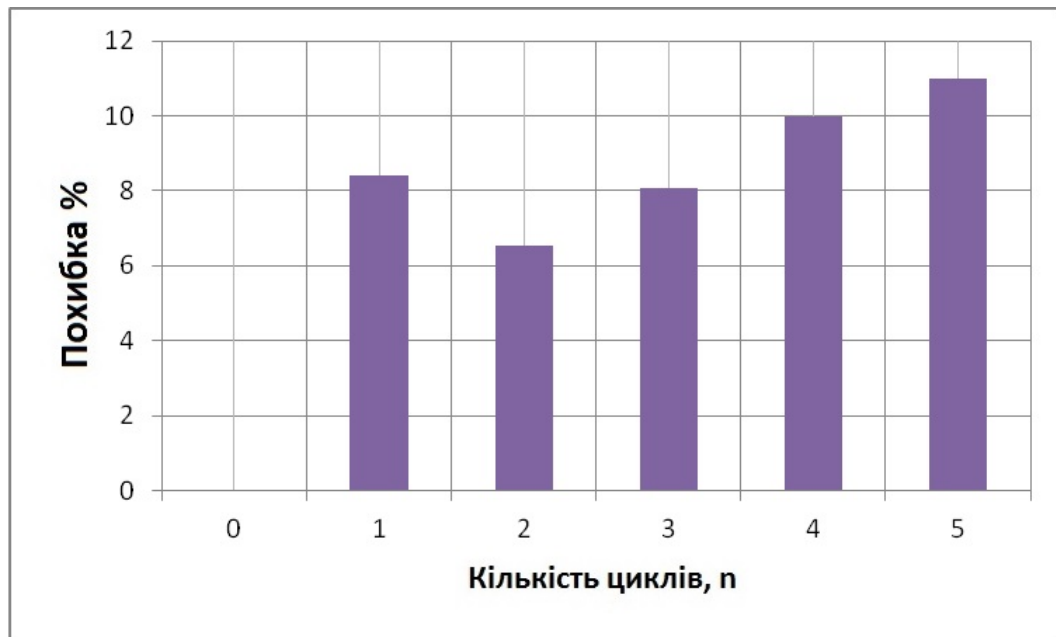


Рис. 4.52. Відносна похибка між кутом внутрішнього тертя глинистого ґрунту, випробуваного за відсутності заморожування-розморожування, і кутом внутрішнього тертя, встановленого під час циклічного заморожування-розморожування ґрунту

Так, циклічне заморожування-розморожування найбільше погіршує властивості зв'язного ґрунту. Згідно з [38, 39, 40, 42, 43, 47, 170, 194, 198, 213, 214, 215, 268] це явище зумовлене руйнуванням міжчасткових структурних зв'язків.

На рис. 4.53 і 4.54 наведено залежності (4.8), розраховані відповідно для міцності бетону на стиск R_b і для його модуля загальної деформації E . З рисунків випливає, що циклічне заморожування-розморожування бетону в цьому разі призвело до погіршення його міцності та деформаційних властивостей приблизно на 30 %.

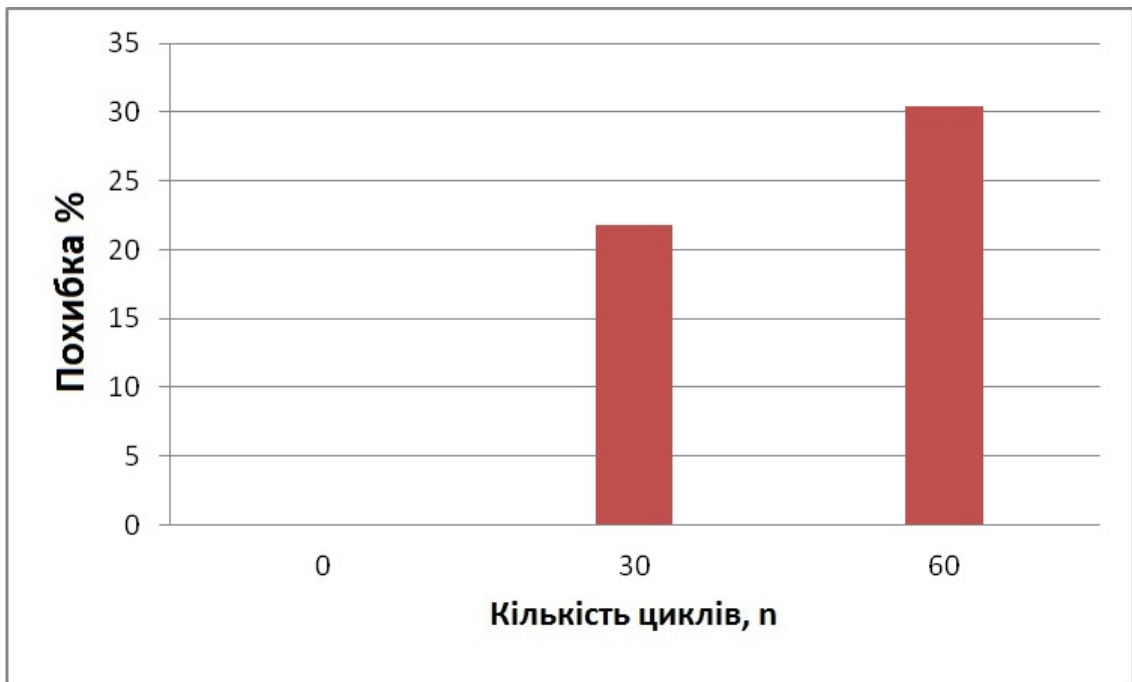


Рис. 4.53. Відносна похибка між міцністю бетону на стиск R_b , випробуваного за відсутності заморожування-розморожування, і міцністю бетону, випробуваного під час циклічного заморожування-розморожування



Рис. 4.54. Відносна похибка між початковим модулем загальної деформації бетону E , випробуваного за відсутності заморожування-розморожування, і міцністю бетону, випробуваного під час циклічного заморожування-розморожування

На рис. 4.55 залежності (4.8) розраховані для несучої здатності моделей пильових фундаментів.



Рис. 4.55. Відносна похибка між несучою здатністю моделей пиль F_d , випробуваних за відсутності заморожування-розморожування і несучою здатністю моделей пиль, випробуваних у разі циклічного заморожування-розморожування

З рисунків випливає, що циклічне заморожування-розморожування бетону в цьому разі призвело до погіршення його міцності та деформаційних властивостей приблизно на 25 %.

Висновки

Загалом викладені в цьому розділі матеріали досліджень дали нам змогу зробити такі висновки:

- 1) циклічне заморожування-розморожування суттєво погіршує будівельні властивості ґрунту і бетону;
- 2) найістотніше (до 30 %) зменшуються питоме зчеплення і модуль загальної деформації ґрунту. Кут внутрішнього тертя змінюється незначно;

3) циклічне заморожування-розморожування суттєво погіршує будівельні властивості бетону (міцність бетону на стиск R_b на 30 % і початковий модуль загальної деформації до 25 %);

4) циклічне заморожування-розморожування істотно (до 25 %) зменшило несучу здатність моделей паль F_d ;

5) під час циклічного заморожування-розморожування погіршення властивостей ґрунту відбувається значно швидше, ніж для бетону;

6) залежності міцності та деформаційних властивостей від кількості циклів заморожування-розморожування описуються експоненціальним залежностям з негативним показником ступеня, коефіцієнти яких залежать від виду матеріалу й умов його випробування;

7) деформації морозного здимання, зумовлені теплообміном колекторів теплових насосів з ґрунтом, мають один порядок з деформаціями, спричиненими силовим впливом на ґрунт. Отже, під час проектування основ і фундаментів будівель і споруд необхідно їх враховувати.

РОЗДІЛ 5.
ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ
РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ
У ҐРУНТОВИХ ОСНОВАХ

Сьогодні сезонні коливання температури основ на території України вимірюють тільки в обмеженій кількості обласних центрів на глибинах, що не перевищують 3,2 м.

Під час проектування основ і фундаментів, у яких розташовані колектори теплових насосів, необхідно враховувати розподіл температурних полів, розташованих на більше ніж 3,2 м глибинах.

Треба також зазначити, що тепер в інженерній практиці значно поширились методи кінцевих різниць і кінцевих елементів [32, 122, 129, 194, 221, 334].

Загальним недоліком цих методів є неможливість розрахунку полів у обмежених ділянках (а ґрунтові масиви є саме такими ділянками).

У зв'язку з цим для прогнозу температурних полів ми використали підхід, суть якого полягає в побудові фундаментальних рішень задач теплопровідності і далі, з використанням принципу суперпозиції, знаходження температурних полів для конкретних випадків [21, 174, 176, 178-183, 222-224, 300, 338-342, 344].

Розглянемо структуру розділу.

У підрозділі 5.1 вставлено теоретичні закономірності сезонної зміни температури в ґрунтовій товщі з урахуванням отриманих нами в розділі 3.1 аналітичних закономірностей розподілу температури на денній поверхні основи.

У підрозділі 5.2 наведено отримане фундаментальне рішення, необхідне для визначення температурного поля в основі плоского колектора теплового насоса. Інакше кажучи, вирішено задачу про визначення температурного поля від двовимірного (плоского) точкового джерела температури, розташованого усередині півпростору.

У підрозділі 5.3 отримано фундаментальне рішення, необхідне для визначення температурного поля в основі U -подібного колектора теплового насоса. Інакше кажучи, вирішено завдання про визначення температурного поля від тривимірного (об'ємного) точкового джерела температури, розташованого у середині півпростору.

У підрозділі 5.4 проаналізовано розмірності та наведено приклади використання отриманих нами фундаментальних рішень для вирішення завдань про визначення температурних полів у ґрунтових основах.

Наприкінці сформовано загальні висновки до розділу.

5.1. Теоретичні закономірності сезонної зміни температури в ґрунтовій товщі

Під час написання цього розділу ставилася мета встановити, наскільки точно можна (і чи можна взагалі) виконати моделювання температурних полів у ґрунтовій товщі протягом річного циклу зміни температур.

Ця задача є базовою під час теплотехнічних розрахунків ґрунтових основ теплових насосів, якщо їх використовують носій, накопичувачі, перетворювачі та джерело теплової енергії.

Це твердження цілком справедливе, оскільки для врахування впливу на температурний режим основи колектора ґрунтового теплового насоса необхідно мати уявлення про зміну в основі температурних полів і теплових потоків протягом весняно-літньо-осінньо-зимового циклу.

Щоб вирішити окреслену проблему, спрямовані викладені нижче матеріали теоретичних досліджень.

Завдання досліджень сформульовано так. Відомо зміну в часі температури $T_{v1}(t)$ на верхній (якщо $z=0$) межі ґрунтової основи (рис. 5.1.1). Відомо розподіл температури в основі по глибині $T_0(z)$ в момент часу $t=0$. Відомі щільність ρ і теплофізичні характеристики основи (тобто її питома теплоємність

c_p і коефіцієнт теплопровідності). Потрібно визначити теоретичний закон розподілу температури в ґрунтовій основі і з'ясувати, як теоретичні закономірності розподілу температурних полів по глибині ґрунтової основи відрізняються від їхніх фактичних величин.

З фізичного погляду така картина наявна на вертикалі, що проходить через центр необмеженої в плані основи [295, 290, 297].

З математичного погляду завдання досліджень зводиться до вирішення рівняння теплопровідності [125, 297]

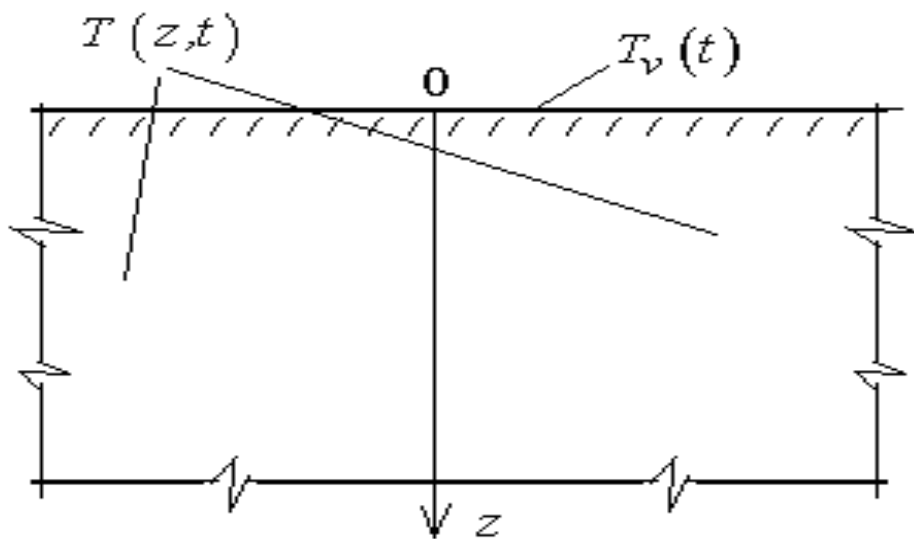


Рис. 5.1. До визначення температурних полів у основі

$$a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{\partial T}{\partial t} = 0. \quad (5.1)$$

У разі виконання початкових і граничних умов:

$$\left. \begin{aligned} T(0, z) &= T_0(z) = T_0 = const; \\ T(t, 0) &= T_v(t); \\ T(t, \infty) &< \infty; \\ z &\in (0, \infty). \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

де $T_v(t)$ – температура на верхній межі основи, яку треба визначати за формулою

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}. \quad (5.3)$$

Рішення (5.1) з урахуванням (5.2) і (5.3) зручно шукати з використанням одностороннього перетворення Лапласа за часовою змінною "t" [33, 134–136, 288]. З (5.1.1) і початкової умови (верхнє рівняння системи (5.1)) маємо

$$\frac{d^2 T}{dz^2} - \frac{\omega}{a} \cdot T = -\frac{1}{a} \cdot T_0. \quad (5.4)$$

Граничні умови (5.2) в ділянці зображень з тимчасовою змінною "t" матимуть вигляд:

$$\left. \begin{aligned} T(\omega, 0) &= T_v(\omega); \\ T(\omega, \infty) &< \infty. \end{aligned} \right\}, \quad (5.5)$$

де ω – параметр одностороннього перетворення Лапласа за часовою змінною "t".

Рішення (5.4) з урахуванням граничних умов (5.5) має вигляд

$$T = T_w \cdot e^{\left(-z \cdot \sqrt{\frac{\omega}{a}}\right)} + \frac{T_0}{\omega} \cdot \left[1 - e^{\left(-z \cdot \sqrt{\frac{\omega}{a}}\right)}\right], \quad (5.6)$$

а оригінал (5.6) має такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} T(z, t) &= T_0 \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2 \cdot \sqrt{a \cdot t}}\right) + \\ &+ \frac{1}{2} \cdot \frac{z}{\sqrt{a \cdot \pi}} \cdot \int_0^t \frac{T_v(\xi)}{\sqrt{(t-\xi)^3}} \cdot \exp\left[-\frac{z^2}{4 \cdot a \cdot (t-\xi)}\right] \cdot d\xi \end{aligned} \right\}, \quad (5.7)$$

де ξ – має розмірність часу – параметр.

Далі підставимо в (5.7) отримане нами раніше (розділ 3.1, формула (3.2)) значення температури на межі основи і виконаємо процедуру інтегрування. Маємо

$$T(z,t) = T_0 \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2 \cdot \sqrt{a \cdot t}}\right) + \left. \begin{aligned} &+ \frac{z}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \pi}} \cdot \sum_{i=0}^4 a_i \cdot \vartheta_i(z,t). \end{aligned} \right\}, \quad (5.8)$$

де

$$k = \frac{z^2}{4 \cdot a};$$

$$z_1 = \operatorname{erf}\left(\frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{k}{t}}\right);$$

$$z_2 = \exp\left(\frac{k}{4 \cdot t}\right);$$

$$z_3 = z_1 \cdot z_2;$$

$$\vartheta_0 = 2 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{k}} \cdot (1 - z_1);$$

$$\vartheta_1 = (k + 2 \cdot t) \cdot \sqrt{\frac{\pi}{k}} \left(1 - \frac{z_1}{z_2}\right) - \frac{2\sqrt{t}}{z_2};$$

$$\vartheta_2 = \frac{12kt + 12t^2 + k^2}{6\sqrt{k}} \sqrt{\pi} - \frac{12kt + 12t^2 + k^2}{6\sqrt{k}} \sqrt{\pi} \cdot \frac{z_3}{z_2} - \frac{k\sqrt{t} + 20t^{3/2}}{6 \cdot z_2};$$

$$\vartheta_3 = \frac{120t^3 + k^3 + 30t \cdot k^2 + 180 \cdot t^2 \cdot k}{60} \sqrt{\frac{\pi}{k}} \cdot \left(1 - \frac{z_3}{z_2}\right) - \frac{264 \cdot t^{5/2} \sqrt{k} + 56 \cdot k^{3/2} \cdot t^{3/2} + 2 \cdot k^{5/2} \cdot t^{1/2}}{6\sqrt{k} \cdot z_2};$$

$$\vartheta_3 = \frac{k^4 + 56t \cdot k^3 + 840 \cdot t^2 \cdot k^2 + 3360 \cdot t^3 \cdot k + t^4}{840} \sqrt{\frac{\pi}{k}} \cdot \left(1 - \frac{z_3}{z_2}\right) - \frac{2 \cdot k^{7/2} t^{1/2} + 4464 \cdot k^{1/2} \cdot t^{7/2} + 108 \cdot k^{5/2} \cdot t^{3/2} + 1480 \cdot k^{3/2} \cdot t^{5/2}}{840\sqrt{k} \cdot z_2};$$

$$g_4 = \frac{\left[\begin{array}{l} k^5 + 90t \cdot k^4 + 75600 \cdot t^4 \cdot k + \\ + 2520 \cdot t^2 \cdot k^3 + 30240 \cdot t^5 + 2520 \cdot t^3 \cdot k^2 \end{array} \right]}{15120} \sqrt{\frac{\pi}{k}} \cdot \left(1 - \frac{z_3}{z_2} \right) - \frac{\left[\begin{array}{l} 4704 \cdot k^{5/2} \cdot t^{5/2} + 175 \cdot k^{7/2} \cdot t^{3/2} + \\ + 42240 \cdot k^{3/2} \cdot t^{7/2} + 93640 \cdot t^{9/2} + 2 \cdot k^{9/2} \end{array} \right]}{15120 \sqrt{k} \cdot z_2}, \quad (5.9)$$

де a_i – емпіричні коефіцієнти, які необхідно приймати за табл. 3.19; b_i – коефіцієнти змішаних поліномів Чебишева першого роду; $erfc(x) = 1 - erf(x)$; $erf(x)$ – інтеграл ймовірності [134, 150].

Для практичних розрахунків важливо мати залежність температури основи від часу і координати за ступінчастої зміни температури на поверхні основи. Це пояснюється тим, що в довідковій літературі і зведеннях гідрометеорологічного центру України залежність температури повітря від часу дається подобою, подекадно, помісячно тощо.

Уявімо ступеневу зміну температури з використанням різниці функцій Хевісайда у вигляді:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta T(t) = \Delta T \cdot [U(t - t_1) - U(t - t_2)]; \\ t_2 > t_1. \end{array} \right\}$$

Далі припустимо, що відомі середньомісячні значення температури на межі основи і потрібно з використанням ступінчастих функцій апроксимувати її зміну протягом одного року. Маємо

$$T_v(t) \approx \sum_{i=1}^{11} T_{vi} \cdot [U(t - i) - U(t - i - 1)], \quad (5.10)$$

де $t = 1, 2, 3, \dots, 12$ – номер місяця.

Далі підставимо отриманий таким чином вираз для температури на межі основи в (5.9) і виконаємо процедуру інтегрування. Маємо

$$T(z,t) = T_0 \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2 \cdot \sqrt{a \cdot t}}\right) + \sum_{i=1}^{11} T_{vi} \left\langle \operatorname{erfc}\left[\frac{z}{\sqrt{a \cdot (t-i)}}\right] - \operatorname{erfc}\left[\frac{z}{\sqrt{a \cdot (t-i-1)}}\right] \right\rangle \quad (5.11)$$

Далі для довільного інтервалу часу $\Delta t = t_i - t_{i+1}$ і довільного значення температури на цьому інтервалі часів знайдемо індукцію:

$$T(z,t) = T_0 \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2 \cdot \sqrt{a \cdot t}}\right) + \sum_{i=1}^{11} T_{v,i} \left\langle \operatorname{erfc}\left[\frac{z}{\sqrt{a \cdot (t-t_i)}}\right] - \operatorname{erfc}\left[\frac{z}{\sqrt{a \cdot (t-t_{i+1})}}\right] \right\rangle \quad (5.12)$$

Під час чисельного експерименту варіювалися щільність ґрунтової основи, його теплоємність і коефіцієнт теплопередачі [7, 19, 125, 150, 297]. Прийняті у чисельному експерименті значення щільності, питомої теплоємності і теплопровідності основи подані в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Прийняті під час чисельного експерименту значення теплофізичних властивостей основи

№ з/п	Питома вага γ $\frac{\kappa H}{\text{м}^3}$	Питома теплоємність c_p , $\frac{\kappa \text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	Коефіцієнт теплопровідності λ , $\frac{\text{вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$
1	15,50-20,00	0,50-2,00	0,50-2,00

Як початкова температура (тобто температура, якщо $t = 0$) прийняті її середньорічні значення (нагадаємо, що згідно з [290, 297] для м. Дніпропетровська $T_{cp} = 10,5$, а для м. Львова $T_{cp} = 9,9$) див. рис. 5.-5.4

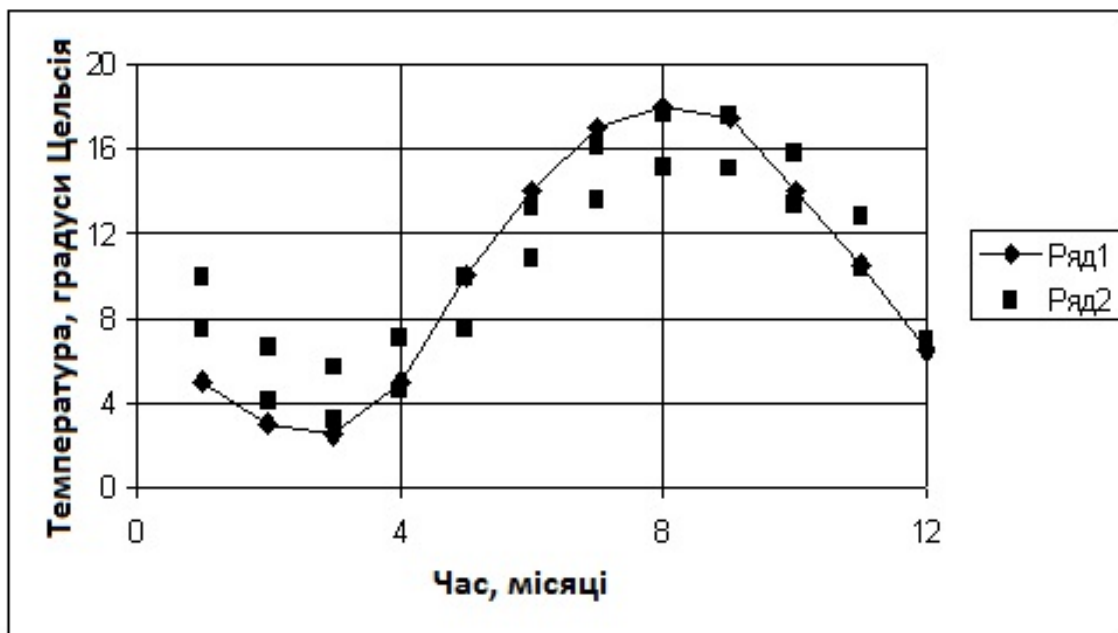


Рис. 5.2. Зміна температури в ґрунтовій основі м. Дніпропетровська. Глибина = 1,6 м: 1 – дані Гідрометеоцентру, 2 – розрахунок

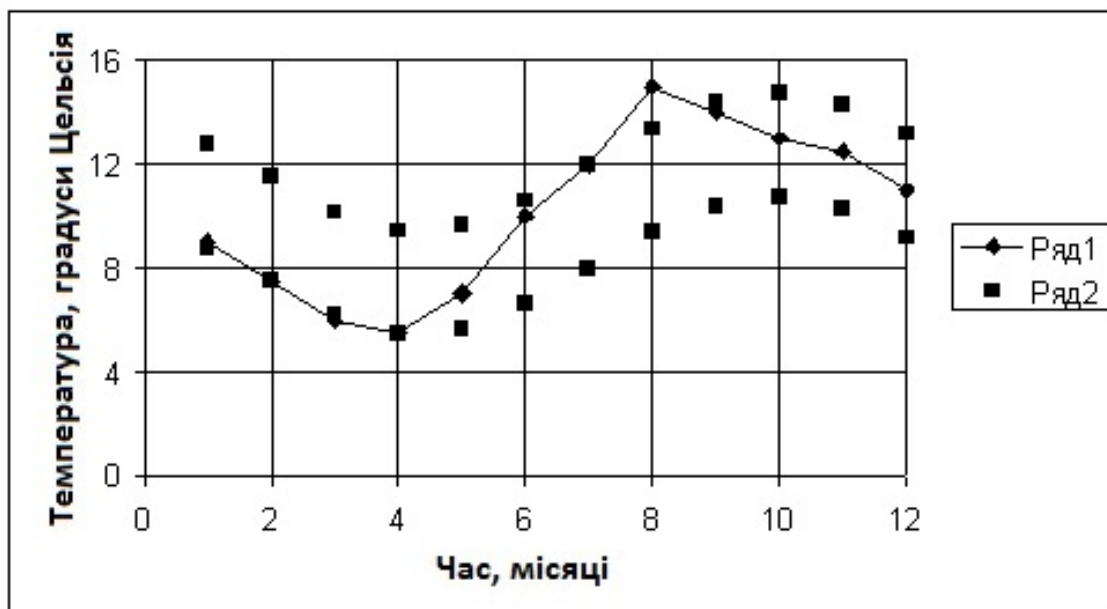


Рис. 5.3. Зміна температури в ґрунтовій основі м. Дніпропетровська. Глибина = 3,2 м: 1 – дані Гідрометеоцентру, 2 – розрахунок

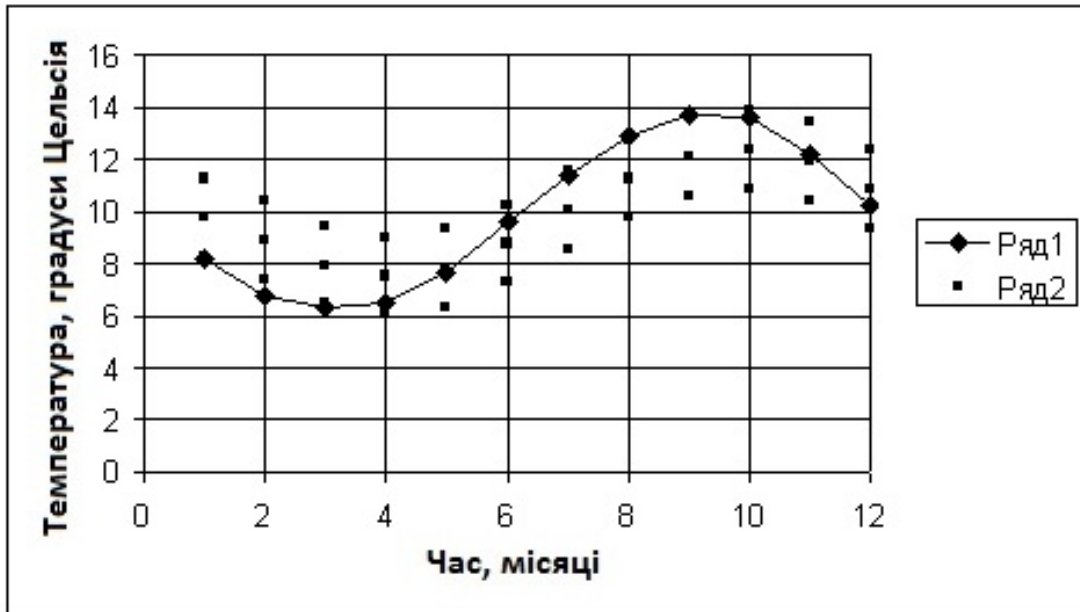


Рис. 5.4. Зміна температури в ґрунтовій основі м. Львова. Глибина = 3,2 м: 1 – дані Гідрометеоцентру, 2 – розрахунок

Результати розрахунку наведено на рис. 5.2-5.4. Їх аналіз дав нам змогу зробити такі висновки.

1) Отримано аналітичне рішення задачі про зміну температурного поля в ґрунтовій основі під впливом змінної температури на денній поверхні основи, яка змінюється за поліноміальним законом;

2) Показано, що розрахункові значення температур на різних глибинах мають прийнятну відповідність з їх фактичними (тобто вимірними) значеннями.

Загалом, ми зробили висновок про те, що викладений у цьому розділі підхід цілком прийнятний для прогнозування температурних полів всередині ґрунтових основ, зумовлених зміною температури на їх межі.

5.2. Визначення температурного поля в основі плоского колектора теплового насоса

Температурне поле від двовимірного (плоского) точкового джерела температури, розташованого усередині півпростору.

Для отримання фундаментального рішення для визначення температурного поля в основі плоского колектора теплого насоса, ставили мету виконати теоретичні дослідження зміни теплової енергії в ґрунтовій основі плоского колектора теплового насоса [295, 297].

Вище показано, що температурне поле в основі можна подати у вигляді суперпозиції двох теплових полів – поля, зумовленого сезонною зміною температури на денній поверхні основи (рішення цієї задачі подано в розділі 5.1) і поля, причиною появи якого є теплообмін між плоским колектором теплового насоса і ґрунтовою основою.

Наступне завдання досліджень сформульовано так.

1. У середині півпростору на глибині h розташоване точкове джерело температури, з використанням якого здійснюється нагрівання основи (рис. 5.5).
2. Розглядається незмінна в часі і змінна (загальний випадок) температури джерела.
3. У початковий момент часу (тобто, якщо $t \rightarrow 0$) температура основи дорівнює нулю.
4. На значній відстані від джерела нагрівання в радіальному напрямку (тобто у нескінченності) температура основи знижується до нуля.
5. На значній відстані від джерела нагрівання у вертикальному напрямку (тобто у нескінченності) температура основи знижується до нуля.
6. На верхній межі ґрунтової основи підтримується нульова температура. Відомі щільність ρ і теплофізичні характеристики складника основи ґрунту (тобто його питома теплоємність c_p і коефіцієнт теплопровідності λ).

Потрібно розрахувати температурне поле в зоні джерела нагріву в точці основи з координатами (r, z) (якщо використовується циліндрична система координат з осью симетрії) або в точці основи з координатами (x, y, z) (якщо використовується декартова система координат з осью симетрії) в деякий момент часу " t ".

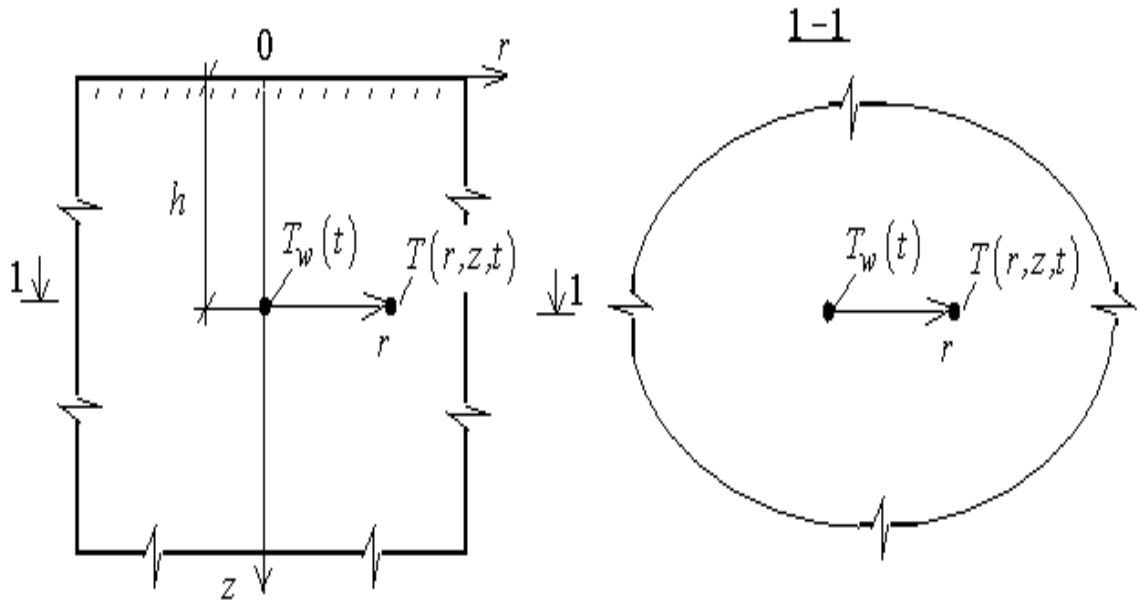


Рис. 5.5. До визначення температурного поля від точкового джерела всередині півпростору

У цьому випадку завдання має осьову симетрію, а, отже, розподіл температури в півпросторі не залежить від кута повороту радіуса-вектора $\vec{0r}$ навколо осі Oz . Раніше ми показали, що в цьому випадку рішення задачі зводиться до розв'язання системи диференціальних рівнянь у часткових похідних

$$\left. \begin{aligned} a \cdot \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial T_1}{\partial t} = 0 \quad \text{при } z \in (0, h); \\ a \cdot \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial T_2}{\partial t} = 0 \quad \text{при } z \in (h, \infty); \end{aligned} \right\} (5.13)$$

Відповідно до прийнятих нами припущень та обмежень початкові і граничні умови мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned}
 T_1(r, z, 0) = T_2(r, z, 0) = 0; \\
 T_1(r, 0, t) = 0; \\
 T_2(r, \infty, t) = 0; \\
 T_1(\infty, z, t) = 0; \\
 T_2(\infty, z, t) = 0; \\
 T_1(r, h, t) - T_2(r, h, t) = T_w(t) \cdot \frac{\delta(r)}{2 \cdot \pi \cdot r}; \\
 \frac{\partial T_1(r, h, t)}{\partial z} - \frac{\partial T_2(r, h, t)}{\partial z} = 0.
 \end{aligned} \right\} \quad (5.14)$$

Застосуємо до (5.13) одностороннє перетворення з тимчасової змінної "t". Маємо

$$\left. \begin{aligned}
 a \cdot \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right) - \omega \cdot T_1 = 0 \quad \text{при } z \in (0, h); \\
 a \cdot \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right) - \omega \cdot T_2 = 0 \quad \text{при } z \in (h, \infty);
 \end{aligned} \right\}, \quad (5.15)$$

де ω – параметр перетворення Лапласа.

Далі подамо передостаннє гранична умова (5.15) у вигляді:

$$T_1(r, h, t) - T_2(r, h, t) = \frac{T_w(t)}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{\infty} J_0(\alpha \cdot r) \cdot \alpha \cdot d\alpha, \quad (5.16)$$

де α – параметр перетворення Ханкеля, а $J_0(x)$ – функція Бесселя першого роду з нульовим індексом [25].

Після цього застосуємо одностороннє перетворення Лапласа до граничних умов (5.14). У такому разі врахуємо рівність (5.15). Маємо

$$\left. \begin{aligned}
 T_1(r, 0, \omega) &= 0; \\
 T_2(r, \infty, \omega) &= 0; \\
 T_1(\infty, z, \omega) &= 0; \\
 T_2(\infty, z, \omega) &= 0; \\
 T_1(r, h, \omega) - T_2(r, h, \omega) &= T_w(\omega) \cdot \frac{\delta(r)}{2 \cdot \pi \cdot r} = \\
 &= \frac{T_w(\omega)}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^\infty J_0(\alpha \cdot r) \cdot \alpha \cdot d\alpha; \\
 \frac{\partial T_1(r, h, \omega)}{\partial z} - \frac{\partial T_2(r, h, \omega)}{\partial z} &= 0.
 \end{aligned} \right\} \quad (5.17)$$

З урахуванням думки граничних умов (5.17) рішення системи рівнянь (5.14) шукаємо у вигляді

$$\left. \begin{aligned}
 T_1 &= \int_0^\infty J_0(\alpha \cdot r) \cdot F_1(\omega, z) \cdot \alpha \cdot d\alpha \quad \text{при } z \in (0, h); \\
 T_2 &= \int_0^\infty J_0(\alpha \cdot r) \cdot F_2(\omega, z) \cdot \alpha \cdot d\alpha \quad \text{при } z \in (h, \infty);
 \end{aligned} \right\}, \quad (5.18)$$

де $F_1(\omega, z)$ і $F_2(\omega, z)$ – визначення функції координати z і параметра ω .

Далі подамо (5.2.6) в (5.2.3). Маємо

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{d^2 F_1}{dz^2} - \left(\alpha^2 + \frac{\omega}{a} \right) \cdot F_1 &= 0 \quad \text{при } z \in (0, h); \\
 \frac{d^2 F_2}{dz^2} - \left(\alpha^2 + \frac{\omega}{a} \right) \cdot F_2 &= 0 \quad \text{при } z \in (h, \infty);
 \end{aligned} \right\}. \quad (5.19)$$

Рішення системи рівнянь (5.19) з урахуванням граничних умов (5.17) і рівності (5.18) має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \frac{T_w(\omega)}{2 \cdot \pi} \cdot \left\{ \exp[-\gamma \cdot (h - z)] - \exp[-\gamma \cdot (h + z)] \right\} \quad \text{при } z \in (0, h); \\ F_2 &= \frac{T_w(\omega)}{2 \cdot \pi} \cdot \left\{ -\exp[-\gamma \cdot (z - h)] - \exp[-\gamma \cdot (h + z)] \right\} \quad \text{при } z \in (h, \infty); \\ \gamma &= \sqrt{\alpha^2 + \frac{\omega}{a}}. \end{aligned} \right\} \quad (5.20)$$

Далі знайдемо рішення системи рівнянь (5.15). У такому разі врахуємо рівності (5.20) і перетворення (5.18). Маємо

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= \frac{T_w(\omega)}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{\infty} J_0(\alpha \cdot r) \cdot \left\{ \begin{array}{l} \exp[-\gamma \cdot (h - z)] - \\ -\exp[-\gamma \cdot (h + z)] \end{array} \right\} \cdot \alpha \cdot d\alpha \quad \text{при } z \in (0, h); \\ T_2 &= \frac{T_w(\omega)}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{\infty} J_0(\alpha \cdot r) \cdot \left\{ \begin{array}{l} -\exp[-\gamma \cdot (z - h)] - \\ -\exp[-\gamma \cdot (h + z)] \end{array} \right\} \cdot \alpha \cdot d\alpha \quad \text{при } z \in (h, \infty); \\ \gamma &= \sqrt{\alpha^2 + \frac{\omega}{a}}. \end{aligned} \right\} \quad (5.21)$$

Після цього знайдемо оригінал (5.21). Маємо

$$\left. \begin{aligned}
 T_1 &= \frac{1}{8 \cdot \pi} \cdot \int_0^\infty J_0(\alpha \cdot r) \cdot \left\langle \int_0^t \frac{T_w(\tau)}{z_6} \cdot e^{-z_1} \cdot \begin{Bmatrix} z_4 \cdot e^{-z_2} - \\ -z_5 \cdot e^{-z_3} \end{Bmatrix} \cdot d\tau \right\rangle \cdot \alpha \cdot d\alpha \\
 &\text{при } z \in (0, h); \\
 T_2 &= \frac{1}{8 \cdot \pi} \cdot \int_0^\infty J_0(\alpha \cdot r) \cdot \left\langle \int_0^t \frac{T_w(\tau)}{z_6} \cdot e^{-z_1} \cdot \begin{Bmatrix} z_4 \cdot e^{-z_2} - \\ -z_5 \cdot e^{-z_3} \end{Bmatrix} \cdot d\tau \right\rangle \cdot \alpha \cdot d\alpha \\
 &\text{при } z \in (h, \infty); \\
 z_1 &= \alpha^2 \cdot a \cdot (t - \tau); \\
 z_2 &= \frac{(z - h)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)}; \\
 z_3 &= \frac{(z + h)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)}; \\
 z_4 &= h - z; \\
 z_5 &= h + z; \\
 z_6 &= \sqrt{\pi \cdot a \cdot (t - \tau)^3}.
 \end{aligned} \right\} \quad (5.22)$$

Далі обчислимо невластні інтеграли (5.22). Маємо

$$\left. \begin{aligned}
 T(r, z, t) &= \frac{1}{16 \cdot \pi} \cdot \int_0^t \frac{T_w(\tau)}{\chi_6} \cdot e^{-\chi_1} \cdot \begin{Bmatrix} \chi_4 \cdot e^{-\chi_2} - \\ -\chi_5 \cdot e^{-\chi_3} \end{Bmatrix} \cdot d\tau \\
 &\text{при } z \in (0, \infty); \\
 \chi_1 &= \frac{r^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)}; \\
 \chi_2 &= \frac{(z - h)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)}; \\
 \chi_3 &= \frac{(z + h)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)}; \\
 \chi_4 &= h - z; \\
 \chi_5 &= h + z; \\
 \chi_6 &= \sqrt{\pi \cdot a^3 \cdot (t - \tau)^5}.
 \end{aligned} \right\} \quad (5.23)$$

Далі подамо отримане нами фундаментальне рішення (5.23) в декартовій системі координат. Покладемо в ньому $r = \sqrt{x^2 + y^2}$. Маємо

$$T(x, y, z, t) = \frac{1}{16 \cdot \pi} \cdot \int_0^t \frac{T_w(\tau)}{\chi_6} \cdot e^{-\chi_1} \cdot \left. \begin{array}{l} \chi_4 \cdot e^{-\chi_2} - \\ -\chi_5 \cdot e^{-\chi_3} \end{array} \right\} \cdot d\tau$$

при $z \in (0, \infty)$;

$$\chi_1 = \frac{x^2 + y^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)};$$

$$\chi_2 = \frac{(z - h)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)};$$

$$\chi_3 = \frac{(z + h)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)};$$

$$\chi_4 = h - z;$$

$$\chi_5 = h + z;$$

$$\chi_6 = \sqrt{\pi \cdot a^3 \cdot (t - \tau)^5}.$$
(5.24)

Загалом викладені в цьому розділі матеріали досліджень дають змогу зробити такі висновки:

1) у циліндричній системі координат з осьової симетрією отримано рішення про температурне поле навколо розташованого усередині півпростору розподіленого точкового джерела температури (формули (5.23));

2) аналогічні результати отримані в декартовій системі координат (формули (5.24));

3) ці рішення є фундаментальними стосовно проблеми визначення температурних полів, зумовлених теплообміном між ґрунтовими основами і плоскими колекторами теплових насосів обмежених розмірів.

5.3. Рішення для визначення температурних полів у основі *U*-подібного колектора

Температурне поле від точкового об'ємного джерела тепла, розташованого усередині ґрунтової основи. Для отримання фундаментального рішення для визначення температурних полів у основі *U*-подібного колектора мали на меті виконати теоретичні дослідження зміни теплової енергії в ґрунтовій основі *U*-подібного колектора теплового насоса [51, 297].

Вище показано, що температурне поле в основі можна подати у вигляді суперпозиції двох теплових полів – поля, зумовленого сезонною зміною температури на денній поверхні основи (рішення цієї задачі висвітлено в розділі 5.1) і поля, причиною появи якого є теплообмін між U -подібним колектором і ґрунтових основою.

Завдання досліджень сформульовано так:

- 1) усередині півпростору на глибині ξ розташоване точкове джерело тепла, з використанням якого здійснюється нагрівання основи (рис. 5.6);
- 2) тепла енергія, що передається від точкового джерела основи, може бути як незмінною в часі, так і змінною;
- 3) у початковий момент часу (тобто, якщо $t \rightarrow 0$) температура основи дорівнює нулю;
- 4) на значній відстані від джерела нагрівання в радіальному напрямку (тобто у нескінченності) температура основи знижується до нуля;
- 5) на значній відстані від джерела нагрівання у вертикальному напрямку (тобто у нескінченності) температура основи знижується до нуля;
- 6) відомі щільність ρ і теплофізичні характеристики складника основи ґрунту (тобто його питома теплоємність c_p і коефіцієнт теплопровідності λ).

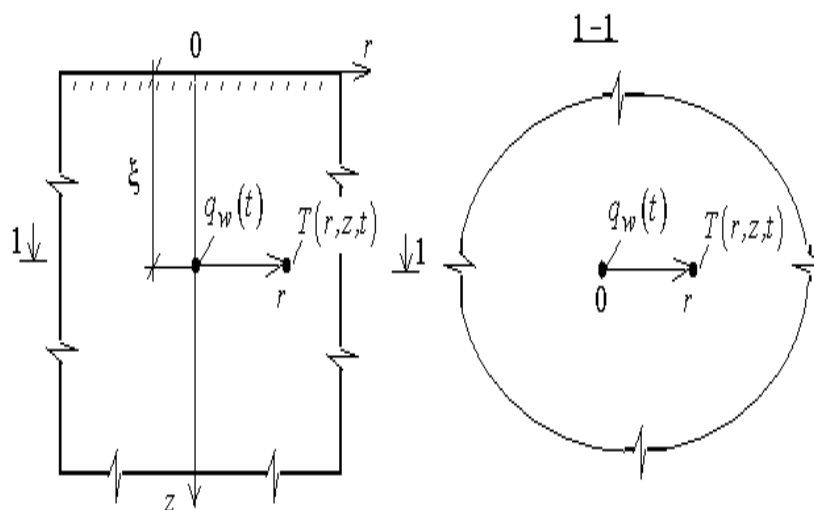


Рис. 5.6. До визначення температурного поля від точкового джерела всередині півпростору

Тож потрібно розрахувати температурне поле в зоні джерела нагрівання в точці основи з координатами (r, z) (якщо використовується циліндрична система координат з осью симетрії) або в точці основи з координатами (x, y, z) (якщо використовується декартова система координат з осью симетрії) в деякий момент часу "t".

Завдання має осьову симетрію, а, отже, розподіл температури в півпросторі не залежить від кута повороту радіуса-вектора $\overline{0r}$ навколо осі $0z$. Раніше ми показали, що в цьому випадку рішення завдання зводиться до вирішення диференціального рівняння в часткових похідних виду:

$$a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial T}{\partial t} = -q_w(t) \cdot \frac{\delta(r) \cdot \delta(z - \xi)}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot \rho \cdot c_p}, \quad (5.25)$$

де r і z – координати; t – час; T – питома температура в точці з координатами

(r, z) в момент часу t (має розмірність $\left[\frac{0 \text{ C}}{\text{м}^3} \right]$ або $\left[\frac{0 \text{ K}}{\text{м}^3} \right]$); $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$; ξ – глибина, на якій розташоване джерело тепла (рис. 5.3.1); q_w – щільність теплового джерела (має розмірність $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^3} \right]$).

Тут $q_w(t)$ – деякий довільний закон зміни швидкості температури точкового джерела в часі (має одиницю вимірювання $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^3} \right]$); $\delta(x)$ – символічна дельта-функція Дірака [134].

Відповідно до прийнятих нами припущень та обмежень початкові і граничні умови мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} T(r, z, 0) &= 0; \\ T(r, 0, t) &= 0; \\ T(r, \infty, t) &= 0; \\ T(\infty, z, t) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5.26)$$

Далі застосуємо до (5.25) і (5.26) одностороннє перетворення Лапласа за часовою змінною "t" [134, 288]. З урахуванням прийнятих припущень маємо:

$$a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \omega \cdot T = -q_w(\omega) \cdot \frac{\delta(r) \cdot \delta(z - \xi)}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot \rho \cdot c_p} \quad (5.27)$$

i

$$\left. \begin{aligned} T(r, 0, \omega) &= 0; \\ T(r, \infty, \omega) &= 0; \\ T(\infty, z, \omega) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5.28)$$

Тут ω – параметр одностороннього перетворення Лапласа [134]. Далі подаємо праву частину (5.3.1) у вигляді:

$$\begin{aligned} q_w(\omega) \cdot \frac{\delta(r) \cdot \delta(z - \xi)}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot \rho \cdot c_p} &= \\ = q_w(\omega) \cdot \frac{\delta(z - \xi)}{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot c_p} \cdot \int_0^\infty J_0(\alpha \cdot r) \cdot \alpha \cdot d\alpha \end{aligned} \quad (5.29)$$

де α – параметр перетворення Ганкеля, а $J_0(x)$ – функція Бесселя першого роду з нульовим індексом.

З урахуванням граничних умов (5.28) і подання рішення у вигляді (5.29) рішення рівняння (5.27) шукаємо у вигляді [281, 299]:

$$T(r, z, \omega) = \int_0^\infty F(\alpha, z, \omega) \cdot J_0(\alpha \cdot r) \cdot \alpha \cdot d\alpha, \quad (5.30)$$

де $F(\alpha, z, \omega)$ – деяка підлягає визначенню функція координати "z", яка за параметрами залежить від параметрів " α " і " ω ".

Далі підставимо (5.3.6) в (5.3.3). Маємо

$$\int_0^\infty J_0(\alpha \cdot r) \cdot \alpha \cdot \left\{ \frac{d^2 F}{dz^2} - \left(\alpha^2 + \frac{\omega}{a} \right) \cdot F - q_w(\omega) \cdot \frac{\delta(z - \xi)}{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot c_p} \right\} \cdot d\alpha = 0. \quad (5.31)$$

Рішення рівняння (5.31) має вигляд:

$$\left. \begin{aligned}
 T(r, z, \omega) &= \frac{k}{2 \cdot \gamma} \cdot \int_0^{\infty} J_0(\alpha \cdot r) \cdot \alpha \cdot F(\alpha, z) \cdot d\alpha; \\
 F(\alpha, z) &= f_1 - f_2 - f_3 + f_4; \\
 f_1 &= \exp[-\gamma \cdot (z - \xi)]; \\
 f_2 &= \exp[-\gamma \cdot (z + \xi)]; \\
 f_3 &= U(\xi - z) \cdot \exp[-\gamma \cdot (z - \xi)]; \\
 f_4 &= U(\xi - z) \cdot \exp[-\gamma \cdot (\xi - z)]; \\
 \gamma &= \sqrt{\alpha^2 + \frac{\omega}{a}} \\
 k &= \frac{q_w(\omega)}{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot c_p};
 \end{aligned} \right\}, \quad (5.32)$$

де $U(x)$ – одинична ступінчаста функція Хевісайда. Далі знайдемо оригінал (5.31). Маємо

$$\left. \begin{aligned}
 T(r, z, t) &= \int_0^{\infty} J_0(\alpha \cdot r) \cdot \alpha \cdot d\alpha \cdot \left[\int_0^t k(\tau) \cdot f_0 \cdot \{f_1 - f_2\} \cdot d\tau \right]; \\
 f_0 &= \exp[-\alpha^2 \cdot a \cdot (t - \tau)]; \\
 f_1 &= \exp\left[-\frac{(z - \xi)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)}\right]; \\
 f_2 &= \exp\left[-\frac{(z + \xi)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)}\right]; \\
 k(\tau) &= \frac{q_w(\tau)}{4 \cdot \rho \cdot c_p \cdot \sqrt{\pi^3 \cdot a \cdot (t - \tau)}}
 \end{aligned} \right\}. \quad (5.33)$$

Далі обчислимо невластний інтеграл, що входить до (5.33), за змінною "α". Маємо

$$\left. \begin{aligned}
 T(r, z, t) &= \int_0^t k(t, \tau) \cdot f_0 \cdot [f_1 - f_2] \cdot d\tau; \\
 f_0 &= \exp \left[-\frac{r^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right]; \\
 f_1 &= \exp \left[-\frac{(z - \xi)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right];
 \end{aligned} \right\} \quad (5.34)$$

$$\left. \begin{aligned}
 f_2 &= \exp \left[-\frac{(z + \xi)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right]; \\
 k(t, \tau) &= \frac{q_w(\tau)}{\rho \cdot c_p \cdot \sqrt{[\pi \cdot a \cdot (t - \tau)]^3}}.
 \end{aligned} \right\} \quad (5.35)$$

Далі від циліндричної системи координат з осьової симетрією перейдемо до декартової системи координат. Для досягнення цієї мети прийmemo в (5.35)

$r = \sqrt{x^2 + y^2}$. Маємо

$$\left. \begin{aligned}
 T(r, z, t) &= \int_0^t k(t, \tau) \cdot f_0 \cdot [f_1 - f_2] \cdot d\tau; \\
 f_0 &= \exp \left[-\frac{x^2 + y^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right]; \\
 f_1 &= \exp \left[-\frac{(z - \xi)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right]; \\
 f_2 &= \exp \left[-\frac{(z + \xi)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right]; \\
 k(t, \tau) &= \frac{q_w(\tau)}{8 \cdot \rho \cdot c_p \cdot \sqrt{[\pi \cdot a \cdot (t - \tau)]^3}}.
 \end{aligned} \right\} \cdot \quad (5.36)$$

Загалом викладені в цьому підрозділі матеріали досліджень дали нам змогу зробити такі висновки:

1) у циліндричній системі координат з осьової симетрією отримано рішення про температурне поле навколо розташованого усередині півпростору точкового джерела тепла (формули (5.34));

2) аналогічні результати отримані в декартовій системі координат (формули (5.3.15));

3) ці рішення є фундаментальними стосовно проблеми визначення температурних полів, зумовлених теплообміном між ґрунтовими основами та плоскими і U -подібними колекторами теплових насосів, а також довільними джерелами тепла, розмірами в плані і по висоті яких неможливо знехтувати.

5.4. Аналіз розмірностей, отриманих фундаментальних рішень

Розглянемо приклади їх використання для виконання завдань з визначення температурних полів у ґрунтових основах.

Отримані нами фундаментальні рішення мають складний і громіздкий вигляд і містять велику кількість параметрів.

Доцільно виявити, наскільки розмірності лівої частини формул (5.7), (5.23) і (5.34) відповідають розмірностям їхньої правої частини.

Спочатку проаналізуємо формулу (5.7). Одиниці вихідних величин, комплексів і формул, які входять до неї, зведені в табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Розмірності величин, комплексів і функцій, які входять до складу формули (5.7)

№ з/п	Назва	Позначення	Розмірність
1	щільність	ρ	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
2	питома теплоємність	c_p	$\frac{\text{Вт} \cdot \text{сек}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$
3	коефіцієнт теплопровідності	λ	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$
4	час	$t, \xi, d\xi$	с
5	температура	$T(z, t), T_0, T(\xi)$	град
6	координата	z	м
7	коефіцієнт теплопереносу	$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$	$\frac{\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}}{\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{кг} \cdot \text{град}}} = \left[\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right]$
8	комплекс	$\frac{z}{2 \cdot \sqrt{a \cdot t}}$	$\frac{\text{м}}{2 \cdot \sqrt{\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \cdot \text{с}}} = [\text{д.ед.}]$

9	функція	$\operatorname{erf}\left(\frac{z}{2 \cdot \sqrt{a \cdot t}}\right)$	[д.ед.]
10	комплекс	$\frac{z^2}{4 \cdot a \cdot (t - \xi)}$	$\frac{m^2}{\frac{m^2}{c} \cdot c} = [\text{д.ед.}]$
11	функція	$\exp\left(-\frac{z^2}{4 \cdot a \cdot (t - \xi)}\right)$	[д.ед.]
12	комплекс	$\frac{1}{2} \cdot \frac{z}{4 \cdot a \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \frac{T(\xi) \cdot d\xi}{\sqrt{(t - \xi)^3}}$	$\frac{m}{\sqrt{\frac{m^2}{c}}} \cdot \frac{\text{град} \cdot c}{t^{1,5}} = [\text{град}]$

З (5.7) з урахуванням поданих у табл. 5.2 даних маємо:

$$[\text{град}] = [\text{град}] + [\text{град}] \equiv [\text{град}], \quad (5.37)$$

в силу чого можна зробити висновок про те, що розмірності в правій і лівій частинах (5.7) повністю збігаються.

Далі проаналізуємо формулу (5.23). Одиниці вихідних величин, комплексів і формул, які входять до неї, зведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3

Розмірності величин, комплексів і функцій, що входять до складу формули (5.23)

№ з/п	Назва	Позначення	Розмірність
1	щільність	ρ	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
2	питома теплоємність	c_p	$\frac{\text{Вт} \cdot \text{сек}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$
3	коефіцієнт теплопровідності	λ	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$
4	час	$t, \xi, d\xi$	с
5	температура	$T_w(\tau)$	град

6	розподілена температура	$T(r, z, t)$	$\left[\frac{\text{град}}{\text{м}^2} \right]$
7	координата	z	м
8	коефіцієнт теплопереносу	$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$	$\frac{\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}}{\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{кг} \cdot \text{град}}} = \left[\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right]$
9	комплекс	$\chi_1 = \frac{r^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)}$	$\frac{\text{м}^2}{\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \cdot \text{с}} = [\text{д.ед.}]$
10	комплекс	$\chi_2 = \frac{(z - h)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)}$	$\frac{\text{м}^2}{\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \cdot \text{с}} = [\text{д.ед.}]$
11	комплекс	$\chi_3 = \frac{(z + h)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)}$	$\frac{\text{м}^2}{\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \cdot \text{с}} = [\text{д.ед.}]$
12	комплекс	$\chi_4 = h - z$	м
13	комплекс	$\chi_5 = h + z$	м
14	комплекс	$\chi_6 = \sqrt{\pi \cdot a^3 \cdot (t - \tau)^5}$	$\left(\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right)^{3/2} \cdot (\text{с})^{5/2} = [\text{м}^3 \cdot \text{с}]$
15	функція	$e^{-\chi_1}$	$[\text{д.ед.}]$
16	функція	$\chi_4 \cdot e^{-\chi_2}$	$[\text{м}]$
17	функція	$\chi_5 \cdot e^{-\chi_3}$	$[\text{м}]$
18	комплекс	$\frac{z^2}{4 \cdot a \cdot (t - \xi)}$	$\frac{\text{м}^2}{\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \cdot \text{с}} = [\text{д.ед.}]$

3 (5.23) з урахуванням поданих у табл. 5.3 даних маємо

$$\left[\frac{\text{град}}{\text{м}^2} \right] = \left[\frac{\text{град}}{\text{м}^3 \cdot \text{с}} \right] \cdot [\text{м}] \cdot \text{с} \equiv \left[\frac{\text{град}}{\text{м}^2} \right]. \quad (5.38)$$

Отже, можна зробити висновок про те, розмірності в правій і лівій частинах (5.23) повністю збігаються.

Нарешті проаналізуємо формулу (5.34). Одиниці вихідних величин, комплексів і формул, що входять до її складу, зведені в табл. 5.4.

З (5.34) з урахуванням поданих у табл. 5.4 даних маємо

$$\left[\frac{\text{град}}{\text{м}^3} \right] = \left[\frac{\text{град}}{\text{м}^3 \cdot \text{с}} \right] \cdot \text{с} \equiv \left[\frac{\text{град}}{\text{м}^3} \right]. \quad (5.39)$$

Отже, можна зробити висновок про те, що одиниці вимірювання в правій і лівій частинах (5.34) повністю збігаються.

Таблиця 5.4

Розмірності величин, комплексів і функцій, які входять до складу формули (5.34)

№ з/п	Назва	Позначення	Розмірність
1	щільність	ρ	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
2	питома теплоємність	c_p	$\frac{\text{Вт} \cdot \text{сек}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$
3	коефіцієнт теплопровідності	λ	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$
4	час	$t, \xi, d\xi$	с
5	температура	$T_w(\tau)$	град
6	об'ємна температура	$T(r, z, t)$	$\left[\frac{\text{град}}{\text{м}^3} \right]$
7	координата	z	м

8	коефіцієнт теплопереносу	$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$	$\frac{\frac{Вт}{м \cdot град}}{\frac{кг}{м^3} \cdot \frac{Вт \cdot с}{кг \cdot град}} = \left[\frac{м^2}{с} \right]$
9	комплекс	$\frac{r^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)}$	$\frac{м^2}{\frac{м^2}{с} \cdot с} = [д.ед.]$
10	комплекс	$\frac{(z - h)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)}$	$\frac{м^2}{\frac{м^2}{с} \cdot с} = [д.ед.]$
11	комплекс	$\frac{(z + h)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)}$	$\frac{м^2}{\frac{м^2}{с} \cdot с} = [д.ед.]$
12	функція	$f_0 = \exp \left[-\frac{r^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right]$	[д.ед.]
13	функція	$f_1 = \exp \left[-\frac{(z - \xi)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right]$	[д.ед.]
14	функція	$f_2 = \exp \left[-\frac{(z + \xi)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right]$	[д.ед.]
15	об'ємний джерело тепла	$q_w(\tau)$	$\frac{вт \cdot с}{м^3}$
16	комплекс	$\frac{q_w(\tau)}{\rho \cdot c_p \cdot \sqrt{[\pi \cdot a \cdot (t - \tau)]^3}}$	$\frac{\frac{вт}{м^3}}{\frac{кг}{м^3} \cdot \frac{вт \cdot с}{кг \cdot град} \cdot \sqrt{\frac{м^2}{с} \cdot с^3}} =$

Тож усі отримані теоретичні рішення з погляду теорії розмірностей є правильними.

Далі розглянемо техніку використання отриманих нами фундаментальних рішень для визначення температурних полів у ґрунтових основах.

Спочатку розглянемо техніку визначення температурного поля в основі плоского колектора теплового насоса (рис. 5.7).

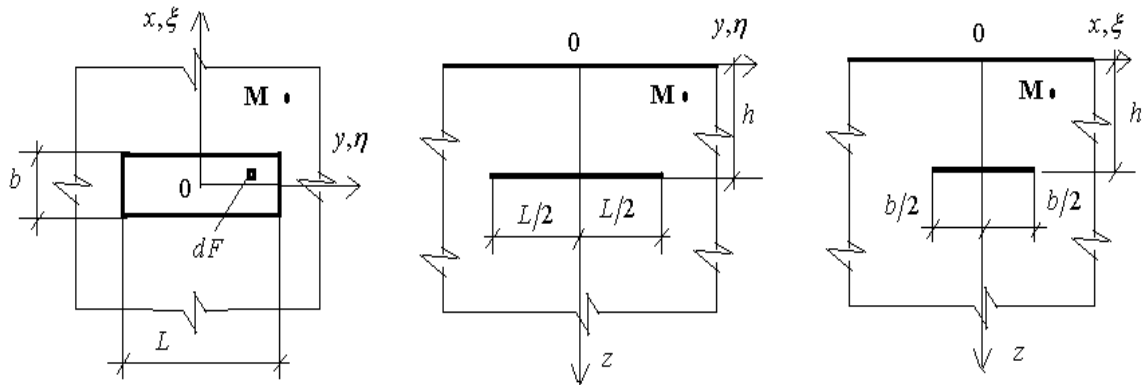


Рис. 5.7. До визначення температури основи, зумовленою теплообміном основи з плоским колектором теплового насоса

Завдання сформульоване так. Всередині основи на глибині h знаходиться плоский колектор теплового насоса з розмірами в плані $L \times b$ м. Товщиною колектора нехтуємо. Температура колектора, зарахована до одиниці його площі, дорівнює T_w [град / кв.м]. Потрібно визначити температуру основи в точці M з координатами (x, y) .

Для вирішення завдання виділимо елементарну ділянку теплового колектора з розмірами $d\xi \times d\eta$ і координатами ξ, η .

Відстані до розглянутої точки M від центру цієї ділянки дорівнюють: по осі $Oz - z$; по осі $Ox - x - \xi$; по осі $Oy - y - \eta$.

Підставимо ці відстані в формулу 5.24 і знайдемо диференціал температури в розглянутій точці:

$$dT(x-\xi, y-\eta, z, t) = \frac{d\xi \cdot d\eta}{16 \cdot \pi} \cdot \int_0^t \frac{T_w(\tau)}{\chi_6} \cdot e^{-\chi_1} \cdot \left. \begin{array}{l} \chi_4 \cdot e^{-\chi_2} - \\ -\chi_5 \cdot e^{-\chi_3} \end{array} \right\} \cdot d\tau$$

при $z \in (0, \infty)$;

$$\chi_1 = \frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{4 \cdot a \cdot (t-\tau)}$$

$$\chi_2 = \frac{(z-h)^2}{4 \cdot a \cdot (t-\tau)};$$

$$\chi_3 = \frac{(z+h)^2}{4 \cdot a \cdot (t-\tau)};$$

$$\chi_4 = h - z;$$

$$\chi_5 = h + z;$$

$$\chi_6 = \sqrt{\pi \cdot a^3 \cdot (t-\tau)^5}.$$
(5.40)

і проінтегруємо (5.40) відповідно до площі (рис. 5.7). Отримаємо

$$T(x, y, z, t) = \frac{1}{16 \cdot \pi} \cdot \int_{-b/2}^{b/2} \int_{-L/2}^{L/2} \int_0^t \frac{T_w(\tau)}{\chi_6} \cdot e^{-\chi_1} \cdot \left. \begin{array}{l} \chi_4 \cdot e^{-\chi_2} - \\ -\chi_5 \cdot e^{-\chi_3} \end{array} \right\} \cdot d\tau \cdot d\xi \cdot d\eta$$

при $z \in (0, \infty)$;

$$\chi_1 = \frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{4 \cdot a \cdot (t-\tau)}$$

$$\chi_2 = \frac{(z-h)^2}{4 \cdot a \cdot (t-\tau)};$$

$$\chi_3 = \frac{(z+h)^2}{4 \cdot a \cdot (t-\tau)};$$

$$\chi_4 = h - z;$$

$$\chi_5 = h + z;$$

$$\chi_6 = \sqrt{\pi \cdot a^3 \cdot (t-\tau)^5}.$$
(5.41)

Формула (5.41) дає змогу визначити температуру основи в будь-якій його точці з координатою М (x, y, z), зумовлену теплообміном розташованого на глибині h плоского колектора теплового насоса з розмірами в плані L×b.

Далі розглянемо техніку визначення температурного поля в основах U-подібного колектора теплового насоса.

Завдання сформульоване так. Всередині основи знаходиться U -подібний колектор теплового насоса циліндричної форми довжиною L м і радіусом R м. Товщиною і довжиною колектора неможливо знехтувати. Тепло, що його поглинає колектор, під час функціонування в режимі кондиціонування й опалення, відносно одиниці об'єму дорівнює q_w [Вт/м³]. Потрібно визначити температуру основи в точці M з координатами (r, z) .

Скористаємося осью симетрії.

Для вирішення завдання виділимо елементарний кільцевий об'єм теплового колектора з розмірами $2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot dr_1 \cdot d\xi$ і координатами r_1, ξ .

Відстані до точки M від центру цієї ділянки дорівнюють: по осі $Oz - z$; по осі $Ox - r - r_1$.

Підставимо ці відстані в формулу 5.34 і знайдемо диференціал температури в розглянутій точці:

$$\left. \begin{aligned}
 dT(r - r_1, z - \xi, t) &= 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot dr_1 \cdot d\xi \int_0^t k(t, \tau) \cdot f_0 \cdot [f_1 - f_2] \cdot d\tau; \\
 f_0 &= \exp \left[-\frac{(r - r_1)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right]; \\
 f_1 &= \exp \left[-\frac{(z - \xi)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right]; \\
 f_2 &= \exp \left[-\frac{(z + \xi)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right]; \\
 k(t, \tau) &= \frac{q_w(\tau)}{\rho \cdot c_p \cdot \sqrt{[\pi \cdot a \cdot (t - \tau)]^3}}.
 \end{aligned} \right\} \quad (5.42)$$

Для того, щоб визначити температуру, треба проінтегрувати (5.42) за площею. Маємо

$$\left. \begin{aligned}
 T(r, z, t) &= 2 \cdot \pi \cdot \int_0^L \int_0^R \eta_1 \cdot d\eta_1 \left(\int_0^t k(t, \tau) \cdot f_0 \cdot [f_1 - f_2] \cdot d\tau \right); \\
 f_0 &= \exp \left[-\frac{(\mathbf{r}-\mathbf{r1})^2}{4 \cdot a \cdot (t-\tau)} \right]; \\
 f_1 &= \exp \left[-\frac{(z-\xi)^2}{4 \cdot a \cdot (t-\tau)} \right]; \\
 f_2 &= \exp \left[-\frac{(z+\xi)^2}{4 \cdot a \cdot (t-\tau)} \right]; \\
 k(t, \tau) &= \frac{q_w(\tau)}{\rho \cdot c_p \cdot \sqrt{[\pi \cdot a \cdot (t-\tau)]^3}}.
 \end{aligned} \right\} \quad (5.43)$$

Формула (5.44) дає змогу визначити температуру основи в будь-якій його точці з координатою М (r, z), зумовлену теплообміном з ґрунтом U-подібним колектором теплового насоса з довжиною L і радіусом R.

Далі проілюструємо викладене на конкретному прикладі (розділи 5.4.1 і 5.4.2.)

5.4.1. Температурне поле в основі плоского колектора теплового насоса кінцевих розмірів

Розглянемо задачу про розподіл температурних полів у основі плоского колектора, що працює в режимах кондиціонування, опалення, а також у реверсному режимі теплового насоса (рис. 5.8). Врахуємо, що опалювальний сезон триває 6 місяців (початок у перших числах жовтня і завершення – в останніх числах березня), а сезон кондиціонування – 3 місяці (початок у перших числах червня і завершення в останніх числах серпня).

Припустимо, що плоский колектор теплового насоса знаходиться на глибині 1,6 метра у вологому піску (в цьому разі згідно з даними табл. 5.5 питома

тепловіддача становить $Q = 20 \frac{Вт}{м^2}$). Припустимо, що він виконаний з труб діаметром 50 мм, розташованих один від одного на відстані 500 мм, а труби укладені на ділянці основи, що має в плані розміри 10×10 м.

Потрібно з використанням поданих у табл. 5.6 даних розрахувати температурне поле в основі.

Таблиця 5.5

Характеристики ґрунтової основи

№ з/п	Щільність ρ $\frac{кг}{м^3}$	Питома теплоємність c_p , $\frac{Вт \cdot сек}{кг \cdot град}$	Коефіцієнт теплопровідності λ , $\frac{Вт}{м \cdot град}$
1	1980	1130	0,5

Послідовність виконання розрахунку.

1. Спочатку визначаємо діаметр еквівалентної труби, з використанням якої здійснюється теплообмін колектора з основою. Врахуємо той факт, що щільність розсолу і що складового основи ґрунту відмінні один від одного. Ма-

ємо $2 \cdot \rho_w \cdot c_{pw} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \rho \cdot c \cdot \frac{\pi \cdot d_{екв}^2}{4}$, звідки

$$d_{екв} = d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_w \cdot c_{pw}}{\rho \cdot c}} = 50 \cdot \sqrt{\frac{1000 \cdot 4200}{1980 \cdot 1130}} = 68,5 \text{ мм} = 0,069 \text{ м}.$$

Таблиця 5.6

Характеристики ґрунтової основи

№ з/п	Щільність ρ $\frac{кг}{м^3}$	Питома теплоємність c_p , $\frac{Вт \cdot сек}{кг \cdot град}$	Коефіцієнт теплопровідності λ , $\frac{Вт}{м \cdot град}$
1	1980	1130	0,5

Тут ρ_w , c_{pw} , ρ , c , d и $d_{эке}$ – див. пояснення до рис. 5.9.

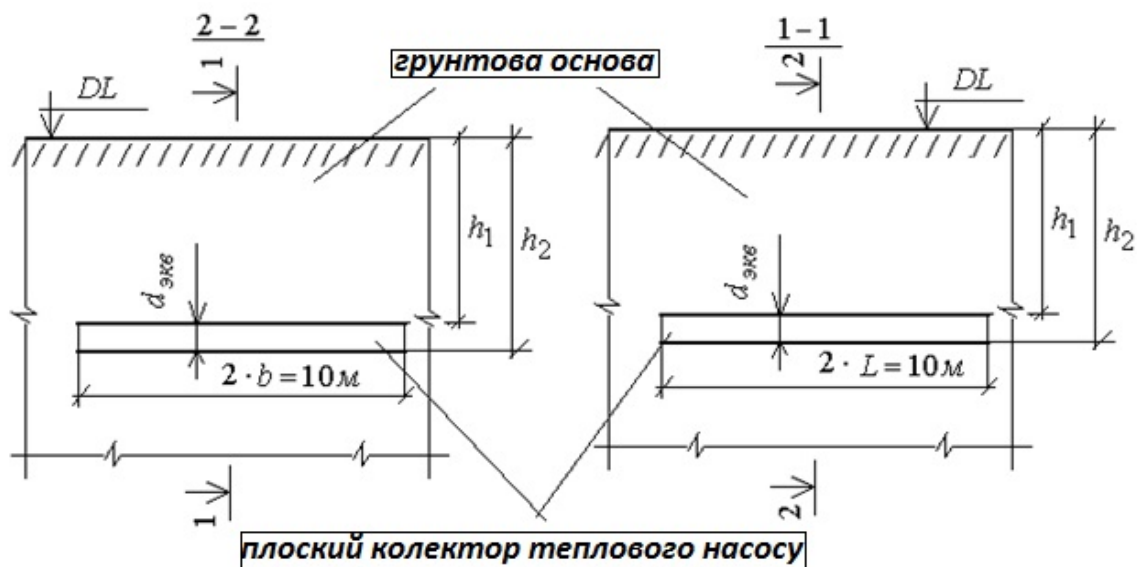


Рис. 5.8. До розрахунку температурного поля в основі плоского колектора теплового насоса (схема)

2. Далі знайдемо кількість питомого тепла, необхідного для опалення та кондиціонування будівлі, зарахованого до одного квадратного метра основи. Врахуємо, що $h_2 - h_1 = d_{эке}$ (див. рис. 5.8), а труби колектора мають круглий переріз. Маємо

$$q_w = \frac{Q \cdot P_{mp} \cdot 1\text{м} \cdot 0,707}{(h_2 - h_1) \cdot 1\text{м} \cdot 0,5\text{м}} = \frac{Q \cdot \pi \cdot (h_2 - h_1) \cdot 1\text{м} \cdot 0,707}{(h_2 - h_1) \cdot 1\text{м} \cdot 0,5\text{м}} =$$

$$= \frac{Q \cdot \pi \cdot 0,707}{0,5\text{м}} = \frac{20 \cdot 3,14 \cdot 0,707}{0,5} = 89 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$$

Тут $P_{mp} = \pi \cdot d_{эке}$ – периметр еквівалентної труби колектора і $d_{эке} = h_2 - h_1$ – діаметр еквівалентної труби колектора і розрахункова товщина об'ємного джерела питомого тепла (рис. 5.9).

3. Потім потрібно визначити коефіцієнти теплопровідності основи a і добуток $\rho \cdot c_p$ [125, 297]. Маємо: $a = 0,58 \frac{\text{м}^2}{\text{мес}}$ і $\rho \cdot c_p = 0,863 \frac{\text{Вт} \cdot \text{мес}}{\text{м}^3 \cdot \text{град}}$.

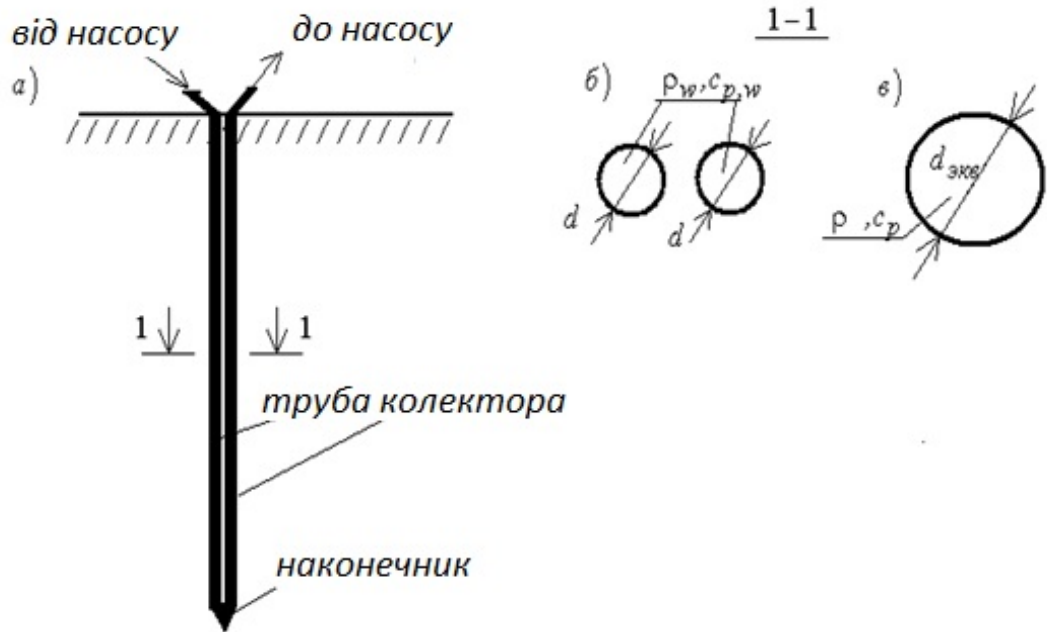


Рис. 5.9. До визначення теплового поля в основі U-подібного колектора теплового насоса: *a* і *б* – фактична схема; *в* – те саме, розрахункова з наведеними характеристиками. Примітка. На рисунку прийняті такі позначення d – фактичний діаметр труби колектора теплового насоса; $d_{\text{экв}}$ – те саме, еквівалентний; $\rho_w, c_{p,w}$ – відповідно щільність і питома теплоємність циркулювального в зонді розсолу; ρ, c_p – те саме, основи

4. Відповідно до графіків опалення та кондиціонування отримаємо таку залежність питомої енергії від часу:

$$\left. \begin{aligned}
 & \mathbf{q_w}(t) = -89 \cdot [U(t-9) - U(t-14)] - \text{Якщо тепловий насос} \\
 & \quad \text{працює в режимі опалення;} \\
 & \quad \text{якщо одночасно} \\
 & \mathbf{q_w}(t) = 89 \cdot [U(t-5) - U(t-8)] - \text{Якщо тепловий насос} \\
 & \quad \text{працює в режимі кондиціонування;} \\
 & \mathbf{q_w}(t) = 89 \cdot [U(t-5) - U(t-8)] - 89 \cdot [U(t-9) - U(t-14)] - \text{Якщо} \\
 & \quad \text{тепловий насос працює в режимі опалення і} \\
 & \quad \text{кондиціонування одночасно;}
 \end{aligned} \right\} , \quad (5.44)$$

де t – час у місяцях.

5. Далі з використанням формули (5.34) і принципу суперпозиції знайдемо температурне поле від прямокутного в плані розподіленого джерела тепла з розмірами $2 \cdot b \times 2 \cdot L$ завтовшки $\Delta = h_2 - h_1$. Для цього знайдемо диференціал (65) і отриманий таким чином вираз проінтегруємо в межах $x \in (-b, b)$, $y \in (-L, L)$ і $z \in (h_1, h_2)$. Отримаємо

$$dT(r, z, t) = \int_{-b-L}^b \int_{-L}^L \left\langle \int_0^t k(t, \tau) \cdot f_0 \cdot [f_1 - f_2] \cdot d\tau \right\rangle dx_1 \cdot dy_1 \cdot d\xi;$$

$$f_0 = \exp \left[-\frac{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right];$$

$$f_1 = \exp \left[-\frac{(z - \xi)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right];$$

$$f_2 = \exp \left[-\frac{(z + \xi)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right];$$

$$k(t, \tau) = \frac{q_w(\tau)}{8 \cdot \rho \cdot c_p \cdot \sqrt{[\pi \cdot a \cdot (t - \tau)]^3}}.$$

звідки

$$\left. \begin{aligned}
 T(r,t) &= \int_0^t k(\tau) \cdot (f_1 + f_2 + f_3 + f_4) \cdot (f_5 + f_6 + f_7 + f_8) d\tau; \\
 f_1 &= \operatorname{erf}\left(\frac{-b+x}{a_1}\right) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{-L+y}{a_1}\right); \\
 f_2 &= -\operatorname{erf}\left(\frac{-b+x}{a_1}\right) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{L+y}{a_1}\right); \\
 f_3 &= \operatorname{erf}\left(\frac{b+x}{a_1}\right) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{-L+y}{a_1}\right); \\
 f_4 &= \operatorname{erf}\left(\frac{b+x}{a_1}\right) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{L+y}{a_1}\right); \\
 f_5 &= \operatorname{erf}\left(\frac{-h_2+z}{a_1}\right); \\
 f_6 &= \operatorname{erf}\left(\frac{h_2+z}{a_1}\right);
 \end{aligned} \right\} \quad (5.45)$$

$$\left. \begin{aligned}
 f_7 &= -\operatorname{erf}\left(\frac{-h_1+z}{a_1}\right); \\
 f_8 &= \operatorname{erf}\left(\frac{h_1+z}{a_1}\right); \\
 a_1 &= 2 \cdot \sqrt{a \cdot (t-\tau)}; \\
 k(\tau) &= \frac{q_w(\tau)}{\rho \cdot c_p}.
 \end{aligned} \right\} \quad (5.46)$$

На основі отриманих даних, якщо $y = 0$, побудували ізополя температур у ґрунтовій основі для таких варіантів використання теплових насосів:

- тепловий насос працює тільки лише в режимі кондиціонування три місяці з початку червня по кінець серпня (рис. 5.10);
- тепловий насос працює тільки лише в режимі опалення шість місяців з початку листопада по кінець березня (рис. 5.11);
- тепловий насос працює в реверсному режимі (тобто в режимі кондиціонування три місяці з початку червня до кінця серпня і в режимі опалювання шість місяців з початку листопада до кінця березня (рис. 5.12).

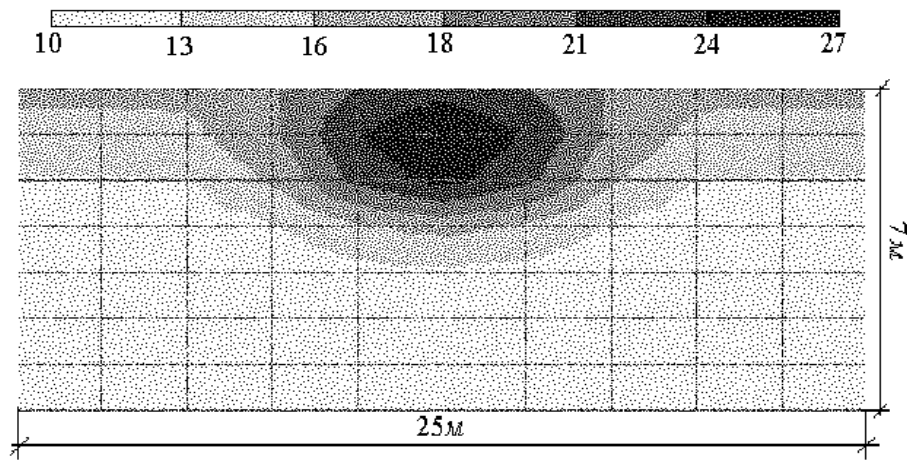


Рис. 5.10. Температурне поле в ґрунтовій основі на глибині 10 метрів після роботи теплового насоса в режимі кондиціонування протягом 3 місяців

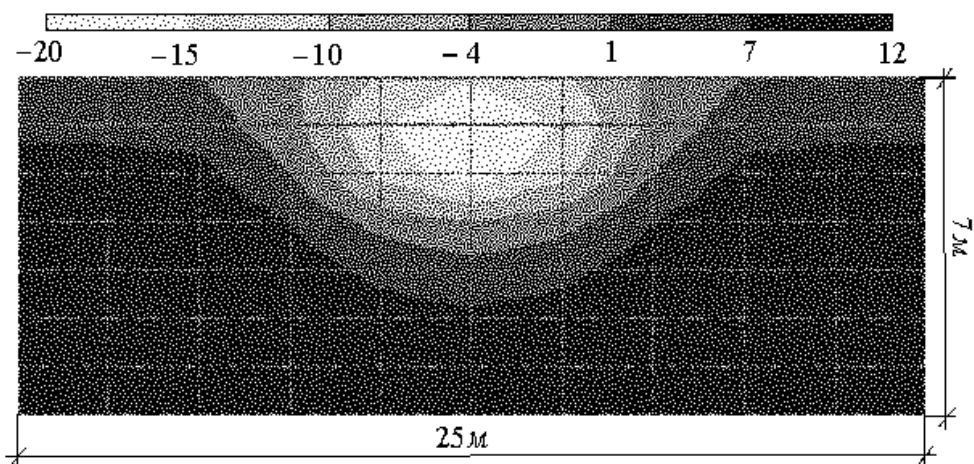


Рис. 5.11. Температурне поле в ґрунтовій основі на глибині 10 метрів після роботи теплового насоса в режимі опалення протягом 6 місяців

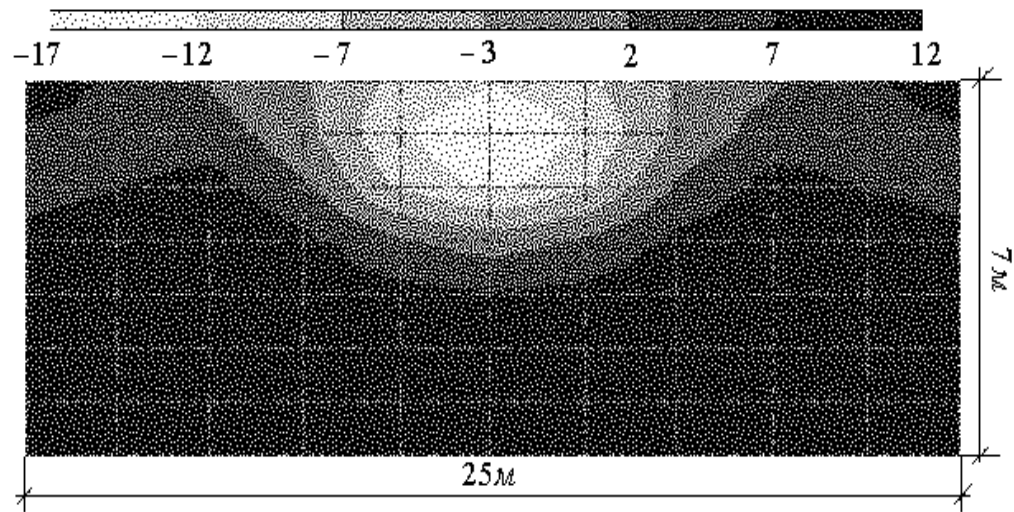


Рис. 5.12. Температурне поле в ґрунтовій основі на глибині 10 метрів після роботи теплового насоса в режимі кондиціонування 3 місяці і в режимі опалення протягом 6 місяців

Температура в основі визначалася як сума розрахованих за формулами (5.8) і (5.46) температур. Для визначення температури на денній поверхні основи прийнято отриману нами аналітичну залежність температури від часу (розділ 3) і дані табл. 5.5.

Викладені у цьому підрозділі матеріали досліджень дають нам змогу зробити такі висновки:

1) розроблено методику розрахунку температурних полів, зумовлених теплообміном між плоскими колекторами теплових насосів та ґрунтовими основами (цей випадок відповідає умовам просторової задачі);

2) показано, що під час роботи теплового насоса в режимі кондиціонування температура основи може істотно відрізнитися від її природних значень (рис. 5.10);

3) встановлено, що під час роботи теплового насоса в режимі опалення температура основи може бути нижчою від температури заморожування води (рис. 5.11). Цей факт має важливе значення у зв'язку з явищем морозного здирання ґрунту [334];

4) виявлено, що під час функціонування теплового насоса в реверсному режимі зміна температурного поля основи менш різка, ніж під час його роботи тільки в режимі кондиціонування або тільки в режимі опалення (рис. 5.12);

5) показано, що в разі використання як теплообмінника плоского колектора теплообмін відбувається у верхній, приповерхневій частині основи (рис. 5.10-5.12). До теплообміну належить частина основи, яка розташована за межами плоского колектора (рис. 5.10-5.12). Цей факт обов'язково необхідно враховувати під час проектування фундаментів будівель і споруд.

5.4.2. Температурне поле в основі *U*-подібного колектора теплового насоса кінцевих розмірів

Розглянемо задачу про розподіл температурних полів у основі чотирьох *U*-подібних колекторів, довжина яких дорівнює 25 м, що працюють у режимах кондиціонування, опалення, а також у реверсному режимі плоского теплового насоса (рис. 5.13). Як вихідні приймемо викладені в розділі 3.1 дані.

Розглянутий у цьому підрозділі випадок відрізняється від викладеного в підрозділі (5.4.1) за такими параметрами:

1) оскільки в цьому випадку розглядаються *U*-подібні колектори визначеної довжини, ми маємо справу не з плоскою, а з просторовою завданням;

2) оскільки в цьому випадку температурне поле змінюється не тільки в плані, але і по глибині, то треба враховувати зміни температурного поля, зумовлені коливаннями температури на денній поверхні основи так, як це ми зробили під час виконання викладених у підрозділі 5.4.1 матеріалів досліджень.

Тому в цьому разі як вихідні потрібно прийняти наведені в розділі 3 дані.

Далі розрахуємо теплове поле в ґрунтовій основі *U*-подібного зонда завдовжки h і радіусом R . У такому разі не враховуватимемо зумовлені природними умовами коливання температури. Як фундаментальне використовуємо отримане нами рішення.

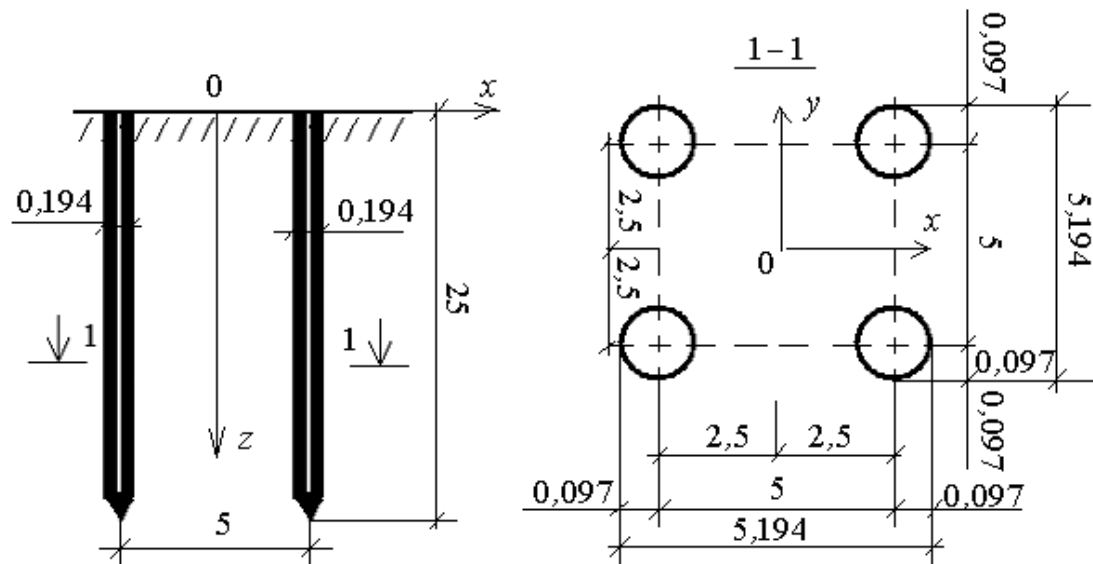


Рис. 5.13. До розрахунку теплового поля в основі чотирьох U -подібних зондів. Примітка. Розміри подані в метрах

Далі покладемо $dQ = q_w(\tau) \cdot r_1 \cdot dr_1 \cdot d\xi$, а замість радіуса r основимо різницю відстаней між радіусом r_1 , на відстані якого від центру знаходиться розглянута точка і радіусом r , на відстані якого від центру проводиться розрахунок температурного поля. Після цього проінтегруємо отриманий таким чином вираз у межах $\xi \in (0, h)$ і $r_1 \in (0, R)$. Отримаємо:

$$T_U(r, z, t) = \int_0^h \left\langle \int_0^R \int_0^t \{k(\tau) \cdot f_0 \cdot [f_1 - f_2] \cdot d\tau\} \cdot r_1 \cdot dr_1 \right\rangle d\xi;$$

$$f_0 = \exp \left[-\frac{(r - r_1)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right];$$

$$f_1 = \exp \left[-\frac{(z - \xi)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right];$$

$$f_2 = \exp \left[-\frac{(z + \xi)^2}{4 \cdot a \cdot (t - \tau)} \right];$$

$$k(\tau) = \frac{q_w(\tau)}{\rho \cdot c_p \cdot \sqrt{(\pi \cdot a \cdot \tau)^3}}.$$

Виконавши інтегрування, знайдемо остаточно:

$$\left. \begin{aligned}
 T_U(r, z, t) &= \int_0^t k(t, \tau) \cdot [f_1 \cdot (f_2 + f_3) + f_4 \cdot (f_5 + f_6)] \cdot (f_7 + f_8 + f_9) d\tau; \\
 f_1 &= 2 \cdot a \cdot (t - \tau); \\
 f_2 &= \exp\left(-\frac{r^2}{a_1}\right); \\
 f_3 &= -\exp\left[-\frac{(R-r)^2}{a_1}\right];
 \end{aligned} \right\} (5.47)$$

$$\left. \begin{aligned}
 f_4 &= r \cdot \sqrt{\pi \cdot a \cdot (t - \tau)}; \\
 f_5 &= \operatorname{erf}\left(\frac{r}{\sqrt{a_1}}\right); \\
 f_6 &= \operatorname{erf}\left(\frac{R-r}{\sqrt{a_1}}\right); \\
 f_7 &= -\operatorname{erf}\left(\frac{z-h}{\sqrt{a_1}}\right); \\
 f_8 &= -\operatorname{erf}\left(\frac{z+h}{\sqrt{a_1}}\right); \\
 f_9 &= \operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{a_1}}\right); \\
 a_1 &= 4 \cdot a \cdot (t - \tau) \\
 k(t, \tau) &= \frac{q_w(\tau)}{8 \cdot \rho \cdot c_p \cdot a \cdot (t - \tau) \sqrt{\pi}}.
 \end{aligned} \right\} (5.48)$$

Далі перейдемо до декартової системі координат. Для цього покладемо в

$$(5.48) \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} . \text{ Маємо:}$$

$$T_U(x, y, z, t) = \int_0^t k(t, \tau) \cdot \left[\begin{array}{l} f_1 \cdot (f_2 + f_3) + \\ + f_4 \cdot (f_5 + f_6) \end{array} \right] \cdot (f_6 + f_6 + f_6) d\tau; \quad (5.49)$$

$$f_1 = 2 \cdot a \cdot (t - \tau);$$

$$f_2 = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{a_1}\right);$$

$$f_3 = -\exp\left[-\frac{\left(R - \sqrt{x^2 + y^2}\right)^2}{a_1}\right];$$

$$f_4 = r \cdot \sqrt{\pi \cdot a \cdot (t - \tau)};$$

$$f_5 = \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{a_1}}\right);$$

$$f_6 = \operatorname{erf}\left(\frac{R - \sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{a_1}}\right);$$

$$f_7 = -\operatorname{erf}\left(\frac{z - h}{\sqrt{a_1}}\right);$$

$$f_8 = -\operatorname{erf}\left(\frac{z + h}{\sqrt{a_1}}\right);$$

$$f_9 = \operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{a_1}}\right);$$

$$a_1 = 4 \cdot a \cdot (t - \tau)$$

$$k(t, \tau) = \frac{q_w(\tau)}{8 \cdot \rho \cdot c_p \cdot a \cdot (t - \tau) \sqrt{\pi}}.$$

(5.50)

Температуру основи в розрахунковій точці основи з координатами (x, y, z) знайдемо як суму

$$T(x, y, z, t) = T_U(x, y, z, t) + T(z, t). \quad (5.51)$$

Тут $T_U(x, y, z, t)$ – температура в точці основи з координатами (x, y, z) в момент часу t , зумовлена теплообміном основи з U -подібним зондом (її потрібно розраховувати з використанням формул (5.51)), а $T(z, t)$ – температура на глибині z у момент часу t , зумовлена теплообміном основи з навколишнім середовищем).

Під час чисельного експерименту ми використали залежності питомої енергії U -подібного зонда від часу (66).

На основі отриманих таким чином даних побудовано ізополя температур у ґрунтовій основі для таких варіантів використання теплових насосів:

- тепловий насос працює лише в режимі кондиціонування три місяці з початку червня по кінець серпня (рис. 5.14);

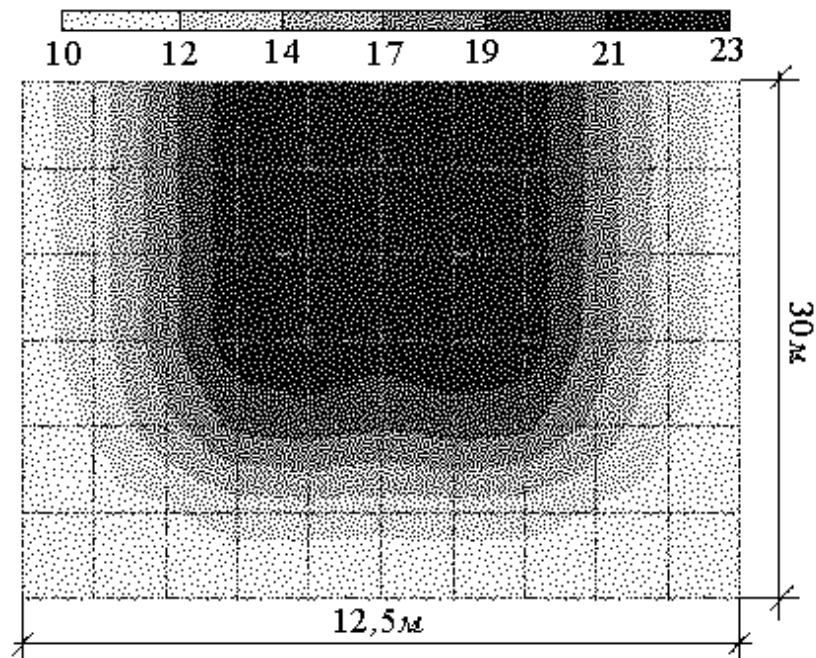


Рис. 5.14. Температурне поле в ґрунтовій основі, зумовлене теплообміном чотирьох U -подібних зондів з основою під час роботи теплового насоса в режимі кондиціонування протягом 3 місяців

- тепловий насос працює тільки лише в режимі опалення шість місяців з початку листопада по кінець березня (рис. 5.15);

- тепловий насос працює в реверсному режимі (тобто в режимі кондиціювання три місяці з початку червня по кінець серпня і в режимі опалення – шість місяців з початку листопада по кінець березня (рис. 5.16).

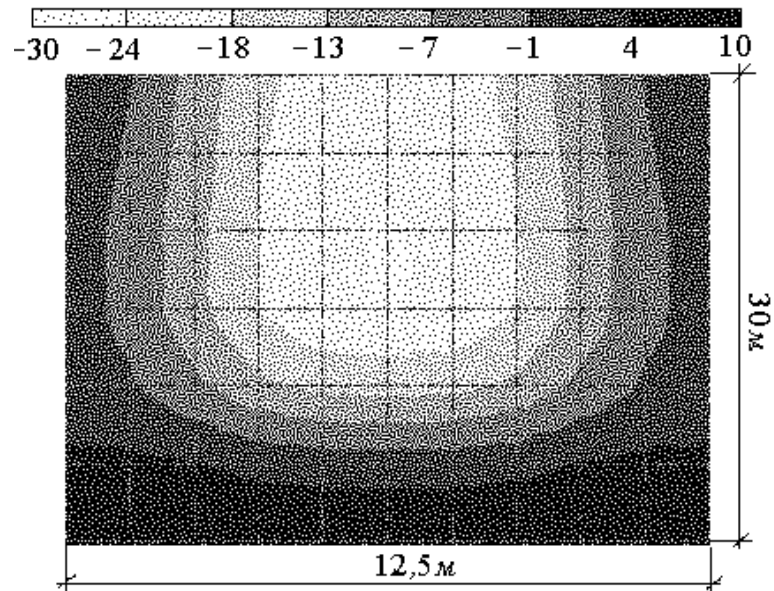


Рис. 5.15. Температурне поле в ґрунтовій основі, зумовлене теплообміном чотирьох U -подібних зондів з основою під час роботи теплового насоса в режимі опалення протягом 6 місяців

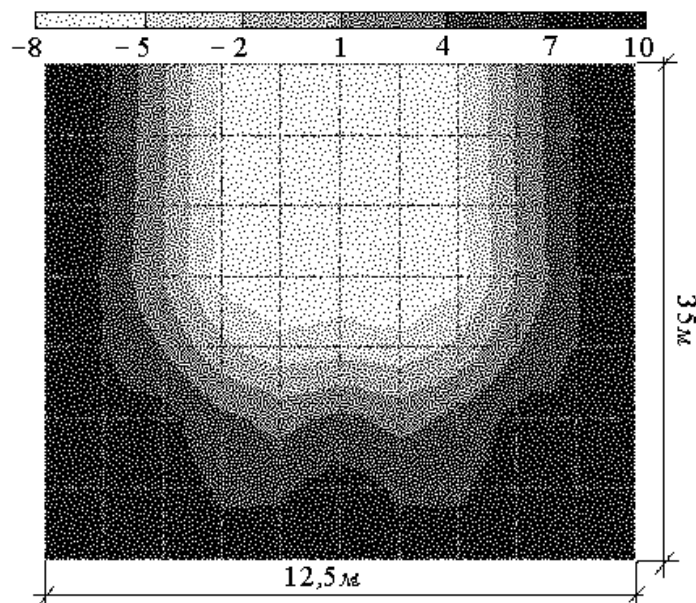


Рис. 5.16. Температурне поле в ґрунтовій основі, зумовлене теплообміном чотирьох U -подібних зондів з основою під час роботи теплового насоса в ре-

жимі кондиціонування протягом 3 місяців і в режимі опалення протягом 6 місяців

Викладені у цьому розділі матеріали досліджень дали можливість зробити такі висновки:

1) розроблено методику розрахунку температурних полів, зумовлених теплообміном між U -подібними зондами теплових насосів та ґрунтовими основами, під час обліку сезонних змін температури на поверхні ґрунту;

2) показано, що під час роботи теплового насоса в режимі кондиціонування температура основи може перевищувати її природні сезонні значення (рис. 5.14);

3) встановлено, що під час роботи теплового насоса в режимі опалення температура основи може бути нижчою від температури заморожування води (рис. 5.15). Цей факт має важливе значення під час проектування фундаментів і підземних споруд у зв'язку з явищем морозного здимання ґрунту [44, 46, 58, 59, 62, 83, 84, 100, 153, 165, 167, 171–173, 175, 184, 202];

4) виявлено, що теплові поля під час роботи теплового насоса в режимі опалення і в реверсному режимі відрізняються один від одного (рис. 5.15 та 5.16);

5) встановлено, що під час функціонування U -подібних зондів у теплообмін залучаються значні обсяги ґрунту. Цей факт обов'язково необхідно враховувати під час проектування основ фундаментів будівель і споруд.

5.5. Облік нелінійних ефектів

Теплофізичні властивості ґрунту і порової рідини не є константами, а залежать від температури [328, 330-332, 335, 329, 347-349, 352].

Особливо яскраво це явище виражено під час фазових переходів води (тобто її заморожування-розморожування).

Тому в цьому розділі подано матеріали досліджень, спрямованих на вирішення цієї проблеми.

Проблему побудови наближених розв'язків нелінійних задач теплопровідності (у загальному випадку тепломасопереносу) досліджено у великій кількості робіт, у яких використовуються, переважно, чисельні методи кінцевих різниць і елементів у поєднанні з процесом ітерації [16, 90, 121, 122, 134, 140–143, 147, 149, 151, 152, 193, 223, 228, 229, 246, 255, 264, 279, 282, 314, 320, 343].

Усі ці підходи дуже громіздкі і потребують спеціальної підготовки даних.

У зв'язку з цим для вирішення нелінійних задач теплопровідності пропонується розроблений спільно з А. В. Шаповалом та В. Г. Шаповалом підхід, ідея якого полягає в комбінації методів колокації і процесу ітерації Пікара.

Для зручності викладу матеріалу розглянемо двовимірний випадок задачі.

Суть алгоритму

1. Нехай необхідно вирішити нелінійне рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho(T) \cdot c_p(T)} \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right] \right\}, \quad (5.52)$$

де T – температура; $\rho(T), c_p(T), \lambda(T)$ – теплофізичні властивості основи, які є функціями температури T ; x, y – координати; t – час.

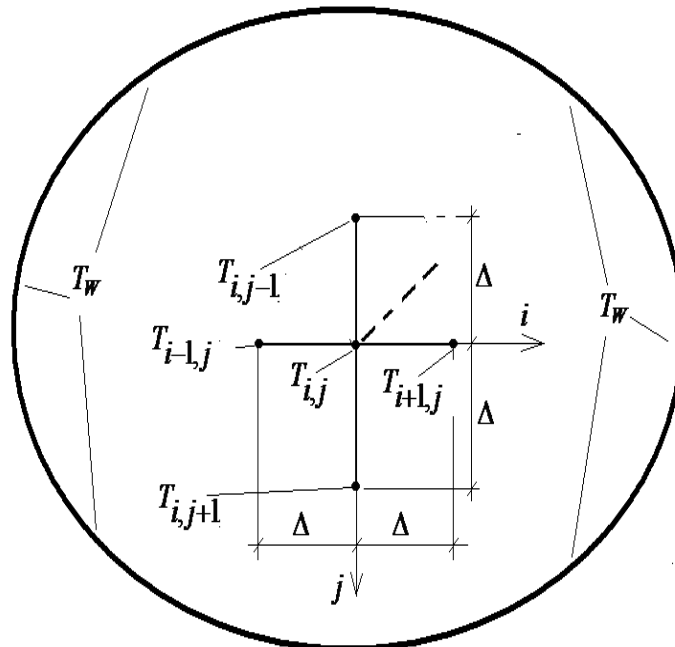


Рис. 5.17. Кінцево-різницева схема основи

2. Праву частину рівності (5.52) треба замінити кінцевими різницями так, як це показано на рис. 5.17, а в лівій частині залишити безперервні функції:

$$\frac{\partial T_{i,j}}{\partial t} = \frac{1}{\rho(T_{i,j}) \cdot c_p(T_{i,j})} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\Delta x} \left[\lambda \left(\frac{(T_{i+1,j}) + (T_{i,j})}{2} \right) \cdot \frac{(T_{i+1,j}) - (T_{i,j})}{\Delta x} - \right. \\ \left. \lambda \left(\frac{(T_{i,j}) + (T_{i-1,j})}{2} \right) \cdot \frac{(T_{i,j}) - (T_{i-1,j})}{\Delta x} \right] + \\ \frac{1}{\Delta y} \left[\lambda \left(\frac{(T_{i+1,j}) + (T_{i,j})}{2} \right) \cdot \frac{(T_{i+1,j}) - (T_{i,j})}{\Delta y} - \right. \\ \left. \lambda \left(\frac{(T_{i,j}) + (T_{i-1,j})}{2} \right) \cdot \frac{(T_{i,j}) - (T_{i-1,j})}{\Delta y} \right] \end{array} \right\}. \quad (5.53)$$

Для всієї розрахункової області маємо:

$$\frac{d \vec{T}_{i,j}}{d t} = a_{i,j} [\rho(T_{i,j}) \cdot c_p(T_{i,j}), t, T] \quad (5.54)$$

Далі проінтегруємо (5.52) за змінною 't'. Маємо

$$\vec{T}_{i,j}(t) = \vec{T}_{i,j}(0) + \int_0^t a_{i,j} [\rho(T_{i,j}) \cdot c_p(T_{i,j}), t, T] \cdot dt, \quad (5.55)$$

де $\vec{T}_{i,j}(t)$ – вектор температур у розглянутому вузлі в момент часу t ,

де $\vec{T}_{i,j}(0)$ – вектор температур у розглянутому вузлі в момент часу $t=0$.

Далі для вирішення системи рівнянь (5.54) використовуємо процес Пікара. Маємо

$$\begin{aligned}
\vec{T}_{i,j}(t) = & \vec{T}_{i,j}(0) + |a_{i,j}[\rho(T_{i,j}) \cdot c_p(T_{i,j}, t, T)] \cdot t + |a_{i,j}[\rho(T_{i,j}) \cdot c_p(T_{i,j}, t, T)]^2 \cdot \frac{t^2}{2!} + \\
& + |a_{i,j}[\rho(T_{i,j}) \cdot c_p(T_{i,j}, t, T)]^3 \cdot \frac{t^3}{3!} + |a_{i,j}[\rho(T_{i,j}) \cdot c_p(T_{i,j}, t, T)]^4 \cdot \frac{t^4}{4!} + \\
& + |a_{i,j}[\rho(T_{i,j}) \cdot c_p(T_{i,j}, t, T)]^5 \cdot \frac{t^5}{5!} + |a_{i,j}[\rho(T_{i,j}) \cdot c_p(T_{i,j}, t, T)]^6 \cdot \frac{t^6}{6!} + \dots
\end{aligned} \tag{5.56}$$

Цей процес збігається за будь-якого обмеженого значення канонічної м-норми, яка розташована в правій частині (5.53) матриці.

Якщо, як початкове наближення взяти вирішення завдання в лінійній постановці, то процес збігається на 2-5 ітерації.

Висновки

Загалом викладені в цьому розділі матеріали досліджень дали нам можливість зробити такі висновки:

- 1) отримано аналітичне рішення задачі про визначення розподілу температури в ґрунтовій основі, зумовленому її сезонною зміною на денній поверхні;
- 2) одержано фундаментальне рішення, що дає змогу визначати розподіл теплових полів, зумовлених теплообміном ґрунтової основи з плоским колектором теплового насоса. Це рішення допомагає будувати теплові поля за будь-якої форми теплового насоса в плані;
- 3) отримано фундаментальне рішення, що дає змогу визначати розподіл теплових полів, зумовлених теплообміном ґрунтової основи з об'ємним колектором теплового насоса. Це рішення дає можливість будувати теплові поля за будь-якої форми теплового насоса в просторі;
- 4) виконано аналіз розмірностей отриманих нами рішень;
на конкретних прикладах проілюстрована техніка використання отриманих нами рішень;
- 5) отримані нами результати узагальнені на випадок фізично нелінійних рівнянь теплопровідності.

РОЗДІЛ 6.

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ДЕФОРМУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД, ЗУМОВЛЕНИХ ЇХНІМ ЗАМОРОЖУВАННЯМ-РОЗМОРОЖУВАННЯМ ЗА РАХУНОК ТЕПЛООБМІНУ З КОЛЕКТОРАМИ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ

Згідно з даними авторів [202] «Важливою особливістю системи збору низько потенційного тепла ґрунту є формування навколо труб ґрунтового теплообмінника зон з від'ємною температурою. У ґрунтах, що містять рідку фазу, відбуваються зміни агрегатного стану вологи, що викликає зміни напруженого стану замерзлого ґрунту за рахунок збільшення його об'єму».

Залежно від розмірів зони замерзлого ґрунту, глибини її залягання та конфігурації можливі деформації ґрунтової товщі. Розділ має таку структуру.

У підрозділі 6.1 зазначено матеріали аналізу наявної на тепер методики визначення деформацій здимання ґрунту, зумовленого теплообміном колекторів теплових насосів з гірською породою та виявлено її основні переваги і недоліки.

У підрозділі 6.2 наведено рішення фундаментальної задачі про напружено-деформований стан півпростору, всередині якого розташоване точкове джерело тиску.

У підрозділі 6.3 викладено методику і результати складання розрахункових таблиць, призначених для визначення напружено-деформованого стану загалом і вертикальних деформацій основ, у яких наявні деформації здимання, зумовлені теплообміном колекторів теплових насосів з гірською породою.

У підрозділі 6.4. викладено рекомендовану нами техніку визначення деформацій здимання.

Наприкінці подано висновки до розділу.

6.1. Сучасні методи визначення деформацій здимання ґрунту, зумовлених заморожуванням-розморожуванням основи за рахунок теплообміну з колекторами теплових насосів. Їхні переваги і недоліки

Згідно з [202] під час розрахунку деформацій здимання, зумовлених теплообміном колектора теплового насоса, необхідно використовувати наведену на рис. 6.1. розрахункову схему.

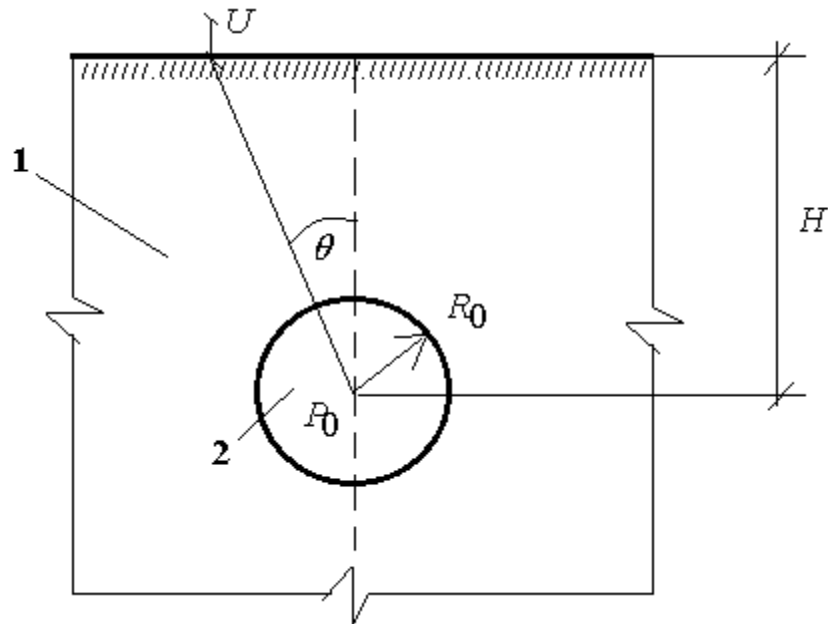


Рис. 6.1. До визначення вертикального переміщення, зумовленого морозним здиманням ґрунту: 1 – не замерзла ділянка породи; 2 – те саме, замерзла

Припускають, що всередині лінійно-деформованого напівпростору на відстані H від межі розміщена сферична ділянка радіусом R_0 , у середині якої прикладений тиск P_0 .

Вертикальної переміщення денної поверхні основи, зумовлене заморожуванням порової рідини в результаті теплообміну колектора теплового насоса з гірською породою, треба визначати з використанням формули:

$$U = \frac{\left(P_0 R_0 (1 + \nu) \cos^3 \theta \right)}{EH} \quad (6.1)$$

де U – вертикальне переміщення вільної горизонтальної поверхні в системі координат, центр якої збігається з центром сфери, що задається рівнянням; E , ν –

відповідно модуль загальної деформації і коефіцієнт Пуассона ґрунтового масиву; θ – полярний кут, що відраховується від вертикалі.

Горизонтальна координата точок вільної поверхні дорівнює:

$$Y = Htg\theta . \quad (6.2)$$

Значення тиску P_0 знаходять з умови, що масив ґрунту, обмежений радіусом R_0 , переходить з талого в мерзлий стан за умови його вільного розширення до об'єму ΔV .

Відносний приріст радіусу сфери $\Delta R_0 = \Delta V/3$.

Величину тиску необхідно визначати за тієї умови, що під впливом внутрішнього тиску всередині сфери P_0 початковий радіус R_0 зміниться до величини R_* .

Цей радіус відповідає деформації замерзлого ґрунту, на який передано тиск P_0 , за початкового радіуса, що дорівнює:

$$\frac{R_0(1 + \Delta V)}{3} . \quad (6.3)$$

Для нескінченної сферичної ділянки маємо:

$$R_* = R_0 \left\{ \frac{1 + [P_0(1 + \nu)]}{2E} \right\} . \quad (6.4)$$

Для кулькової області замерзлого ґрунту маємо:

$$R_* = R_0 \left\{ \frac{1 - [P_0(1 - 2\nu_m)]}{E_m} \right\} \cdot \left(\frac{1 + \Delta V}{3} \right) \quad (6.5)$$

Тут E_m – модуль загальної деформації замерзлого ґрунту; ν_m – коефіцієнт Пуассона.

Тиск P_0 необхідно визначати за формулою:

$$P_0 = \frac{\Delta V}{\left\{ \frac{3[(1 + \nu)]}{2E} + \frac{(1 - 2\nu_m)}{E_m} \right\}} \quad (6.6)$$

Оскільки модуль деформації замерзлого ґрунту E_m значно перевищує модуль загальної деформації його незамерзлої частини E , можна наближено подати:

$$P_0 = \left[\frac{2E}{(1+\nu)} \right] \left[\frac{\Delta V}{3} \right], \quad (6.7)$$

Приріст обсягу ґрунту, зумовленого заморожуванням порової рідини, необхідно визначати за формулою:

$$\Delta V = \frac{0,1e}{(1+e)} \quad (6.8)$$

де e – коефіцієнт пористості ґрунту.

Далі досліджуємо розмірності, що входять до складу розрахункової формули (6.1)-(6.8) параметрів і комплексів (табл. 6.).

Таблиця 6.1

Розмірності величин, комплексів і функцій, що входять до складу формули (5.7)

№ з/п	Назва	Позначення	Одиниці вимірювання
1	глибина	H	м
2	радіус	R	м
3	вертикальне і горизонтальне переміщення денної поверхні	U, Y	м
4	модуль загальної деформації ґрунту	E	МПа
5	коефіцієнт Пуассона ґрунту	ν	ч.од.
6	модуль загальної деформації замерзлого ґрунту	E_m	МПа
7	коефіцієнт Пуассона замерзлого ґрунту	ν_m	ч.од.
8	полярний кут	θ	Радіани
9	коефіцієнт пористості	e	ч.од.
10	відносне збільшення обсягу	$\Delta V = \frac{0,1 \cdot e}{(1+e)}$	ч.од.

11	тиск	$P_0 = \left[\frac{2 \cdot E}{(1 + \nu)} \right] \cdot \left[\left(\frac{\Delta V}{3} \right) \right],$	МПа
12	тиск	$P_0 = \frac{\Delta V}{\left\{ \frac{3 \cdot [(1 + \nu)]}{2 \cdot E} + \frac{(1 - 2 \cdot \nu_m)}{E_m} \right\}}.$	МПа
13	радіус	$R_* = R_0 \cdot \left\{ \frac{1 - [P_0 \cdot (1 - 2 \cdot \nu_m)]}{E_m} \right\} \cdot \left(\frac{1 + \Delta V}{3} \right).$	м
14	горизонтальне переміщення	$Y = H \cdot \operatorname{tg} \theta,$	м
15	вертикальне переміщення	$U = \frac{(P_0 \cdot R_0 \cdot (1 + \nu) \cdot \cos^3 \theta)}{EH},$	ч.од.

Так, формула, запропонована в нормативному документі [202] для визначення вертикального переміщення, має внутрішню суперечність: пропонується горизонтальні переміщення морозного здимання вимірювати в метрах, а вертикальні – в частках одиниці.

Крім того, до її недоліків і недоробок варто зарахувати:

- неможливість урахування впливу на деформації здимання фактичного значення об'ємної деформації замерзлого ґрунту;
- той факт, що замерзла ділянка ґрунту може істотно відрізнятись від сферичної.

На вирішення цієї проблеми і спрямовані викладені в розділах 6.2 і 6.3 матеріали досліджень.

6.2. Напружено-деформований стан півпростору, всередині якого розташоване точкове джерело тиску

Проблема адекватного визначення НДС ґрунтових основ дуже актуальна під час проектування методом заморожування протифільтраційних завіс, про-

кладення у водонасичених ґрунтах колекторів теплових насосів, високонапірного ін'єктування основ, здимання гірських порід [123, 307, 297, 299].

Сьогодні під час визначення НДС ґрунтових основ широко застосовують підхід, оснований на використанні т. зв. фундаментальних рішень і принципі суперпозиції.

Зокрема, чинні в цей час норми ґрунтуються на розрахункових таблицях, побудованих з використанням фундаментальних рішень А. Буссінеска, М. Фламана, А. Миндлина, І. Ченя тощо [20, 62, 64, 65, 69, 70, 83, 101-103, 167, 212, 238, 240, 241, 250, 267, 284, 293].

У такому разі немає фундаментального рішення задачі, що дає змогу визначати НДС ґрунтових основ, зумовленого в них фазовими переходами (наприклад, заморожуванням порової рідини).

На рішення цієї проблеми спрямовані викладені нижче матеріали досліджень.

Під час написання цього розділу ставилася мета отримати точне аналітичне рішення задачі про визначення НДС пружного невагомого півпростору, всередині якого внаслідок об'ємної деформації виникло джерело тиску. Фізична природа виникнення цього джерела може бути якою завгодно, важливо лише, щоб у розглянутій точці, був надлишковий тиск.

Завдання досліджень було сформульовано так:

1) відомі деформаційні властивості ґрунтової основи (тобто його модуль деформації E і коефіцієнт Пуассона ν або т. зв. константи Ламі λ і G);

2) відомі координати джерела тиску (для визначеності покладемо в циліндричній системі координат з центральною симетрією глибину розташування джерела $z = \xi$ і радіус $r = 0$; рис. 6.2).

3) відомі зумовлені фазовим переходом (наприклад, заморожуванням порової рідини) відносні деформації основи $\varepsilon_{z,1}$ и $\varepsilon_{r,1}$ (у цій роботі передбачається, що $\varepsilon_{z,1} = \varepsilon_{r,1} = \varepsilon_0$);

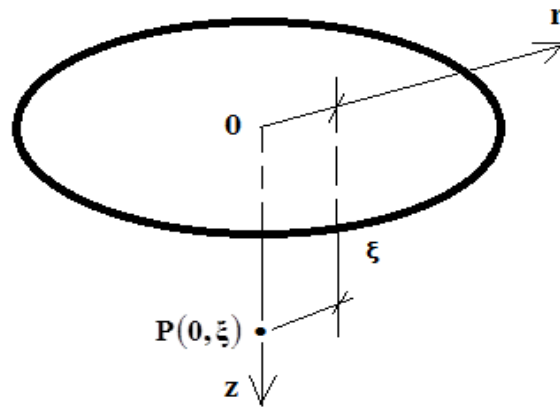


Рис. 6.2. Визначення НДС основи, зумовленого фазовими переходами

4) відомі деформаційні властивості точки ґрунтової основи, в якій наявний фазовий перехід (тобто його модуль деформації E_1 і коефіцієнт Пуассона ν_1 або т. зв. константи Ламі λ_1 і G_1);

5) на верхній межі півпростору немає нормальних і дотичних напружень;

6) за необмеженого зростання глибини напруження і деформації прямують до нуля.

Потрібно визначити, чи виникли в основі напруження і деформації (тобто його НДС) в результаті дії джерела тиску.

Розглянемо ґрунтову основу, в якій у точці діє зумовлене заморожуванням порової рідини джерело тиску (рис. 6.2).

Тиск, зумовлений фазовим переходом порової рідини, дорівнює:

$$P(r, z) = \varepsilon_0 \cdot (3 \cdot \lambda_1 + 2 \cdot G_1) \cdot \frac{\delta(r)}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \delta(z - \xi), \quad (6.9)$$

де $P(r, z)$ – тиск у розглянутій точці; ε_0 – об'ємна деформація основи, зумовлена заморожуванням порової рідини (має розмірність $[m^3]$); λ_1 і G_1 – пружні константи Ламі замерзлої ділянки основи; r і z – координати; ξ – глибина, на якій розташоване джерело тиску; $\delta(x)$ – дельта-функція Дірака [30, 96, 206].

Для визначення НДС основи використовуємо відому систему рівнянь:

$$\begin{aligned}
& (\lambda + 2 \cdot G) \cdot \frac{\partial e}{\partial r} + 2 \cdot G \cdot \frac{\partial \omega}{\partial z} = \frac{\partial P}{\partial r}; \\
& (\lambda + 2 \cdot G) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} - \frac{2 \cdot G}{r} \cdot \frac{\partial(\omega \cdot r)}{\partial r} = \frac{\partial P}{\partial z}; \\
& \frac{\partial P}{\partial t} = c_v \cdot \Delta P - \frac{\beta}{3} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \sigma_{kk}; \\
& \sigma_{zz} = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_z + \lambda \cdot e - P; \\
& \sigma_{rr} = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_r + \lambda \cdot e - P; \\
& \sigma_{\theta\theta} = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_\theta + \lambda \cdot e - P; \\
& \tau_{rz} = G \cdot \gamma_{rz}; \\
& \varepsilon_r = \frac{\partial U}{\partial r}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial W}{\partial z}; \quad \varepsilon_\theta = \frac{U}{r}; \\
& \omega = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial r} \right); \quad \gamma_{rz} = \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial r}; \quad e = \varepsilon_r + \varepsilon_z + \varepsilon_\theta; \\
& \sigma_{kk} = \sigma_{zz} + \sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta} = (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot e - 3 \cdot P.
\end{aligned} \tag{6.10}$$

Тут U і W – переміщення відповідно в напрямку координатних осей Or і Oz ; ω – обертання; r і z – координати; λ і G – константи Ламі основи; c_v – коефіцієнт просторової консолідації; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа в циліндричній системі координат під час обліку осьової симетрії; σ_{zz} , σ_{rr} і $\sigma_{\theta\theta}$ – нормальні напруження; τ_{rz} – те саме, дотичне; σ_{kk} – кульовий тензор напружень; P – тиск; ε_{zz} , ε_{rr} і $\varepsilon_{\theta\theta}$ – нормальні деформації; γ_{rz} – те саме, дотична [30, 94, 96, 206, 281].

З урахуванням того, що поровий тиск відомий заздалегідь і не залежить від часу, див. (6.9), (6.10), маємо:

$$(\lambda + 2 \cdot G) \cdot \frac{\partial e}{\partial r} + 2 \cdot G \cdot \frac{\partial \omega}{\partial z} = \frac{\partial P}{\partial r};$$

$$(\lambda + 2 \cdot G) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} - \frac{2 \cdot G}{r} \cdot \frac{\partial(\omega \cdot r)}{\partial r} = \frac{\partial P}{\partial z}; \quad (6.11)$$

$$\sigma_{zz} = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_z + \lambda \cdot e - P; \quad \sigma_{rr} = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_r + \lambda \cdot e - P;$$

$$\sigma_{\theta\theta} = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_\theta + \lambda \cdot e - P; \quad \tau_{rz} = G \cdot \gamma_{rz};$$

$$\varepsilon_r = \frac{\partial U}{\partial r}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial W}{\partial z}; \quad \varepsilon_\theta = \frac{U}{r};$$

$$\omega = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial r} \right); \quad \gamma_{rz} = \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial r}; \quad e = \varepsilon_r + \varepsilon_z + \varepsilon_\theta;$$

$$\sigma_{kk} = \sigma_{zz} + \sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta} = (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot e - 3 \cdot P.$$

Тут $\frac{\partial P}{\partial z}$ і $\frac{\partial P}{\partial r}$ – проєкції тиску на координатні осі.

Згідно з [281] загальне рішення системи рівнянь (6.11) має вигляд:

$$U = \frac{\partial}{\partial r} \Phi - \frac{\partial^2}{\partial r \partial z} F;$$

$$W = \frac{\partial}{\partial z} \Phi + \frac{\lambda + 2 \cdot G}{\lambda + G} \cdot \Delta F - \frac{\partial^2}{\partial z^2} F;$$

$$\Delta^2 F = 0; \quad P = (\lambda + 2 \cdot G) \cdot \Delta \Phi. \quad (6.12)$$

Тут F і Φ – деякі функції координат.

Для побудови власного рішення системи рівнянь (6.11) до неї треба приєднати граничні умови. Оскільки на верхній межі основи немає зовнішніх навантажень, а на нескінченності зусилля і деформації прямують до нуля, граничні умови мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{zz}(0, r) = 0; \quad \tau_{zz}(0, r) = 0; \\ U(\infty, r) = U(z, \infty) = 0; \quad W(\infty, r) = W(z, \infty) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (6.13)$$

Рішення (6.2.4) шукаємо у вигляді:

$$F = \int_0^\infty J_0(\alpha \cdot r) \cdot F^*(\alpha, z) \cdot \alpha \cdot d\alpha \quad \text{і} \quad \Phi = \int_0^\infty J_0(\alpha \cdot r) \cdot \Phi^*(\alpha, z) \cdot \alpha \cdot d\alpha, \quad (6.14)$$

де $J_0(\alpha \cdot r)$ – функція Бесселя першого роду з нульовим індексом, а $F^*(\alpha, z)$ і $\Phi^*(\alpha, z)$ – що підлягають визначенню функції параметра α і координати z [30, 94, 96, 206, 281]. З математичного погляду рівності (6.14) є оригіналом функцій $F(r, z)$ і $\Phi(r, z)$, встановлених з використанням їхніх зображень у сенсі Ганкеля $F^*(\alpha, z)$ і $\Phi^*(\alpha, z)$ і за параметром α [30, 94, 96, 206, 281].

Далі подамо (6.9) у формі (6.14). Для цього спочатку з використанням перетворення Ганкеля знайдемо зображення (6.9) по змінній « α », а потім з використанням отриманого таким чином зображення знайдемо його оригінал. Маємо:

$$P(r, z) = \varepsilon_0 \cdot (3 \cdot \lambda_1 + 2 \cdot G_1) \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \delta(z - \xi) \cdot \int_0^{\infty} J_0(\alpha \cdot r) \cdot \alpha \cdot d\alpha. \quad (6.15)$$

З урахуванням (6.9), (6.12), (6.14), (6.15) і граничних умов (6.13) функції Φ і F дорівнюють:

$$\left. \begin{aligned} \Phi(r, z) &= \frac{k}{4 \cdot ak \cdot \pi} \cdot \int_0^{\infty} J_0(\alpha \cdot r) \cdot \left\{ U(\xi - z) \cdot \begin{bmatrix} e^{\alpha \cdot (\xi - z)} - \\ -e^{\alpha \cdot (-\xi + z)} \end{bmatrix} - e^{\alpha \cdot (\xi - z)} \right\} \cdot d\alpha; \\ F(r, z) &= \frac{k}{4 \cdot \pi \cdot ak \cdot (\lambda + G)} \cdot \int_0^{\infty} \frac{J_0(\alpha \cdot r)}{\alpha} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} [2 \cdot \alpha \cdot z - 1] \cdot G + \\ + [2 \cdot \alpha \cdot z + 1] \cdot \lambda \end{bmatrix} \cdot e^{-\alpha \cdot (\xi + z)} \right\} \cdot d\alpha; \\ a_k &= \lambda + 2 \cdot G; \\ k &= \varepsilon_0 \cdot (3 \cdot \lambda_1 + 2 \cdot G_1). \end{aligned} \right\} (6.16)$$

Щоб визначити НДС основи, треба з використанням функцій (6.16) і перших двох рівностей (6.12) знайти переміщення основи U і W , а потім з використанням формул (6.11) – шукані напруги і переміщення.

Далі використовуємо отримане раніше фундаментальне рішення для визначення морозного обдимання основи, в якому розташований – подібний колектор теплового насоса (рис. 6.10) [299].

Основи функції (6.16) у друге рівняння (6.12) і обчисливши невластні інтеграли, знайдемо фундаментальне рішення для точкового джерела у вигляді:

$$W(r,z) = \frac{k}{4 \cdot \pi \cdot a_k} \cdot \left\{ \begin{aligned} & \frac{(z + \xi) \cdot (\lambda + 3 \cdot G)}{[(\lambda + G) \cdot [(z + \xi)^2 + r^2]^{\frac{3}{2}} + \frac{z - \xi}{[(z - \xi)^2 + r^2]^{\frac{3}{2}}]} - \\ & \frac{z \cdot [-r^2 + 2 \cdot (z + \xi)^2]}{2 \cdot [(z + \xi)^2 + r^2]^{\frac{5}{2}}} \end{aligned} \right\};$$

$$a_k = \lambda + 2 \cdot G; \quad k = \varepsilon_0 \cdot (3 \cdot \lambda_1 + 2 \cdot G_1).$$

(6.17)

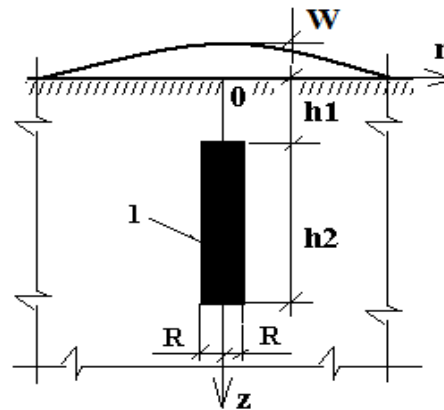


Рис. 6.3. До визначення величини підйому основи, в якому розташований колектор теплового насоса, внаслідок морозного здимання: 1 – зона замерзлого ґрунту

Для того, щоб визначити переміщення денної поверхні основи, необхідно в (6.17) прийняти:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_0 &= \varepsilon \cdot \rho \cdot d\rho \cdot d\varphi \cdot d\xi; \\ r &= r - \rho; \end{aligned} \right\} \quad (6.18)$$

і проінтегрувати отриманий таким чином вираз на інтервалах $\rho \in (0, R)$ і $z \in (h_1, h_2)$. Тут ε – відносна деформація замерзлого ґрунту (змінюється від 1 % до 7 %). Ці інтеграли мають громіздкий вигляд, тому на рис. 6.4 наведені результати чисельного експерименту, виконаного для таких значень параметрів: модуль деформації основи $E = 10$ МПа; те саме, замерзлого ґрунту 10000 МПа;

коефіцієнт Пуассона основи (зокрема замерзлого); $\nu = \nu_1 = 0,35$; $\varepsilon = 3\%$; $R = 15$ см.

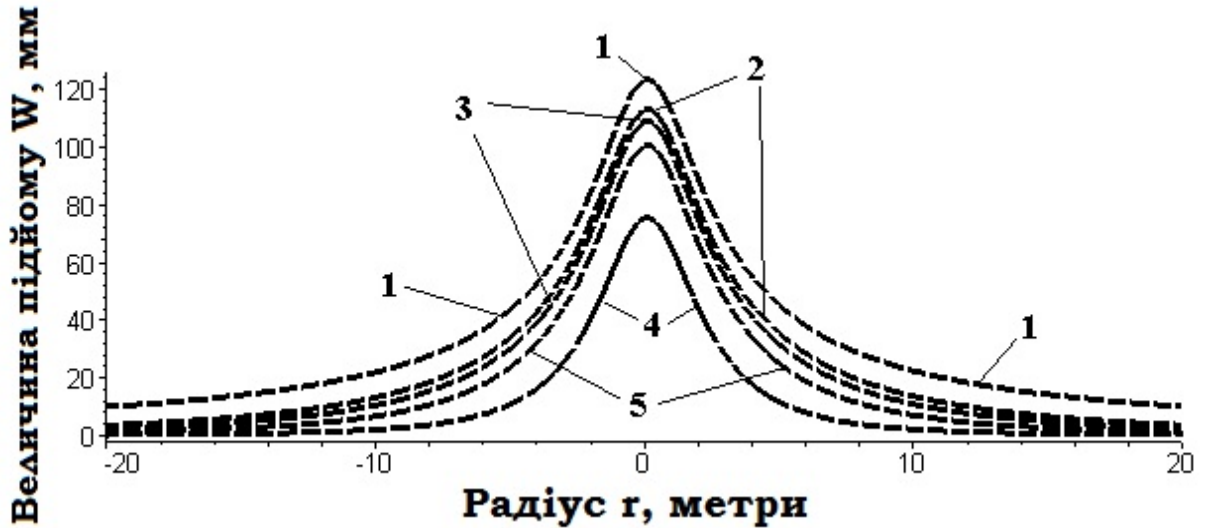


Рис. 6.4. Залежність величини підйому денної поверхні основи W від радіуса r : 1 – довжина льодогрунтового циліндра $h_2 = 100$ м; 2 – також, $h_2 = 20$ м; 2 – також, $h_2 = 15$ м; 2 – також, $h_2 = 10$ м; 2 – також, $h_2 = 5$ м.

Примітки: 1) відстань від верху льодогрунтового циліндра до денної поверхні основи $h_1 = 2$ м; 2) цей рисунок потрібно читати разом з рис. 6.3

З рис. 6.4, зокрема, впливає, що чим більше довжина льодогрунтового циліндра, тим більше величина підйому денної поверхні основи і радіус його поширення.

Загалом викладені в цьому розділі матеріали досліджень дали змогу зробити такі висновки:

1) в аналітичній формі отримано замкнуте рішення фундаментальної задачі про напружено-деформованому стані (НДС) пружного півпростору, всередині якого розташований точкове джерело тиску;

2) з використанням принципу суперпозиції отримане нами фундаментальне рішення використано для визначення величини підйому денної поверхні ґрунтової основи, зумовленого морозним здиманням ґрунту;

3) область застосування отриманих результатів – вирішення завдань щодо визначення НДС ґрунтових основ і гірничих виробок під час їх ін'єктування,

морозного здимання ґрунту, гірських порід, НДС матриці під час росту кристалів з твердої фази і взагалі всіх завдань, у яких всередині півпростору діє джерело тиску, який можна навести у вигляді:

$$P(r, z) = P_0 \cdot \frac{\delta(r)}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \delta(z - \xi). \quad (6.2.11)$$

На закінчення зазначимо, що отримане фундаментальне рішення дасть змогу розширити клас задач про визначення НДС ґрунтових основ завданнями, в яких причиною виникнення напружень і деформацій є фізичні процеси, що перебігають у них і які, наприклад, зумовлені фазовими переходами порової рідини, переходом гірських порід з текучого в твердий стан, високонапірне ін'єктування ґрунту з низьким коефіцієнтом фільтрації тощо.

6.3. Методика і результати складання розрахункових таблиць

Наведене в розділі 6.2 фундаментальне рішення неможливо використовувати для вирішення практичних завдань, оскільки воно відображає відносне переміщення основи в точці.

Для того, щоб отримати фактичне значення переміщення W , отримане в розділі 6.2, фундаментальне рішення W^ϕ треба проінтегрувати за обсягом V :

$$W = \iiint_V W^\phi \cdot dV. \quad (6.19)$$

Під час написання цього розділу була мета скласти розрахункові таблиці, необхідні для визначення морозного здимання ґрунтових основ, які дали б змогу використовувати аналогічну прийнятну в нормативних документах, наукових працях та інженерних методах [28, 29, 34, 48, 49, 52, 54-56, 61, 66-68, 85, 88, 110, 148, 154, 159, 163, 186-188, 195, 234, 235, 237, 256, 258, 269, 271, 276, 310] техніку визначення деформацій ґрунтової основи (тобто метод пошарового підсумовування).

У цьому зв'язку під час складання таблиць визначалися не фактичні переміщення основи, а відносна вертикальна деформація ε_z (тобто похідна вертикального переміщення по координаті z).

Для цього отримане нами фундаментальне рішення потрібно проінтегрувати в межах площі F :

$$\varepsilon_z = \frac{\partial W}{\partial z} = \iint_F W\phi \cdot dF. \quad (6.20)$$

Щоб скласти таблицю, отримане нами фундаментальне рішення спочатку (6.17) подано в декартовій системі координат [306]:

$$W\phi(x, y, z) = \frac{k}{4 \cdot \pi \cdot a_k} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \frac{(3 - 4 \cdot \nu) \cdot (z + \xi)}{\left[(z + \xi)^2 + (x^2 + y^2) \right]^{5/2}} + \\ \frac{(z - \xi)}{\left[(z - \xi)^2 + (x^2 + y^2) \right]^{3/2}} - \\ - 2 \cdot \frac{z \cdot \left[2 \cdot (z + \xi)^2 - (x^2 + y^2) \right]}{\left[(z + \xi)^2 + (x^2 + y^2) \right]^{5/2}} \end{array} \right\} \quad (6.21)$$

$$a_k = \lambda + 2 \cdot G; \quad k = \varepsilon_0 \cdot (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G).$$

Для того, щоб можна було використовувати прийняту в нормативних документах техніку визначення переміщень, таблиці склалися для центральної точки завантаженої ділянки та її кутовий точки.

Розрахункова схема, прийнята під час складання таблиць, зображена на рис. 6.5.

Далі знайдемо диференціал вертикальної відносної деформації:

$$d\varepsilon_z \begin{pmatrix} x, \\ y, \\ z, \\ \chi, \\ \eta, \\ \xi \end{pmatrix} = \frac{k \cdot d\xi \cdot d\eta}{4 \cdot \pi \cdot a_k} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \frac{(3-4 \cdot \nu) \cdot (z + \xi)}{\left[(z + \xi)^2 + (\langle x - \chi \rangle^2 + \langle y - \eta \rangle^2) \right]^{3/2}} + \\ \frac{(z - \xi)}{\left[(z - \xi)^2 + (\langle x - \chi \rangle^2 + \langle y - \eta \rangle^2) \right]^{3/2}} - \\ - 2 \cdot \frac{z \cdot \left[2 \cdot (z + \xi)^2 - (\langle x - \chi \rangle^2 + \langle y - \eta \rangle^2) \right]}{\left[(z + \xi)^2 + (\langle x - \chi \rangle^2 + \langle y - \eta \rangle^2) \right]^{5/2}} \end{array} \right\}$$

$$a_k = \lambda + 2 \cdot G; \quad k = \varepsilon_0 \cdot (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G).$$

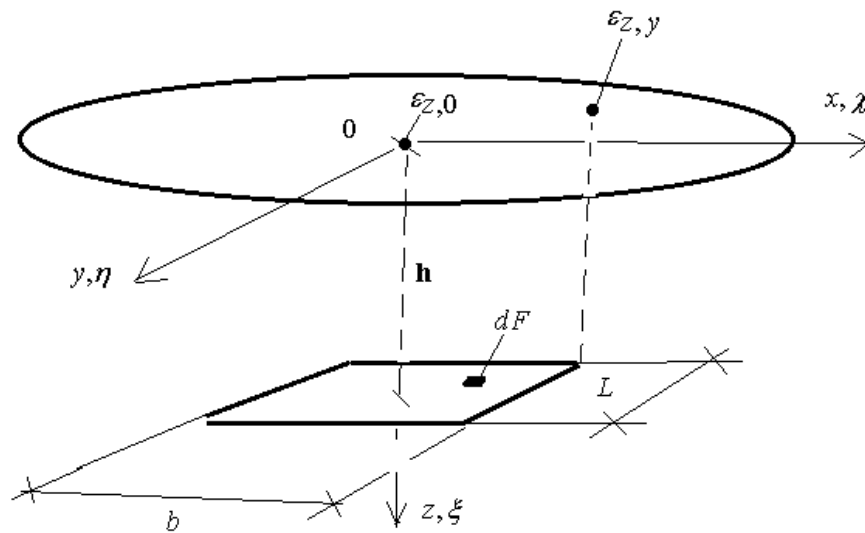


Рис. 6.5. До визначення вертикальної відносної деформації основи, зумовленої морозним здиманням ґрунту

Тут: $\varepsilon_{z,0}$ – вертикальна деформація денної поверхні основи на вертикалі, що проходить через центр замерзлої ділянки; $\varepsilon_{z,y}$ – те саме, на вертикалі, що проходить через її кутову точку.

Далі покладемо в (6.21):

$$\left. \begin{aligned} x &= b \cdot \bar{x}; \\ \chi &= b \cdot \bar{\chi}; \\ y &= L \cdot \bar{y}; \\ z &= \bar{z} \cdot h; \\ \xi &= \bar{\xi} \cdot h \end{aligned} \right\} \cdot \quad (6.22)$$

$$\left. \begin{aligned} d\bar{x} &= b \cdot dx; \\ d\bar{y} &= L \cdot dy \\ n &= \frac{L}{b}; \\ m &= \frac{h}{b}; \\ d\bar{z} &= \frac{ak}{(1-2 \cdot \nu) \cdot k} \end{aligned} \right\} \cdot$$

Маємо

$$d\bar{\varepsilon}_z = \frac{d\bar{\chi} \cdot d\bar{\eta} \cdot n}{4 \cdot \pi \cdot (1-2 \cdot \nu)} \left\{ \begin{aligned} &+ \frac{m \cdot (3-4 \cdot \nu) \cdot (\bar{z} + \bar{\xi})}{\left[m^2 \cdot (\bar{z} + \bar{\xi})^2 + (\bar{x} - \bar{\chi})^2 + n^2 \cdot (\bar{y} - \bar{\eta})^2 \right]^{3/2}} + \\ &+ \frac{m \cdot (z - \xi)}{\left[m^2 \cdot (\bar{z} - \bar{\xi})^2 + (\bar{x} - \bar{\chi})^2 + n^2 \cdot (\bar{y} - \bar{\eta})^2 \right]^{3/2}} - \\ &- 2 \cdot \frac{m \cdot \bar{z} \cdot \left[m^2 \cdot (\bar{z} + \bar{\xi})^2 - (\bar{x} - \bar{\chi})^2 + n^2 \cdot (\bar{y} - \bar{\eta})^2 \right]}{\left[m^2 \cdot (\bar{z} + \bar{\xi})^2 + (\bar{x} - \bar{\chi})^2 + n^2 \cdot (\bar{y} - \bar{\eta})^2 \right]^{5/2}} \end{aligned} \right\} \quad (6.23)$$

Для того, щоб знайти диференціал вертикальної деформації денної поверхні основи на вертикалі, що проходить через центр завантаженої ділянки, необхідно прийняти в (5.31):

$$\left. \begin{aligned} \bar{x} &= 0; \\ \bar{y} &= 0; \\ \bar{z} &= 0. \end{aligned} \right\} \cdot \quad (6.24)$$

Маємо

$$d\bar{\varepsilon}_{z,0} = \frac{d\bar{\chi} \cdot d\bar{\eta} \cdot m \cdot n}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\bar{\xi}}{\left[m^2 \cdot (\bar{\xi})^2 + (\bar{\chi}^2 + n^2 \cdot \bar{\eta}^2) \right]^{3/2}} \quad (6.28)$$

Для того, щоб знайти диференціал вертикальної деформації денної поверхні основи на вертикалі, що проходить через кутову точку завантаженої ділянки, необхідно прийняти в (6.23):

$$\left. \begin{aligned} \bar{x} &= 1/2; \\ \bar{y} &= 1/2; \\ \bar{z} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6.29)$$

Маємо

$$d\bar{\varepsilon}_{z,y} = \frac{d\bar{\chi} \cdot d\bar{\eta} \cdot m \cdot n}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\bar{\xi}}{\left[m^2 \cdot \bar{\xi}^2 + \left(\left\langle \frac{1}{2} - \bar{\chi} \right\rangle^2 + n^2 \cdot \left\langle \frac{1}{2} - \bar{\eta} \right\rangle^2 \right) \right]^{3/2}} \quad (6.30)$$

Для того, щоб знайти вертикальну деформацію денної поверхні основи на вертикалі, що проходить через центр завантаженої ділянки, необхідно проінтегрувати (5.34) за площею. Маємо

$$\alpha_0 = \bar{\varepsilon}_{z,0} = \frac{m \cdot n}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\frac{1}{2} \int \frac{1}{2} \int \frac{\bar{\xi}}{\left[m^2 \cdot (\bar{\xi})^2 + (\bar{\chi}^2 + n^2 \cdot \bar{\eta}^2) \right]^{3/2}} \cdot d\bar{\chi} \cdot d\bar{\eta}}{-\frac{1}{2} - \frac{1}{2}} \quad (6.31)$$

Для того, щоб знайти вертикальну деформацію денної поверхні основи на вертикалі, що проходить через кутову точку завантаженої ділянки, потрібно проінтегрувати (5.34) за площею. Маємо

$$\alpha_y = \bar{\varepsilon}_{z,y} = \frac{m \cdot n}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\frac{1}{2} \int \frac{1}{2} \int \frac{\bar{\xi}}{\left[m^2 \cdot \bar{\xi}^2 + \left(\left\langle \frac{1}{2} - \bar{\chi} \right\rangle^2 + n^2 \cdot \left\langle \frac{1}{2} - \bar{\eta} \right\rangle^2 \right) \right]^{3/2}} \cdot d\bar{\chi} \cdot d\bar{\eta}}{-\frac{1}{2} - \frac{1}{2}} \quad (6.32)$$

Для низки значень параметрів m , n , $\bar{\chi}$, $\bar{\eta}$, $\bar{\xi}$ ми розрахували значення відносних деформацій. У такому разі дотримано форми прийнятих у нормативних документах таблиць.

Результати обчислень, що проходять через центр завантаженої ділянки вертикалі, подані в табл. 6.2, а для вертикалі, що проходить через її край – в табл. 6.3.

Таблиця 6.2

Коефіцієнти α_0 .

Відносна глибина $\xi = \frac{2 \cdot z}{b}$	Коефіцієнти α_0 . у разі відношення довжини завантаженої ділянки L до її ширини b , дорівнює $\eta = \frac{L}{b}$:						
	$\eta=1$	$\eta=1,4$	$\eta=1,8$	$\eta=2,4$	$\eta=3,2$	$\eta=5,0$	$\eta=10,0$
0,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,400	0,662	0,702	0,722	0,737	0,746	0,753	0,757
0,800	0,418	0,475	0,506	0,531	0,546	0,561	0,568
1,200	0,269	0,323	0,358	0,388	0,409	0,428	0,439
1,600	0,181	0,227	0,259	0,291	0,314	0,337	0,351
2,000	0,128	0,165	0,193	0,223	0,248	0,273	0,289
2,400	0,094	0,124	0,148	0,175	0,199	0,225	0,244
2,800	0,072	0,096	0,116	0,141	0,163	0,190	0,210
3,200	0,057	0,076	0,093	0,115	0,135	0,162	0,183
3,600	0,046	0,062	0,076	0,095	0,114	0,139	0,162
4,000	0,038	0,051	0,063	0,080	0,097	0,121	0,145
4,400	0,031	0,043	0,054	0,068	0,083	0,106	0,130
4,800	0,026	0,037	0,046	0,058	0,072	0,094	0,118
5,200	0,023	0,031	0,039	0,050	0,063	0,084	0,107
5,600	0,020	0,027	0,034	0,044	0,055	0,075	0,098
6,000	0,017	0,024	0,030	0,039	0,049	0,067	0,090
6,400	0,015	0,021	0,027	0,034	0,044	0,061	0,080
6,800	0,014	0,019	0,024	0,031	0,040	0,055	0,076
7,200	0,012	0,017	0,021	0,027	0,036	0,050	0,071
7,600	0,011	0,015	0,019	0,025	0,032	0,046	0,066
8,000	0,010	0,014	0,017	0,023	0,029	0,042	0,062
8,400	0,009	0,013	0,016	0,021	0,027	0,039	0,058
8,800	0,008	0,012	0,014	0,019	0,025	0,036	0,054
9,200	0,007	0,011	0,013	0,017	0,023	0,033	0,051
9,600	0,007	0,010	0,012	0,016	0,021	0,031	0,048
10,000	0,006	0,010	0,011	0,014	0,019	0,028	0,045
10,400	0,006	0,009	0,010	0,014	0,018	0,026	0,042
10,800	0,005	0,008	0,010	0,013	0,017	0,025	0,040
11,200	0,005	0,007	0,009	0,012	0,016	0,023	0,038
11,600	0,005	0,007	0,008	0,011	0,014	0,021	0,036
12,000	0,004	0,006	0,008	0,010	0,014	0,020	0,034

Коефіцієнти α_y .

Відносна глибина $\xi = \frac{2 \cdot z}{b}$	Коефіцієнти α_y у разі відношення довжини завантаженої ділянки L до ширини b , що дорівнює $\eta = \frac{L}{b}$:						
	$\eta=1$	$\eta=1,4$	$\eta=1,8$	$\eta=2,4$	$\eta=3,2$	$\eta=5,0$	$\eta=10,0$
0,000	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250
0,400	0,210	0,211	0,214	0,220	0,217	0,218	0,218
0,800	0,165	0,176	0,181	0,184	0,186	0,188	0,189
1,200	0,132	0,145	0,151	0,156	0,160	0,162	0,164
1,600	0,104	0,119	0,126	0,133	0,137	0,140	0,142
2,000	0,083	0,098	0,106	0,113	0,118	0,122	0,124
2,400	0,067	0,081	0,089	0,010	0,102	0,107	0,110
2,800	0,055	0,067	0,076	0,084	0,089	0,010	0,097
3,200	0,045	0,057	0,065	0,073	0,079	0,084	0,088
3,600	0,038	0,048	0,056	0,064	0,070	0,076	0,079
4,000	0,032	0,041	0,048	0,056	0,062	0,068	0,072
4,400	0,027	0,036	0,042	0,049	0,055	0,062	0,066
4,800	0,024	0,031	0,037	0,044	0,050	0,056	0,061
5,200	0,021	0,027	0,033	0,039	0,045	0,052	0,057
5,600	0,018	0,024	0,029	0,035	0,041	0,047	0,053
6,000	0,016	0,021	0,026	0,032	0,037	0,044	0,049
6,400	0,014	0,019	0,023	0,029	0,034	0,040	0,046
6,800	0,013	0,017	0,021	0,026	0,031	0,038	0,043
7,200	0,011	0,016	0,019	0,024	0,029	0,035	0,041
7,600	0,010	0,014	0,017	0,022	0,026	0,032	0,038
8,000	0,009	0,013	0,016	0,020	0,024	0,030	0,036
8,400	0,008	0,012	0,015	0,018	0,022	0,028	0,034
8,800	0,008	0,011	0,013	0,017	0,021	0,026	0,033
9,200	0,007	0,010	0,012	0,016	0,019	0,025	0,031
9,600	0,007	0,009	0,011	0,015	0,018	0,024	0,029
10,000	0,006	0,008	0,011	0,014	0,017	0,022	0,028
10,400	0,006	0,008	0,010	0,013	0,016	0,021	0,027
10,800	0,005	0,007	0,009	0,012	0,015	0,020	0,026
11,200	0,005	0,007	0,009	0,011	0,014	0,019	0,025
11,600	0,005	0,006	0,008	0,010	0,013	0,018	0,024
12,000	0,004	0,006	0,008	0,010	0,012	0,017	0,023

Методика визначення осадів з використанням наведених у табл. 6.2 і 6.3 даних подана в розділі 6.4

Слід також наголосити, що отримане аналітичне рішення задачі (6.21) можна використати під час розв'язання задач механіки ґрунтів з використанням методу граничних елементів [137, 285, 289].

6.4. Рекомендована методика визначення деформацій здимання

У цьому розділі подано рекомендовані нами методики визначення деформацій здимання ґрунтових основ [183].

Спочатку викладено аналітичний метод визначення деформацій, а потім метод, що ґрунтується на використанні стандартних програм для ЕОМ, призначених для визначення температурних напружень у суцільних середовищах.

6.4.1. Розрахунок деформацій, зумовлених заморожуванням частини ґрунту для точки денної поверхні, що розташована над центром замерзлої ділянки

Вертикальну деформацію окремо розташованого фундаменту S_0 з використанням розрахункової схеми у вигляді лінійно-деформованого півпростору методом пошарового підсумовування обчислюють за формулою:

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot (\alpha_{0,i-1} + \alpha_{0,i}) \cdot h_i, \quad (6.33)$$

де β – безрозмірний коефіцієнт, що дорівнює:

$$\beta_i = \frac{\varepsilon_{0,i} \cdot (1 - 2 \cdot \nu_i) (3 \cdot \lambda_{m,i} + 2 \cdot G_{m,i})}{\lambda_i + 2 \cdot G_i}, \quad (6.34)$$

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

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

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

грунту у незамерзлому 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;

$E_{i,m}$ – 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 фундамен-
ту;

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

α_0 – безрозмірний коефіцієнт, який необхідно приймати згідно з табл. 6.2.

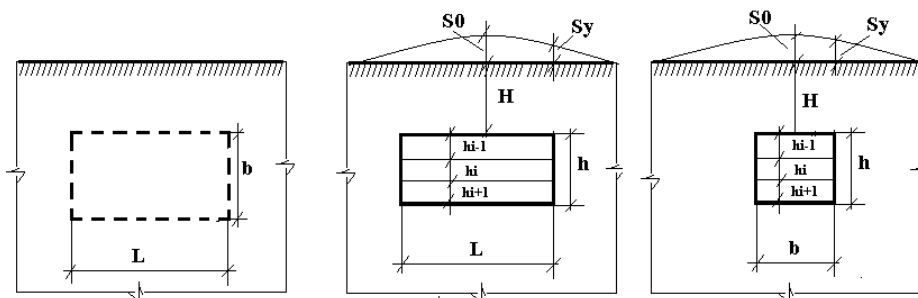


Рис. 6.6. Схема до розрахунку підйому денної поверхні внаслідок заморжування ділянки ґрунту розміром $Lxbxh$

Вертикальну деформацію окремо розташованого фундаменту S_y (рис. 6.6) з використанням розрахункової схеми у вигляді лінійно-деформованого півпростору методом пошарового підсумовування обчислюють за формулою:

$$S_y = \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot (\alpha_{y,i-1} + \alpha_{y,i-1}) \cdot h_i, \quad (6.35)$$

де α_y – безрозмірний коефіцієнт, який потрібно приймати згідно з табл. 6.3.

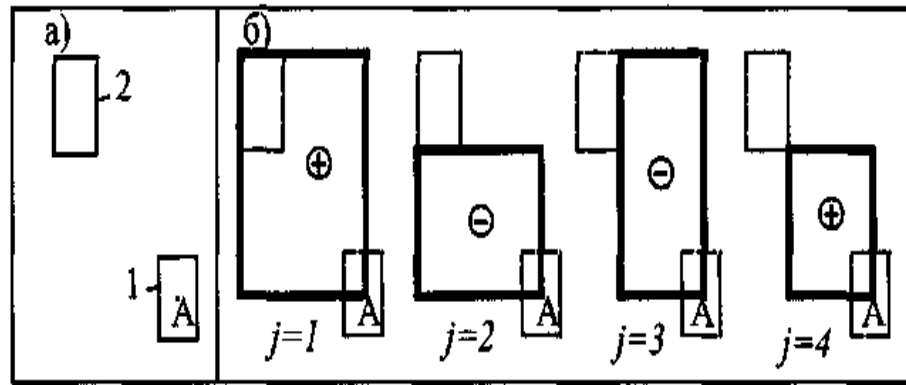


Рис. 6.7. Схема до розрахунку деформацій денної поверхні методом кутових точок: *a* – схема розташування замерзлої ділянки породи: 1, що розраховується, і 2, що впливає; *б* – схема розташування фіктивних ділянок замерзлої породи

Вертикальні деформації денної поверхні на вертикалі, що проходить через будь-яку точку *A* (в межах або за межами фундаменту, що розглядається, обчислюють методом «кутових точок» (рис. 6.6) та алгебраїчним підсумовуванням деформацій у кутових точках чотирьох фіктивних замерзлих ділянок за формулою

$$S_A = \sum_{j=1}^n S_{y,A,j}, \quad (6.36)$$

де S_A – сумарна деформація основи, зумовлена заморожуванням підземної ділянки 2 на рис. 6.7,а), а $S_{y,A,j}$ – кутові деформації фіктивних замерзлих ділянок, поданих на рис. 6.7,б).

6.4.2. Розрахунок деформацій, зумовлених заморожуванням частини ґрунту для точки денної поверхні, що перебуває над центром замерзлої ділянки

Викладений вище підхід дає можливість визначити деформації денної поверхні основи за будь-яких розмірів замерзлої ділянки. Однак його недоліка-

ми є громіздкість і необхідність використання великої кількості табличних даних.

У цьому зв'язку доцільно для визначення зумовлених морозним здиманням деформацій використовувати вже наявні програмні комплекси, наприклад, програму «Ліра» [169, 190, 218].

При написанні цього розділу переслідувалася мета отримати співвідношення між матеріальними константами термопружності і володіє властивістю обдимання середовищ.

Це дозволить розраховувати деформації обдимання з використанням призначених для визначення термопружних деформацій програмних комплексів, таких як Ліра, Склад, Etabs та інших.

Постановка завдання досліджень. Передумови і допущення.

1. Для простоти викладу матеріалу покладемо, що температурне поле і поле деформацій, обумовлених здиманням породи (або ґрунту) не змінюється в часі. Іншими словами, розглядається стаціонарний стан середовища.

1. Відомі деформаційні властивості ґрунтової основи (тобто його модуль деформації E і коефіцієнт Пуассона ν або константи Ламе λ і G).

2. Відомі розподіли температури $T(x, y, z)$ і деформації здимання $\varepsilon_0(x, y, z)$ як функції координат.

3. Коефіцієнт лінійного температурного розширення в загальному випадку є функцією координат.

Потрібно визначити такі коефіцієнти пропорційності між матеріальними константами термопружності і середовища, що володіють властивістю здимання, при яких розрахункові температурні напруження і деформації основи будуть тотожно рівні напруженню і деформації основи, що володіє властивістю здимання основи.

Для простоти викладу матеріалу розглянемо напружено-деформований стан розглянутих середовищ в циліндричній системі координат з осьовою симетрією.

Припустимо, що розподіл температурного поля в просторі відомий заздалегідь.

Обумовлене наявністю в основі температурне поле НДС основи описується системою рівнянь виду:

$$\begin{aligned}
 & (\lambda + 2 \cdot G) \cdot \frac{\partial e}{\partial r} + 2 \cdot G \cdot \frac{\partial \omega}{\partial z} = (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot \frac{\partial [\alpha(r, z) \cdot T(r, z)]}{\partial r}, \\
 & (\lambda + 2 \cdot G) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} - \frac{2 \cdot G}{r} \cdot \frac{\partial (\omega \cdot r)}{\partial r} = \alpha(r, z) \cdot (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot \frac{\partial [\alpha(r, z) \cdot T(r, z)]}{\partial z}, \\
 & \sigma_{zz} = \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot G \cdot \varepsilon_z + \lambda \cdot e - \\ - \alpha(r, z) \cdot (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot T(r, z) \end{array} \right\}; \\
 & \sigma_{rr} = \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot G \cdot \varepsilon_r + \lambda \cdot e - \\ - \alpha(r, z) \cdot (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot T(r, z) \end{array} \right\}; \\
 & \sigma_{\theta\theta} = \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot G \cdot \varepsilon_\theta + \lambda \cdot e - \\ - \alpha(r, z) \cdot (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot T(r, z) \end{array} \right\}; \\
 & \tau_{rz} = G \cdot \gamma_{rz}; \\
 & \varepsilon_r = \frac{\partial U}{\partial r}; \\
 & \varepsilon_z = \frac{\partial W}{\partial z}; \\
 & \varepsilon_\theta = \frac{U}{r}; \\
 & \omega = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial r} \right); \\
 & \gamma_{rz} = \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial r}; \\
 & e = \varepsilon_r + \varepsilon_z + \varepsilon_\theta;
 \end{aligned} \tag{6.37}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{kk} &= \sigma_{zz} + \sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta} = \\ &= (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot e - \end{aligned} \quad (6.37)$$

$$- 3 \cdot \alpha(r, z) \cdot (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot T(r, z)$$

Тут: U і W - переміщення відповідно в напрямку координатних осей Or і Oz ; ω - обертання; r і z - координати; λ і G - константи Ламе основи;

$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ - оператор Лапласа в циліндричній системі координат при

врахуванні осевої симетрії; σ_{zz} , σ_{rr} і $\sigma_{\theta\theta}$ - нормальні напруження; τ_{rz} - те ж, дотичні; σ_{kk} - шаровий тензор напружень; T - температура; ε_{zz} , ε_{rr} і $\varepsilon_{\theta\theta}$ - нормальні деформації; γ_{rz} - те ж, дотичні; α - коефіцієнт лінійного температурного розширення.

При цьому обумовлене наявністю в основі поля деформацій $\varepsilon_0(r, z)$ напружено-деформований стан основи, що описується системою рівнянь виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} (\lambda + 2 \cdot G) \cdot \frac{\partial e}{\partial r} + \\ + 2 \cdot G \cdot \frac{\partial \omega}{\partial z} \end{array} \right\} = (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot \frac{\partial \varepsilon_0(r, z)}{\partial r};$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (\lambda + 2 \cdot G) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} - \\ - \frac{2 \cdot G}{r} \cdot \frac{\partial(\omega \cdot r)}{\partial r} \end{array} \right\} = (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot \frac{\partial \varepsilon_0(r, z)}{\partial z};$$

$$\sigma_{zz} = \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot G \cdot \varepsilon_z + \lambda \cdot e - \\ - (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot \varepsilon_0(r, z) \end{array} \right\};$$

$$\sigma_{rr} = \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot G \cdot \varepsilon_r + \lambda \cdot e - \\ - (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot \varepsilon_0(r, z) \end{array} \right\}; \quad (6.38)$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{\theta\theta} &= \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot G \cdot \varepsilon_{\theta} + \lambda \cdot e - \\ -(3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot \varepsilon_0(r, z) \end{array} \right\}; \\
\tau_{rz} &= G \cdot \gamma_{rz}; \\
\varepsilon_r &= \frac{\partial U}{\partial r}; \\
\varepsilon_z &= \frac{\partial W}{\partial z}; \\
\varepsilon_{\theta} &= \frac{U}{r}; \\
\omega &= \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial r} \right); \\
\gamma_{rz} &= \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial r}; \\
e &= \varepsilon_r + \varepsilon_z + \varepsilon_{\theta}; \\
\sigma_{kk} &= \sigma_{zz} + \sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta} = \\
&= (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot e - \\
&\quad - 3 \cdot (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot \varepsilon_0(r, z)
\end{aligned} \tag{6.38}$$

Далі положимо у (6.38)

$$P_1 = \alpha \cdot (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot T(r, z) \tag{6.39},$$

а у (6.39)

$$P_2 = (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot \varepsilon_0(r, z). \tag{6.40}$$

Системи рівнянь (6.37) і (6.38) будуть описувати один і той же напружено-деформований стан при виконанні умови:

$$\left. \begin{array}{l} P_1 = P_2; \\ \alpha(r, z) \cdot (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot T(r, z) = \\ = (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot \varepsilon_0(r, z) \end{array} \right\}, \tag{6.41}$$

звідки:

$$\alpha(r, z) = \alpha^*(r, z) = \frac{\varepsilon_0(r, z)}{T(r, z)}, \quad (6.42)$$

де $\alpha^*(r, z)$ - фіктивне значення коефіцієнта теплопровідності, що дозволяє поставити у відповідність температурні напруження і деформації з напруженнями і деформаціями, обумовленими здиманням ґрунту (породи).

Далі підставимо (6.42) з систему рівнянь (6.38). Маємо:

$$\left\{ \begin{array}{l} (\lambda + 2 \cdot G) \cdot \frac{\partial e}{\partial r} + \\ + 2 \cdot G \cdot \frac{\partial \omega}{\partial z} \end{array} \right\} = (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot \frac{\partial [\alpha^*(r, z) \cdot T(r, z)]}{\partial r};$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (\lambda + 2 \cdot G) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} - \\ - \frac{2 \cdot G}{r} \cdot \frac{\partial(\omega \cdot r)}{\partial r} \end{array} \right\} = \alpha(r, z) \cdot (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot \frac{\partial [\alpha^*(r, z) \cdot T(r, z)]}{\partial z};$$

$$\sigma_{zz} = \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot G \cdot \varepsilon_z + \lambda \cdot e - \\ - \alpha^*(r, z) \cdot (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot T(r, z) \end{array} \right\};$$

$$\sigma_{rr} = \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot G \cdot \varepsilon_r + \lambda \cdot e - \\ - \alpha^*(r, z) \cdot (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot T(r, z) \end{array} \right\};$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot G \cdot \varepsilon_\theta + \lambda \cdot e - \\ - \alpha^*(r, z) \cdot (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot T(r, z) \end{array} \right\};$$

$$\tau_{rz} = G \cdot \gamma_{rz}; \quad (6.43)$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_r &= \frac{\partial U}{\partial r}; \\
\varepsilon_z &= \frac{\partial W}{\partial z}; \\
\varepsilon_\theta &= \frac{U}{r}; \\
\omega &= \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial r} \right); \\
\gamma_{rz} &= \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial r}; \\
e &= \varepsilon_r + \varepsilon_z + \varepsilon_\theta; \\
\sigma_{kk} &= \sigma_{zz} + \sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta} = \\
&= (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot e - \\
&\quad - 3 \cdot \alpha^*(r, z) \cdot (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot T(r, z)
\end{aligned} \tag{6.43}$$

Викладені вище матеріали досліджень дозволили встановити, що якщо заздалегідь відомий розподіл температурного поля і обумовлені здиманням ґрунту деформації $\varepsilon_0(r, z)$, то для визначення НДС основ, в яких мають місце деформації здимання, слід використовувати систему рівнянь (6.43) і співвідношення між матеріальними константами (6.42).

В цілому, був зроблений висновок про те, що для визначення НДС основ, в яких має місце здимання породи цілком можна використовувати стандартні пакети програм, такі як Ліра, Склад, Etabs та інш.

Рівняння (6.43) дало можливість зробити висновки про те, що для того, щоб використовувати для розрахунку зумовлених морозним здиманням деформацій і напружень призначені для визначення температурних напружень програмні комплекси, необхідно:

1) основу необхідно розбити на дві основні ділянки – ділянка, у якій немає об'ємних температурних деформацій і ділянку, в якій наявні ці деформації.

Перша ділянка відповідає ділянці основи, в якій немає замерзання породи, а друга – ділянці, в якій наявне замерзання. Це легко виконується через вибір відповідних кінцевих елементів;

2) потрібно задати температуру, за якої виконується розрахунок і за формулою (6.42) визначити значення еквівалентного коефіцієнта;

3) подальший розрахунок потрібно виконувати точно так само, як це робиться під час вирішення температурних задач.

Треба особливо звернути увагу на той факт, що зазначений у цьому розділі підхід дає змогу моделювати всі елементи геомеханічної системи «основа – фундамент (або фундаменти) – надфундаментна споруда», достовірно враховувати взаємодію фундаментів з основою і враховувати фактичні навантаження та впливи [71, 87–89, 95, 107, 158, 237, 317, 318, 336, 346].

Висновки

Загалом викладені в цьому розділі матеріали досліджень дали нам змогу зробити такі висновки:

1) наявні в чинних нормативних документах методи визначення деформацій гірської породи, зумовленої теплообміном колекторів теплового насосу та основи, містять низку недоліків;

2) отримано фундаментальне рішення про напружено-деформований стан півпростору, всередині якого розташоване точкове джерело тиску;

3) ці результати узагальнені на випадок прямокутної ділянки. На цій основі розроблено алгоритм розрахунку і складені розрахункові таблиці;

4) запропоновано практичні методи визначення напружено-деформованого стану основ, зумовлених теплообміном колекторів теплових насосів з ґрунтом;

5) визначено співвідношення між деформаціями, обумовленими замерзанням ґрунту та температурними деформаціями, що дозволяють використовувати для прогнозу напружено-деформованого стану ґрунту в зоні впливу ґрунтового колектору теплового насосу при замерзанні порової рідини.

РОЗДІЛ 7.

МЕТОДИКА ТА ПРИКЛАДИ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ГЕОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ «ФУНДАМЕНТ-ГРУНТОВИЙ МАСИВ» У ЗОНІ ДІЇ КОЛЕКТОРА ТЕПЛООВОГО НАСОСА

У цьому розділі викладені матеріали про впровадження виконаних нами досліджень у практику проектування та виконання практичних розрахунків основ і розташованих у них конструкцій.

У підрозділі 7.1. викладено основні положення методики, призначеної для визначення напружено-деформованого стану геомеханічної системи «фундамент-грунтовий масив» у зоні дії колектора теплового насоса.

У підрозділі 7.2. наведено приклади використання нашої методики для:

- визначення вертикального переміщення денної поверхні ґрунтової основи, розташованого в зоні дії колектора теплового насоса;
- визначення напружено-деформованого стану системи «основа – фундаменти – надфундаментна конструкція», розташованих у зоні дії колектора теплового насоса.

У підрозділі 7.3. подано матеріали впровадження матеріалів досліджень у практику будівництва.

7.1. Методика визначення напружено-деформованого стану геомеханічної системи «фундамент-грунтовий масив» у зоні дії колектора теплового насоса

У цьому підрозділі викладено методику визначення напружено-деформованого стану геомеханічної системи «фундамент – ґрунтовий масив» у зоні дії колектора теплового насоса.

Розглянемо, в чому вона полягає.

1. Розрахунок НДС потрібно виконувати на основі першої та другої групи граничних станів. Необхідно розглядати найневигідніший випадок.

2. Розрахунку 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:

$$F \leq F_u, \quad (7.)$$

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:

$$F_d = k_d \cdot F_d^{\text{дбн}}, \quad (7.2)$$

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:

$$S \leq S_u, \quad (7.3)$$

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 здиманням ґрунту (підніманням) S_n і осідання, зумовлені розморожуванням ґрунту (опусканням) S_o .

5.2. Як розрахункову необхідно приймати найбільшу з осідань:

$$S = S_c + S_n \text{ або } S = S_c + S_o. \quad (7.4)$$

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:

$$S_o = \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot (\alpha_{0,i-1} + \alpha_{0,i}) \cdot h_i, \quad (7.5)$$

де β – безрозмірний коефіцієнт, що дорівнює

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

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

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

мерзлому стані;

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

грунту у незамерзлому 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;

$E_{i,m}$ – 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 фундамен-
ту;

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

α_0 – безрозмірний коефіцієнт, який необхідно приймати згідно з табл. 6.2.

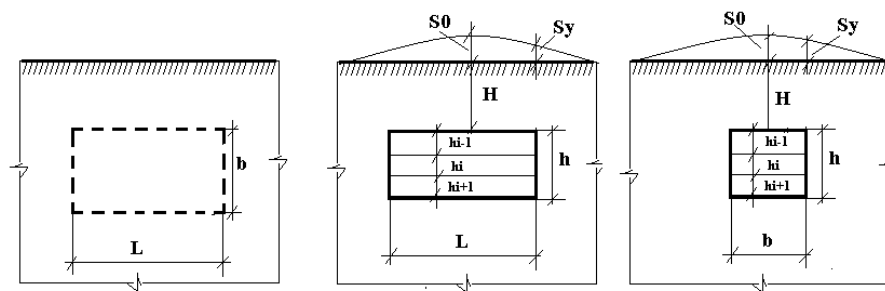


Рис. 7.1. Схема до розрахунку підйому денної поверхні внаслідок заморозування ділянки ґрунту розміром $L \times b \times h$

Вертикальну деформацію окремо розташованого фундаменту S_y (рис. 7.1) з використанням розрахункової схеми у вигляді лінійно-деформованого півпростору методом пошарового підсумовування обчислюють за формулою:

$$S_y = \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot (\alpha_{y,i-1} + \alpha_{y,i}) \cdot h_i,$$

де α_y – безрозмірний коефіцієнт, який потрібно приймати за табл. 6.3.

Вертикальні деформації денної поверхні на вертикалі, що проходить через будь-яку точку A (в межах або за межами фундаменту, що розглядається, обчислюють методом «кутових точок» (рис. 7.2) та алгебраїчним підсумовуванням деформацій у кутових точках чотирьох фіктивних замерзлих ділянок за формулою.

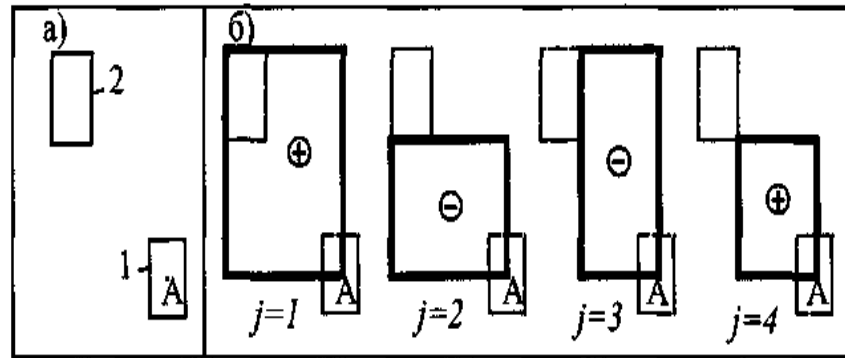


Рис. 7.2. Схема до розрахунку деформацій денної поверхні методом кутових точок: a – схема розташування замерзлої ділянки породи: 1, що розраховується, і 2, що впливає; b – схема розташування фіктивних ділянок замерзлої породи

$$S_A = \sum_{j=1}^n S_{y,A,j}, \quad (7.6)$$

де S_A – сумарна деформація основи, зумовлена заморожуванням підземної ділянки 2 на рис. 6.7, a), а $S_{y,A,j}$ – кутові деформації фіктивних замерзлих ділянок, поданих на рис. 6.7, b); $\varepsilon_{o,i}$ – відносна деформація i -го шару товщиною h_i під час розморожування, а $k_{o,i}$ – коефіцієнт умов роботи, що дорівнює 0,6, ..., 0,8 (див. розділ 4, вираз (4.7)).

Якщо експериментальних даних немає, то допускається приймати $\varepsilon_{o,i} = 0,033$.

5.5. Якщо фундамент розташований поза зоною заморожування-розморожування основи, то для визначення його додаткових деформацій потрібно використовувати метод кутових точок.

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 насоса – фундамент – надфундаментна споруда».

Для цього доцільно використовувати стандартні програмні комплекси, наприклад, «ЛІРА», «СКАД» тощо, призначені для врахування температурних деформацій.

До того ж замість фактичного слід використовувати фіктивний коефіцієнт лінійного температурного розширення, який варто визначати за формулою:

$$\alpha^* = \frac{\varepsilon_{фаз}}{\Delta T}, \quad (7.7)$$

де α^* – значення фіктивного коефіцієнта лінійного температурного розширення; ΔT – фіктивний діапазон температур, який слід задавати під час розрахунку (його доречно приймати таким: $\Delta T = 1^\circ C$); $\varepsilon_{фаз}$ – лінійне розширення ґрунту, зумовлене замерзанням порової рідини.

7.2. Приклади визначення напружено-деформованого стану основ і розташованих у них конструкцій

Спочатку знайдемо вертикальне переміщення основи над *U*-подібним колектором теплового насоса (рис. 7.3).

Характеристики незамерзлого ґрунту дорівнюють:
– модулю деформації не замерзлого ґрунту $e = 100$ МПа;

- коефіцієнту Пуассона незамерзлого ґрунту = 0,3;
- модулю деформації замерзлого ґрунту $E = 10000$ МПа;
- коефіцієнту Пуассона замерзлого ґрунту = 0,3;
- коефіцієнту лінійного розширення замерзлого ґрунту = 0,3;
- діаметру льодоґрунтового циліндра $d = 1,12$ м;
- відстані від верху до ґрунтового циліндра до денної поверхні $h = 1,0$ м;
- відстані від низу льодоґрунтового циліндра до денної поверхні $h = 2,0$ м.

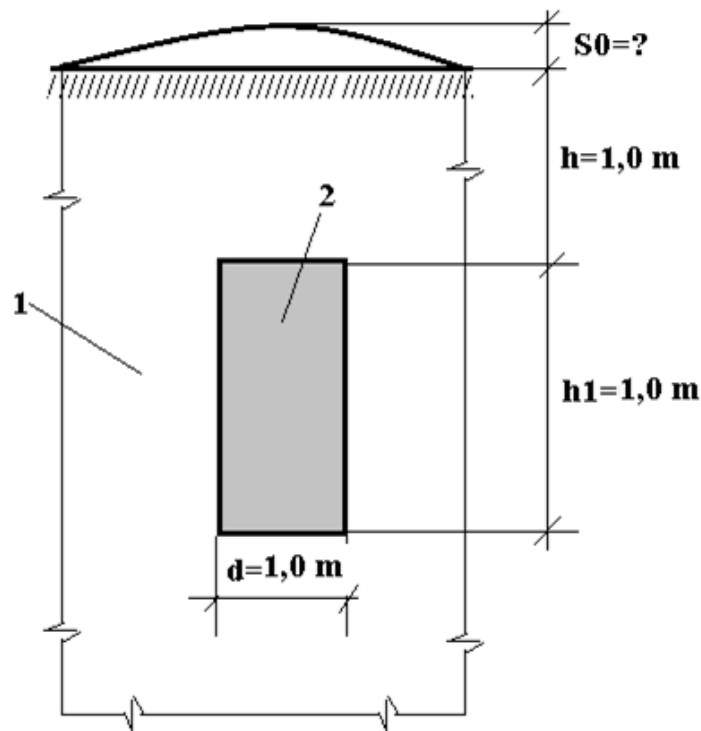


Рис. 7.3. До розрахунку деформації денної поверхні основи: 1 – ділянка незамерзлого ґрунту; 2 – те саме, замерзлого

Далі знайдемо послідовно:

- сторону еквівалентного квадратного перетину: $b = \sqrt{\pi \cdot \frac{d^2}{4}} = 1,0$ м;
- товщину елементарного шару: $h_i = \frac{0,4 \cdot b}{2} = 0,2$ м;

– константи Ламе ґрунту в замерзлому стані: $G_i = \frac{E_i}{2(1+\nu_i)} = 70,4$ МПа і

$$\lambda_i = \frac{\nu_i E_i}{(1-2\nu_i)(1+\nu_i)} = 369,7 \text{ МПа};$$

– константи Ламе ґрунту в замерзлому стані $G_{i,m} = \frac{E_{i,m}}{2(1+\nu_{i,m})} = 3846$ МПа

$$\text{і } \lambda_{i,m} = \frac{\nu_{i,m} \cdot E_{i,m}}{(1-2\nu_{i,m})(1+\nu_{i,m})} = 5769 \text{ МПа};$$

– комплекс $\beta_i = \frac{\varepsilon_{0,i} \cdot (1-2 \cdot \nu_i)(3 \cdot \lambda_{m,i} + 2 \cdot G_{m,i})}{\lambda_i + 2 \cdot G_i} = 0,446$.

Подальші обчислення зведені в табл. 7.1.

Таблиця 7.1

Характеристики для визначення вертикальної деформації

№ з/п	ξ	α	$z = \frac{\xi \cdot b}{2}$	$\frac{\alpha_i + \alpha_{i+1}}{2}$	$\sum \frac{\alpha_i + \alpha_{i+1}}{2} \cdot h_i$
1	0	1	0	–	–
2	0,4	0,662	0,2	–	–
3	0,8	0,418	0,4	–	–
4	1,2	0,269	0,6	–	–
5	1,6	0,181	0,8	–	–
6	2	0,128	1	0,111	0,0222
7	2,4	0,094	1,2	0,194	0,0388
8	2,8	0,072	1,4	0,259	0,0517
9	3,2	0,057	1,6	0,310	0,062
10	3,6	0,046	1,8	0,352	0,0704
11	4	0,038	2	0,387	0,0773

Остаточне переміщення знайдемо з використанням формули (6.33).

Маємо:

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot \frac{(\alpha_{0,i-1} + \alpha_{0,i})}{2} \cdot h_i = 0,0773 \cdot 0,446 = 0,035 \text{ м} = 35 \text{ мм.}$$

Так, у цьому конкретному випадку зумовлена морозним здиманням деформація дорівнює 35 мм.

Далі з використанням запропонованої нами методики виконаємо дослідження напружено-деформованого стану двоповерхової двопролітної рами, розташованої в зоні дії *U*-подібного колектора теплового насоса (рис. 7.4).

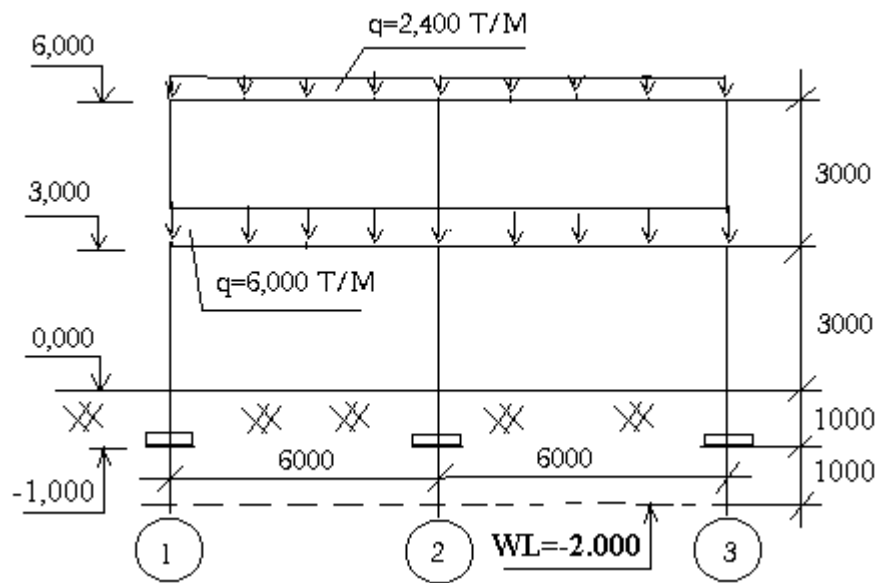


Рис. 7.4. Розрахункова схема рамної конструкції

Задача досліджень сформульована так.

На відстані 1 м від зображеної на рис. 7.4 рамної конструкції знаходиться *U*-подібний колектор теплового насоса.

На інтервалі глибин -9 – -2 м навколо колектора відбулося замерзання підземних вод. У плані зона замерзлої основи має розмір 1 × 1 м.

Необхідно визначити, як зміниться напружено-деформований стан рами, зумовлений замерзанням ґрунту.

Геометричні характеристики рами та бетону, з якого виконано її конструкції, наведено в табл. 7.2.

Геометричні розміри і властивості матеріалу рами і фундаментів,
прийняті під час проведення чисельного експерименту

з/п	Назва конструкції	Розміри перетину, мм	Довжина (товщина) елементу, мм	Клас бетону	Початковий модуль деформації E , МПа	Міцність на стиск R_b , МПа	Міцність на розтягнення R_{bt} , МПа
1	Колони на позначках -1,000–3,000	400×400	4500	B20	27000	11,5	0,9
2	Колони на позначках 3,000–6,000	400×400	3000	B20	27000	11,5	0,9
3	Ригелі на позначці +3,000	400×400	6000	B20	27000	11,5	0,9
4	Ригелі на позначці +6,000	400×400	6000	B20	27000	11,5	0,9
5	Фундаменти	2000×2000	300	B20	27000	11,5	0,9

Властивості ґрунтів, що становлять основу та елементи побудови ґрунтової товщі наведено в табл. 7.3.

Розрахунок напружено-деформованого стану рами виконувався з використанням стандартного програмного комплексу «Ліра». Під час розрахунків порівнювалися зусилля в елементах конструкції рамної конструкції, розрахованих без урахування та з урахуванням впливу на її НДС колектора теплового насоса.

Властивості ґрунтової основи, прийняті під час проведення чисельного експерименту

№ з/п	Назва характеристики	Одиниця вимірювання	Значення характеристики
1	Рівень залягання підземних вод	<i>м</i>	-1,0
2	Коефіцієнт Пуассона ґрунту ν	ч.од.	0,35
3	Модуль загальної деформації ґрунту $E_{o.d.}$	МПа	38,9
4	Коефіцієнт Пуассона замерзлого ґрунту нижче від рівня підземних вод ν	ч.од.	0,30
3	Модуль загальної деформації замерзлого ґрунту нижче від рівня підземних вод $E_{т,о.д.}$	МПа	10000
4	Коефіцієнт лінійного розширення ґрунту під час замерзання води	ч.од.	0,03

Для визначення напружено-деформованого стану, зумовленого взаємодією з колектором теплового насоса, використано методику, викладену в розділі 7.1.

Загальний вигляд розрахункової схеми основи з розташованою на ній рамою наведено на рис. 7.5. Розрахункову схему та навантаження, що відповідають випадку неврахування взаємодії конструкції та основи з колектором теплового насоса наведено на рис. 7.6-7.8.

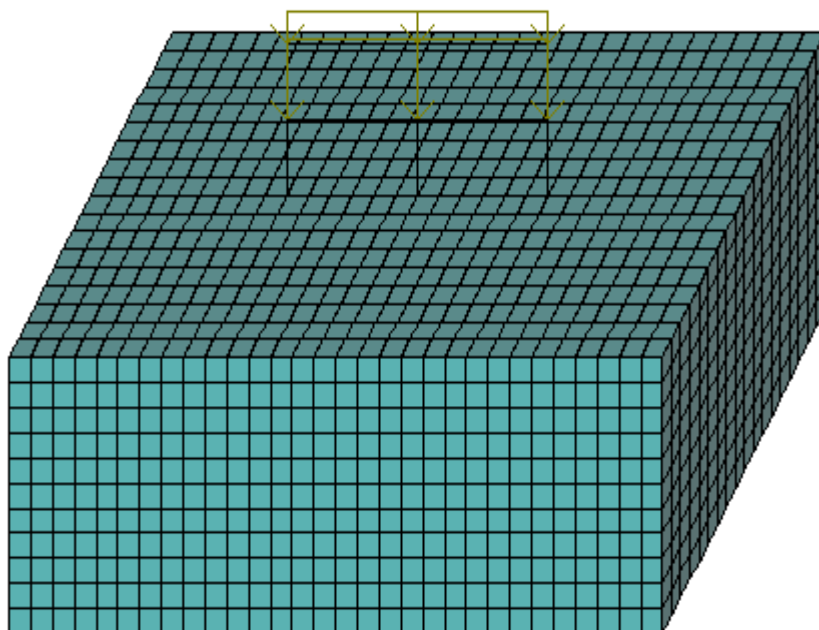


Рис. 7.5. Розрахункова схема. Загальний вигляд

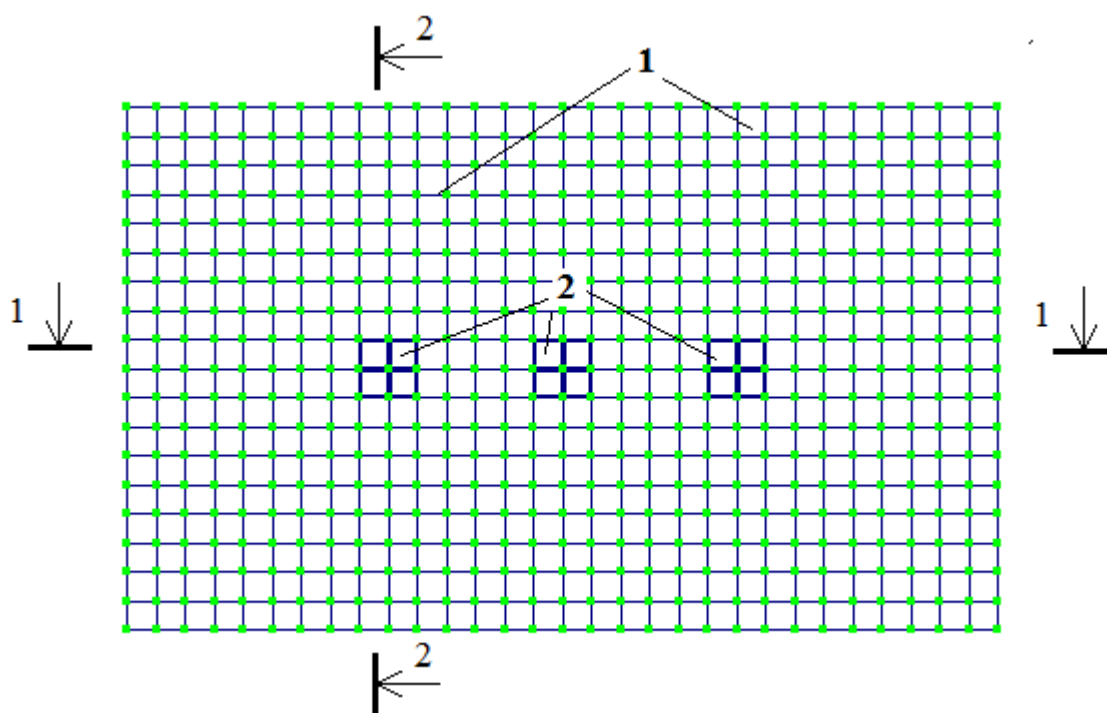


Рис. 7.6. Розрахункова схема. Вихідний стан. План. 1 – основа; 2 – фундаменти; 3 – рамна конструкція

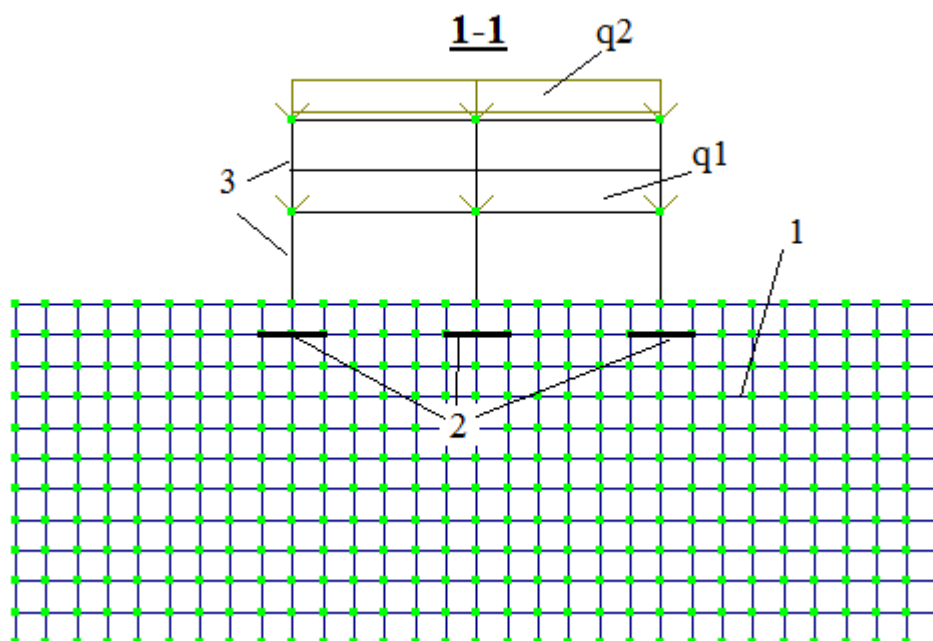


Рис. 7.7. Розрахункова схема. Вихідний стан. Розріз по 1-1. 1 – основа; 2 – фундаменти; 3 – рамна конструкція

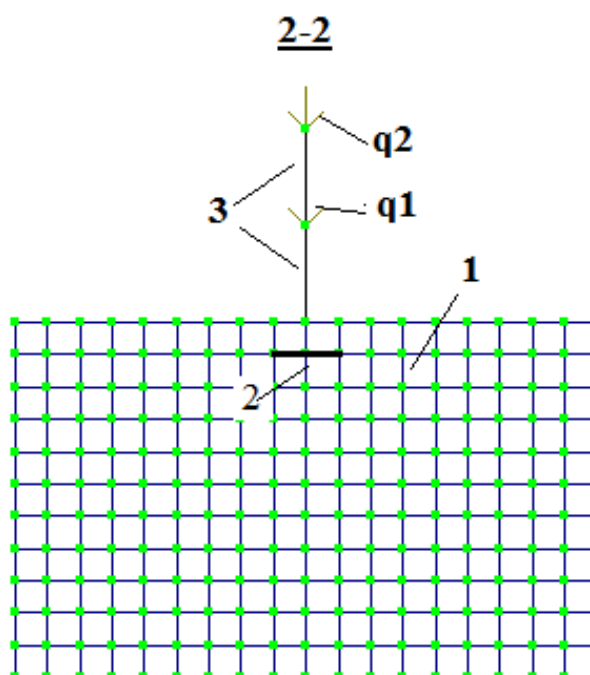


Рис. 7.8. Розрахункова схема. Вихідний стан. Розріз по 2-2. 1 – основа; 2 – фундаменти; 3 – рамна конструкція

Розрахункова схема та навантаження, що враховують взаємодію конструкції та основи з колектором теплового насоса наведено на рис. 7.9-7.11.

На відстані 1 м від рамної конструкції (див рис. 7.4) знаходиться U-подібний колектор теплового насоса, який моделюється на рис. 7.9-7.11.

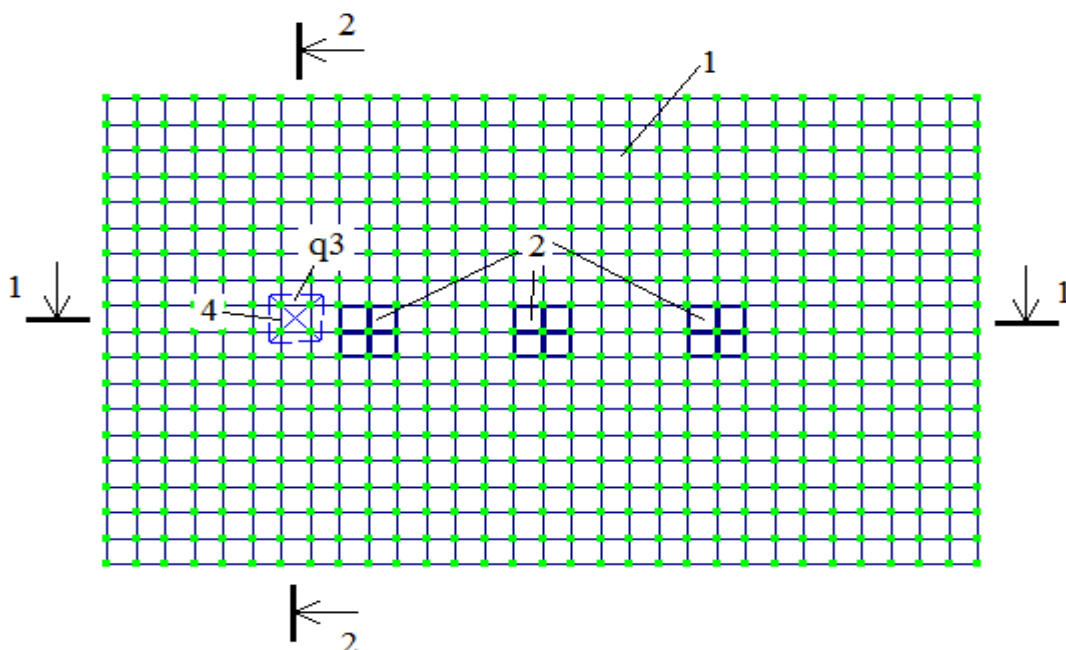


Рис. 7.9. Розрахункова схема. Стан після замерзання порової рідини поблизу U -подібного колектора. План: 1 – основа; 2 – фундаменти; 3 – рамна конструкція; 4 – замерзла навколо колектора вода

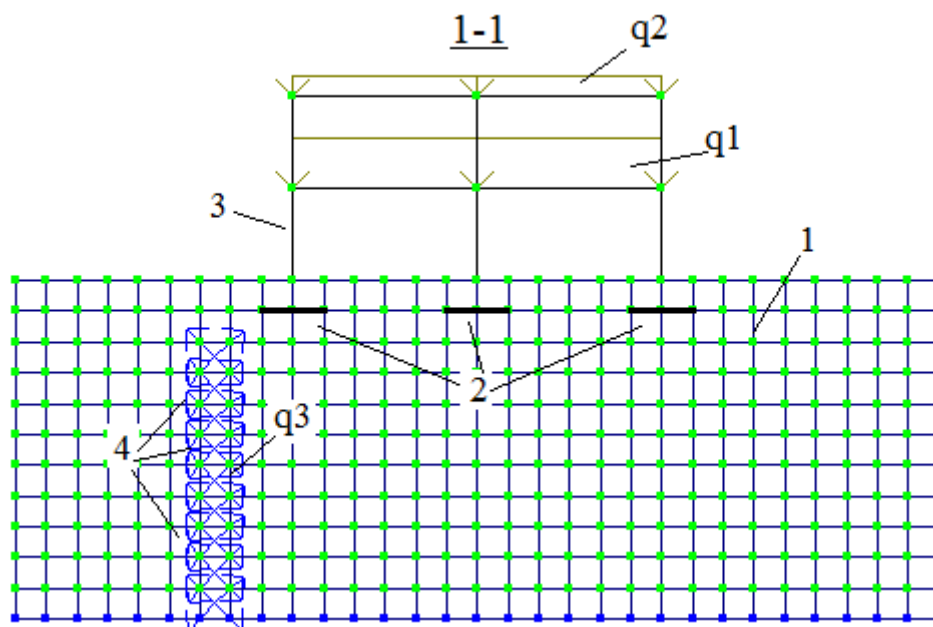


Рис. 7.10. Розрахункова схема. Стан після замерзання порової рідини поблизу U -подібного колектора. Розріз по 1-1.1 – основа; 2 – фундаменти; 3 – рамна конструкція; 4 – замерзла навколо колектора вода

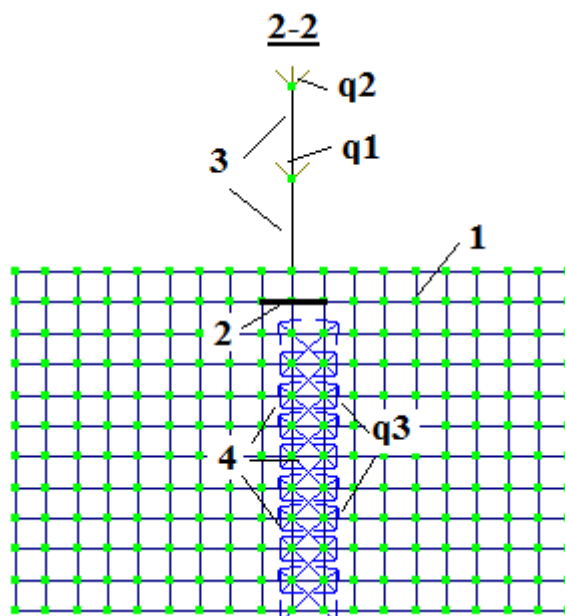


Рис. 7.11. Розрахункова схема. Стан після замерзання порової рідини поблизу U-подібного колектора. Розріз по 2-2. 1 – основа; 2 – фундаменти; 3 – рамна конструкція; 4 – замерзла навколо колектора вода

Результати виконаних розрахунків зведено в табл. 7.4.

Таблиця 7.4

№ з/п	Стан	Позначення	Розмірність	Значення	Розбіжність, %
1	Без урахування впливу колектора	N_{\min}	t	-51,0	-
		N_{\max}	t	3,36	-
		$Q_{z,\min}$	t	-18,45	-
		$Q_{z,\max}$	t	18,45	-
		$M_{y,\min}$	$t \cdot m$	-18,32	-
		$M_{y,\max}$	$t \cdot m$	10,03	-
2	З урахуванням впливу колектора	N_{\min}	t	-50,63	0,73
		N_{\max}	t	3,78	12,50
		$Q_{z,\min}$	t	-34,15	85,09
		$Q_{z,\max}$	t	46,80	153,66
		$M_{y,\min}$	$t \cdot m$	-70,37	284,12
		$M_{y,\max}$	$t \cdot m$	135,53	1251,25

Аналіз наведених розрахунків (див. табл. 7.4) дав можливість зробити такі висновки:

- у цьому конкретному випадку наявність колектора теплового насоса найменше впливає на осьові сили, а найбільше – на згинальні моменти;
- нехтувати наявністю колекторів теплових насосів на НДС, розташованих поблизу будівель і споруд неможливо.

7.3. Впровадження результатів досліджень

У цьому розділі наведено матеріали впровадження результатів досліджень у практику проектування, будівництва та в навчальний процес.

Зокрема, методику визначення напружено-деформованого стану геомеханічної системи «фундамент-грунтовий масив» у зоні дії колектора теплового насоса, яку розробив автор - Б. В. Моркляник, застосовують на кафедрі мостів та будівельної механіки під час науково-педагогічного процесу, зокрема під час:

- читання лекцій за фахом «Основи теорії споруд»;
- виконання науково-дослідних робіт викладачами, студентами та аспірантами;
- написання кваліфікаційних робіт бакалавра та магістра.

Підтверджує факт впровадження документ, що поданий у додатку.

Подальше впровадження роботи виконано під час вирішення проблеми економії невідновлюваних енергоресурсів у межах обласної програми Львівської обласної ради «Енергозбережні технології в будівництві».

Під час впровадження роботи виконано такі завдання:

- 1) обліковано вплив теплового поля в зоні дії колектора теплового насоса на деформації розташованих поблизу будівель і споруд;
- 2) спрогнозовано напружено-деформований стан геомеханічної системи «надфундаментна конструкція – фундамент – ґрунтовий масив» у зоні дії колектора теплового насоса.

Впровадження розробки дасть можливість економити до 20000 м³ газу на рік.

Документ, наведений у додатку, підтверджує цей факт впровадження.

Розроблену нами методику також прийняло Міністерство Мінрегіонрозвитку України для вирішення таких питань:

1) визначення температурних полів на основі колекторів теплових насосів;

2) визначення властивостей бетону й ґрунту під час циклічного заморожування-розморожування ґрунту;

3) визначення напружено-деформованого стану системи «ґрунтовий колектор теплового насоса – основа – фундаменти – надфундаментна конструкція».

Це засвідчує факт впровадження документ, що поданий у додатку.

Практичне значення роботи полягає у використанні методики прогнозування та оцінки кількості низько потенційного тепла ґрунтів основи забудовниками, зокрема у м. Львові та м. Києві. Відповідні документи наведено у додатку.

Висновки

Загалом викладені в цьому розділі матеріали досліджень дали нам змогу зробити такі висновки:

1) запропоновано звід правил, що дають змогу розраховувати напружено-деформований стан геомеханічної системи «фундамент – ґрунтовий масив» у зоні дії колектора теплового насоса;

2) пропонована нами методика проілюстрована на конкретному прикладі;

3) у розділі наведено матеріали впровадження результатів виконаних досліджень у практику проектування.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеним науковим дослідженням, в якому на основі вивчення чинників і вперше встановлених закономірностей деформування геомеханічної системи «фундамент-грунтовий масив» в зоні дії колектора теплового насоса та розробки наукових принципів розрахунку її напружено-деформованого стану вирішна актуальна науково-технічною проблема для економіки України з позиції підвищення її ресурсо- та енергозбереження.

Основні висновки, наукові та практичні рекомендації полягають у наступному.

1. Розроблено методику визначення теплових полів, зумовлених взаємодією колекторів ґрунтових теплових насосів і ґрунтових основ. Ця методика дає можливість враховувати нелінійну залежність теплофізичних властивостей ґрунту від температури, а також фазові переходи під час заморожування-розморожування порової рідини.

2. Запропоновано і досліджено модель основи, що дає змогу під час визначення її напружено-деформованого стану врахувати зумовлені фазовими перетвореннями порової рідини, додаткові напруження і деформації.

3. У межах схеми роздільного розрахунку запропоновано методику обчислення додаткового осідання основ, у яких розміщено колектори теплових насосів, зумовленого фазовими переходами під час заморожування-розморожування ґрунту під час роботи теплових насосів.

4. У межах схеми роздільного розрахунку запропоновано методику оцінки несучої здатності по ґрунту основи, в яких знаходяться колектори теплових насосів.

5. У межах схеми сумісного розрахунку розроблено методику визначення додаткового осідання основи, а також деформацій і напружень у конструкціях, розміщених на ній, зумовлених фазовими переходами у разі заморожування-розморожування ґрунту під час роботи теплових насосів.

6. Вирішена задача визначення додаткових напружень, які виникають в елементах конструкцій фундаментів, що одночасно є несучими конструкціями споруди і колекторами теплових насосів.

7. Розроблено практичні рекомендації із розрахунку і проектування основ і фундаментів, у яких розміщено колектори теплових ґрунтових насосів.

8. Економічний ефект від впровадження результатів роботи при проектуванні і будівництві житлових комплексів у м. Львові корпорацією «Ріел-Груп» та ТзОВ «Львів-Буд» склав 385 000 грн. Подальше впровадження розроблених рекомендацій та методик дасть можливість економити до 20 тисяч м³ газу на рік.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

1. Александровский С. В. Ползучесть бетона при периодических воздействиях / С. В. Александровский, В. Я. Багрий. – Москва : Стройиздат, 1970. – 167 с.
2. Абелев М. Ю. Слабые водонасыщенные грунты как основания промышленных и гражданских сооружений : автореферат докторской диссертации / М. Ю. Абелев. – Москва , 1978. – 24 с.
3. Абелев М. Ю. Слабые водонасыщенные грунты как основания сооружений / М. Ю. Абелев. – Москва : Стройиздат, 1973. – 288 с.
4. Абелев М. Ю. Сопоставление результатов полевых и лабораторных исследований сжимаемости слабых водонасыщенных глин / М. Ю. Абелев // Труды третьего Всесоюзного совещания «Основания, фундаменты и механика грунтов». – К., 1971. – С. 70–73.
5. Абелев М. Ю. Строительство промышленных сооружений на слабых водонасыщенных грунтах / М. Ю. Абелев. – Москва : Стройиздат, 1983. – 248 с.
6. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика / Г. Н. Абрамович. – Москва : Наука, 1976. – 888 с.
7. Агошков И. Н. Методы решения задач математической физики : учеб. пособие для студентов, специализирующихся в области вычислительной математики / И. Н. Агошков. 2002. – 320 с.
8. Аппен А. А. Температуроустойчивые неорганические покрытия / А. А. Аппен. – Ленинград : Химия, 1967. – 240 с.
9. Амензаде Ю. А. Теория упругости / Ю. А. Амензаде. – Баку : Азербайджанское Государственное издательство учебно-педагогической литературы. – 1968. – 250 с.
10. Аптуков В. Н. Прогноз погружаемости забивных свай в грунтах со сложными реологическими свойствами / В. Н. Аптуков, И. М. Омельчак, Н. В. Абрешитов, Н. И. Большакова // В кн.: Расчет и проектирование свай и

свайных фундаментов. Труды II Всесоюзной конференции «Современные проблемы свайного фундаментостроения в СССР». – Пермь, 1990. – Т. 1. – С. 70–71.

11. Ахенштейн Г. И. Об одной из причин образования трещин в стенах зданий / Г. И. Ахенштейн // Матер. науч.-техн. конф. НИИ геологии нерудных полезных ископаемых. – Казань : Татарское книжное издательство, 1972. – С. 19–26.

12. Багатомовна мережева енциклопедія «Вікіпедія». Динаміка чисельності населення [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/>

13. Багатомовна мережева енциклопедія «Вікіпедія». Населення землі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ru.wikipedia.org/wiki/Мировое_потреблении_энергии

14. Багатомовна мережева енциклопедія «Вікіпедія». Перенаселение [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Перенаселение>

15. Багатомовна мережева енциклопедія Вікіпедія. Населення землі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/D1%96>

16. Байков В. А. Уравнения математической физики / В. А. Байков, А. В. Жибер. – Москва ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2003. – 256 с.

17. Баренблатт Г. И. О конечной скорости распространения в задачах нестационарной фильтрации жидкости и газа / Г. И. Баренблатт, И. М. Вишик // Прикл. мат. мех. – 1956. – Т. 16. – № 1. – С. 67–78.

18. Баттон С. Ускоренный метод определения осадок при консолидации / С. Баттон // Механика грунтов и фундаментостроение. – Москва, 1976. – С. 175–181.

19. Беляев Н. М. Термодинамика. – К. : Вища школа, 1987. – 344 с.

20. Березанцев В. Г. Расчет оснований сооружений / В. Г. Березанцев. – Ленинград : Стройиздат, 1970. – 207 с.

21. Беркович Л. М. Некоторые аналитические методы нелинейной динамики / Л. М. Беркович // Вестник СамГУ – Естественнонаучная серия. – 2005. – Т. 36. – № 2. – С. 33–65.
22. Большаков В. Д. Теория математической обработки геодезических измерений / В. Д. Большаков, П. А. Гайдаев. – Москва : Недра, 1977. – 367 с.
23. Большая советская энциклопедия / Гл. ред. А. М. Прохоров ; ред. кол. Д. М. Алексеев, А. М. Балдин, А. М. Бонч-бруевич, А. С. Боровик-Романов и др. – Москва : Сов. энциклопедия. – Т. 1–30. – 1969–1978.
24. Бьерум Л. Параметры эффективного сопротивления сдвигу чувствительных глин / Л. Бьерум // Механика грунтов и фундаментостроение. – Москва : Стройиздат, 1966. – С. 5–19.
25. Ватсон Д. Н. Теория бесселевых функций / Д. Н. Ватсон. – Москва : Изд-во иностр. лит., 1949. – 798 с.
26. Веригин Н. Н. Консолидация насыщенного грунта при действии внешней нагрузки, нормальной к границе полупространства / Н. Н. Веригин // VI Международный конгресс по механике грунтов и фундаментостроению. – Москва : Стройиздат, 1965. – С. 26–31.
27. Вило А. Исследование свойств грунтов / А. Вило // Инженерная геология, механика грунтов в фундаментостроении : Тезисы докладов межреспубликанской конференции Белорусской, Литовской, Латвийской и Эстонской ССР «Геотехника-5». – Минск, 1982. – С. 19–26.
28. Вило А. Строительство на слабых грунтах Эстонии / А. Вило, Н. Метс // Фундаменты многоэтажных зданий в условиях сильносжимаемых грунтов. – Москва, 1968. – С. 22–35.
29. Вінников Ю. Л. Моделювання процесів ущільнення ґрунту при вісесиметричному напружено-деформованому стані основ : автореферат ... д-ра техн. наук / Ю. Л. Вінников. – К., 2005. – 38 с.
30. Владимиров В. С. Обобщенные функции в математической физике / В. С. Владимиров. – Москва : Наука, 1979. – 320 с.

31. Власов В. З. Балки, плиты и оболочки на упругом основании / В. З. Власов, Н. Н. Леонтьев. – Москва : Физматгиз, 1960. – 491 с.
32. Волков Д. И. Расчет температур методом конечных разностей при ленточном шлифовании с постоянным усилием прижима при косоугольной схеме ленточного шлифования / Д. И. Волков // Вестник уфимского государственного авиационного технического университета. – № 3 (43). – Т. 15. – 2011. – С. 79–83.
33. Вольterra В. Теория функционалов, интегральных и интегро-дифференциальных уравнений / В. Вольterra. – Москва : Наука, 1982. – 304 с.
34. Вронский А. В. В научно-техническом совете Госстроя СССР / А. В. Вронский // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1985. – № 3. – С. 26–28.
35. ВСН 41.88 Проектирование морских ледостойких стационарных платформ. – Москва, 1988. – 56 с.
36. Вялов С. С. Закономерности длительной прочности грунтов / С. С. Вялов // Труды к VII Международному конгрессу по механике грунтов и фундаментостроению. – Москва : Стройиздат, 1969. – С. 56–65.
37. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов : учеб. пособ. для строительных вузов / С. С. Вялов. – Москва : Высш. школа, 1978. – 447 с, ил.
38. Вялов С. С. Реология мерзлых грунтов / С. С. Вялов. – Москва : Стройиздат, 2000. – 463 с.
39. Вялов С. С. Термодинамический критерий разрушения и уравнение длительной прочности грунтов / С. С. Вялов, В. Н. Разбегин // Тезисы докладов четвертого Всесоюзного симпозиума по реологии грунтов. – Самарканд, 1982. – С. 15–16.
40. Вялов С. С. Динамометрический способ испытания свай в грунтах, обладающих свойствами ползучести / С. С. Вялов, Ю. С. Миренбург // Основания и фундаменты на засоленных заторфованных и вечномерзлых грунтах : Сб. трудов НИИОСП. – Москва , 1982. – Вып. 77. – С. 59–69.

41. Вялов С. С. Кинетика структурных деформаций и разрушения глин / С. С. Вялов, Ю. К. Зарецкий и др. // Труды к VIII Международному конгрессу по механике грунтов. – Москва : Стройиздат, 1973. – С. 13–24.
42. Вялов С. С. Методика определения характеристик ползучести, длительной прочности и сжимаемости мерзлых грунтов / С. С. Вялов, С. Э. Городецкий и др. – Москва : Наука, 1966. – 197 с.
43. Вялов С. С. О проблемах реологии грунтов / С. С. Вялов // Труды I Всесоюзного симпозиума по реологии грунтов. – Ереван : Изд-во Ереванского университета, 1973. – С. 6–25.
44. Вялов С. С. Подземные льды и сильносжимаемые грунты как основания сооружений / С. С. Вялов, В. В. Докучаев, Д. Р. Шейнкман. – Ленинград : Стройиздат, 1967. – 167 с.
45. Вялов С. С. Проблемы длительной прочности грунтов / С. С. Вялов // Тезисы докладов четвертого симпозиума по реологии грунтов. – Самарканд, 1982. – С. 14–15.
46. Вялов С. С. Расчеты на прочность и ползучесть при искусственном замораживании / С. С. Вялов и др. – Ленинград : Стройиздат, 1981. – 200 с.
47. Вялов С. С. Реологические свойства и несущая способность мерзлых грунтов / С. С. Вялов. – Москва : Изд-во АН СССР, 1959. – 188 с.
48. Галеркин Б. Г. Собрание сочинений. – Москва : Изд-во АН СССР, 1952. – Т. I. – 391 с.
49. Гарагаш Б. А. Надежность пространственных регулируемых систем «сооружение – основание» при неравномерных деформациях основания / Б. А. Гарагаш. – Сочи : Кубанькино, 2004. – 908 с.
50. Гельфонд А. О. Исчисление конечных разностей / А. О. Гельфонд. – Москва : Наука, 1967. – 375 с.
51. Геотермические тепловые насосы для отопления и приготовления горячей расходной воды. Тетрадь проектанта. – К. : Junkers, 2009. – 103 с.
52. Герсеванов Н. М. Основы динамики грунтовой массы / Н. М. Герсеванов. – Ленинград : Госстройиздат, 1930. – 242 с.

53. Герсеванов Н. М. Опыт применения теории упругости к определению допускаемых нагрузок на грунт на основе экспериментальных работ / Н. М. Герсеванов // Труды МИИТ. – Москва, 1930. – Вып. 15. – С. 255–284.
54. Герсеванов Н. М. Теоретические основы механики грунтов и их практические применения / Н. М. Герсеванов, Д. Е. Польшин. – М. : Госстройиздат, 1948. – 247 с.
55. Голли А. В. Об основных положениях графо-аналитического метода определения мощности ограниченной сжимаемой толщи / А. В. Голли // Механика грунтов, основания и фундаменты : сб. тр. ЛИСИ. – Ленинград, 1971. – С. 6–10.
56. Голли А. В. Методика измерения напряжений и деформаций в грунтах : конспект лекций. – Ленинград : Изд-во ЛИСИ, 1977. – 59 с.
57. Гольденблат И. И. Некоторые вопросы вязкоупругости / И. И. Гольденблат, В. Л. Бажанов // Механика деформируемых тел и конструкций. – Москва : Машиностроение, 1975. – С. 129–134.
58. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов. Напряженно-деформативные и прочностные характеристики / М. Н. Гольдштейн. – Москва : Стройиздат, 1973. – 304 с.
59. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов. (Основные компоненты грунта и их взаимодействие) / М. Н. Гольдштейн. – Москва : Стройиздат, 1971. – 375 с.
60. Гольдштейн М. Н. Влияние режима испытаний на деформативно-прочностное поведение глинистого грунта / М. Н. Гольдштейн, С. С. Бабицкая // Труды I Всесоюзного симпозиума по реологии грунтов. – Ереван : Изд-во Ереванского ун-та, 1973. – С. 178–182.
61. Гольдштейн М. Н. Расчеты осадок и прочности оснований зданий и сооружений / М. Н. Гольдштейн, С. Г. Кушнер, М. И. Шевченко. – К. : Будивельник, 1977. – 208 с.

62. Гольдштейн М. Н. Механика грунтов, основания и фундаменты : учебник для вузов ж.-д. трансп. / М. Н. Гольдштейн, А. А. Царьков, И. И. Черкасов. – Москва : Транспорт, 1981. – 320 с.
63. Гольдштейн М. Н. Длительная прочность глин и глубинная ползучесть склонов / М. Н. Гольдштейн, Г. И. Тер Степанян // Матер. к IV Международному конгрессу по механике грунтов и фундаментостроению. – Москва : Изд-во АН СССР, 1957. – С.43–52.
64. Горбунов-Посадов М. И. Осадки фундаментов на слое грунта, подстилаемом скальным основанием / М. И. Горбунов-Посадов. – Москва : Госстройиздат, 1946. – 60 с.
65. Горбунов-Посадов М. И. Совещание по вопросам экспериментальных исследований напряжений в подошве жестких сооружений на мягких грунтах / М. И. Горбунов-Посадов // Труды координационного совещания по гидротехнике. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1962. – Вып. 3. – С. 5–7.
66. Горбунов-Посадов М. И. Современное состояние научных основ фундаментостроения / М. И. Горбунов-Посадов. – Москва : Наука, 1967. – 68 с.
67. Горбунов-Посадов М. И. Проблемы нелинейной механики грунтов / М. И. Горбунов-Посадов // Экспериментально-теоретические исследования нелинейных задач в области оснований и фундаментов : Межвуз. сб. тр. НПИ. – Новочеркасск, 1979. – С. 3–8.
68. Горбунов-Посадов М. И. Критерии и расчеты устойчивости оснований и грунтовых сооружений / М. И. Горбунов-Посадов // Матер. конф. гидротехнических сооружений: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1980. – С. 87–90.
69. Горбунов-Посадов М. И. Основания, фундаменты, и подземные сооружения. Справочник проектировщика / М. И. Горбунов-Посадов, В. А. Ильичев, В. И. Крутов и др. – Москва : Стройиздат, 1985. – 480 с.
70. Горбунов-Посадов М. И. Узловые вопросы расчета оснований и опирающихся на них конструкций в свете современного состояния механики

грунтов / М. И. Горбунов-Посадов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1982. – № 4. – С. 25–27.

71. Горбунов-Посадов М. И. О совместной работе оснований и сооружений / М. И. Горбунов-Посадов, С. С. Давыдов // Труды к VIII Международному конгрессу по механике грунтов и фундаментостроению. – Москва, 1975. – С. 383–392.

72. Горбунов-Посадов М. И. Расчет конструкций на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов, Т. А. Маликова, В. И. Соломин. – 3-е изд. – Москва : Стройиздат, 1984. – 679 с.

73. Гороховский В. М. Математические методы и достоверность гидрогеологических и инженерно-геологических прогнозов / В. М. Гороховский. – Москва : Недра, 1977. – 76 с.

74. ГОСТ 20522–75 Грунты. Методы статистической обработки результатов определения характеристик.

75. ГОСТ 23908–79. Грунты. Методы лабораторного определения сжимаемости.

76. ГОСТ 23615–79. Система обеспечения точности геометрических параметров. Статический анализ точности. – Москва, 1979. – 9 с.

77. ГОСТ 20276–84. Грунты. Методы полевого определения характеристик деформации.

78. ГОСТ 25358–82. Грунты. Методы полевых определений температур.

79. ГОСТ 25584–83. Грунты. Методы лабораторных определений коэффициента фильтрации.

80. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – Москва, 2012.

81. ГОСТ 19804.6-83 Сваи полые круглого сечения и сваи-оболочки железобетонные составные с ненапрягаемой арматурой. Конструкция и размеры. – Москва, 1983 – 52 с.

82. . ГОСТ 19804.3-80* Сваи забивные железобетонные квадратного сечения с круглой полостью. – Москва, 1980 – 46 с.
83. Далматов Б. И. Механика грунтов, основания и фундаменты / Б. И. Далматов. – 2-е изд. – Ленинград : Стройиздат, 1988 – 415 с.
84. Далматов Б. И. Расчет оснований зданий и сооружений по предельным состояниям / Б. И. Далматов. – Ленинград : Стройиздат, 1968. – 141 с.
85. Далматов Б. И. Определение осадок фундаментов с учетом изменения модуля деформации глинистого грунта в зависимости от напряженного состояния / Б. И. Далматов, В. М. Чикишев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1984. – № 1. – С. 132–138.
86. Дарков А. В. Строительная механика / А. В. Дарков, В. В. Шапошников. – Москва : Высш. шк., 1986. – 607 с.
87. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи.
88. ДБН В.1.2-5:2000. Частина 2. Будинки і споруди на просідаючих грунтах.
89. ДБН В.2.1-10–2009. Основи та фундаменти споруд. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 104 с.
90. Демидович Б. П. Основы вычислительной математики / Б. П. Демидович, И. А. Марон. – Москва : Наука, 1966. – 664 с.
91. Дерягин Б. Н. Поверхностные силы [Текст] / Б. Н. Дерягин, Н. В. Чураев, В. М. Муллер. – Москва : Наука, 1985. – 398 с.
92. Дерягин Б. В. Свойства тонких слоев воды вблизи твердых поверхностей [Текст]. / Б. В. Дерягин, З. М. Зорин, М. Д. Соболев, Н. В. Чураев // Связанная вода в дисперсных системах. – Москва : Изд-во Московск. ун-та, 1980. – Вып. 5. – С. 4–13.
93. Джонсон У. Теория пластичности для инженеров / У. Джонсон, П. Меллор. – Москва : Машиностроение, 1979. – 567 с.
94. Диткин В. А. Справочник по операционному исчислению / В. А. Диткин, А. П. Прудников. – Москва : Высш. шк., 1974. – 542 с.
95. ДСТУ В.1.2-3:2006. Прогибы и перемещения.

96. ДСТУ Б В.2.7-47-96 (ГОСТ 10060.0-95). Бетони. Методи визначення морозостійкості. Загальні вимоги
97. ДСТУ Б В.2.7-89-99 (ГОСТ 12801-98) Будівельні матеріали. Матеріали на основі органічних В'язучих для дорожнього і аеродромного будівництва. Методи випробувань.
98. ДСТУ Б В.2.1-4-96 Грунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності та реформованості.
99. ДСТУ Б В.2.1-5-96 Грунти. Методи статистичної обробки результатів випробувань.
100. Дыховичный Ю. А. и др. Справочник инженера-конструктора жилых и общественных зданий. – Москва : Стройиздат, 1975. – С. 386.
101. Егоров К. Е. К вопросу деформации оснований конечной толщины / К. Е. Егоров // Труды НИИ оснований. – Москва : Госстройиздат, 1958. – № 34. – С. 5–33.
102. Егоров К. Е. О деформации основания конечной толщины / К. Е. Егоров // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1961. – № 1. – С. 4–6.
103. Егоров К. Е. К расчету деформаций оснований (сборник статей) / К. Е. Егоров. – Москва : ФГУП «ВНИИТПИ», 2002. – 400 с.
104. Емельянов Е. Н. Исследование прочностных характеристик слоистых структур с различным распределением упругих свойств : дисс. ... канд. техн. наук. – Благовещенск, 2003. – 186 с.
105. Закон України № 30 від 01.07.94 р. “Про енергозбереження”.
106. Зарецкий Ю. К. Лекции по современной механике грунтов / Ю. К. Зарецкий. – Ростов-на-Дону, 1989. – 608 с.
107. Захаров А. В. Анализ взаимодействия энергоэффективных конструкций фундаментов с грунтовым массивом : автореферат дисс. ... канд. техн. наук / А. В. Захаров. – Пермь, 2011. – 28 с.
108. Зельдович Я. Б. К теории распространения тепла при теплопроводности, зависящей от температуры / Я. Б. Зельдович, А. С. Компанец // Сбо-

рник посвященный 70-летию академика А. Ф. Иоффе. – Москва : Изд-во АН СССР, 1950. – С. 61–71.

109. Зельдович Я. Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. – Москва : Наука, 1966. – 686 с.

110. Иванов П. Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений / П. Л. Иванов. – Москва : Высш. шк., 1985. – 352 с.

111. Ильюшин А. А. Механика сплошной среды / А. А. Ильюшин. – Москва : Изд-во МГУ, 1971. – 246 с.

112. Ильюшин А. А. Пластичность / А. А. Ильюшин. – Москва : Изд-во АН СССР, 1962. – 271 с.

113. Интернет видання. Мировая алюминиевая промышленность [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ereading.club/chapter.php/127765/108/Maksakovskiii_Geograficheskaya_kartina_mira_Posobie_dlya_vuzov_Kn._I_Obshchaya_harakteristika_mira_Global'nye_p--chestva.html

114. Интернет-видання . Проблемы чистой воды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: (дата звернення 14.09.2011). http://water-health.org.ua/?Problema_chistoi_vody

115. Интернет-видання [Электронный ресурс]. – Режим доступа (дата звернення 11.03.2012 р.): [Statistical Review of World Energy](http://www.statisticalreview.org/)

116. Интернет-видання. «Новый альянс» спасет Африку от голода [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://inforos.ru/ru/?module=news&action=view&id=30497>

117. Интернет-видання. Глобальная проблема дефицита энергетических ресурсов на планете [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://xn--80afbefj3axv1j.xn--p1ai/deficit-resursov-na-planete.php>

118. Интернет-видання. Глобальная проблема: “нехватка энергетических ресурсов”. Перенаселение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: allbest.ru/o-2c0a65635b3bc68a5c53a88521216d27.html

119. Интернет-видання. Каждую минуту в мире [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bratstvo.ucoz.ua/news/2009-02-12-100>
120. Интернет-видання. Население Земли в 2100 году составит 11 миллиардов человек [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lenta.ru/news/2014/09/18/worldpopulation/>
121. Калашников А. С. Об уравнениях типа нестационарной фильтрации с конечной скоростью распространения возмущений / А. С. Калашников // Вестник МГУ. Сер. 1 «Математика, механика». – 1972. – № 6. – С. 45–49.
122. Калиткин Н. И. Численные методы / Н. И. Калиткин. – Москва : Наука, 1978. – 360 с.
123. Камбефор А. Инъекция грунтов : Пер. с фр. – Москва : Энергия, 1971. – 207 с.
124. Карслоу Т. Теплопроводность твердых тел / Т. Карслоу, Г. Егер. – Москва : Наука, 1964. – 488 с.
125. Карташов Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. – Москва : Высш.шк., 1985. – 480 с.
126. Качанов Л. М. Основы теории пластичности / Л. М. Качанов. – Москва : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1956. – 324 с.
127. Клейн Г. К. Строительная механика сыпучих тел / Г. К. Клейн. – Москва : Стройиздат, 1977. – 256 с.
128. Клейн Г. К. Учет неоднородности, разрывности деформаций и др. механических свойств грунта при расчете сооружений на сплошном основании / Г. К. Клейн // Труды МИСИ им. В. В. Куйбышева. – Москва : Госстройиздат. – 1956. – № 14. – С. 168–180.
129. Коздоба Л. А. Вычислительная теплофизика / Л. А. Коздоба. – К. : Наук. думка, 1991. – 224 с.
130. Козлова О. А. Рост кристаллов. – Москва : Издательство МГУ, 1967. – 239 с.

131. Коллинз Р. Течения жидкостей через пористые материалы / Р. Коллинз. – Москва : Мир, 1964. – 350 с.
132. Колтунов М. А. Ползучесть и релаксация / М. А. Колтунов. – Москва : Высш. шк., 1976. – 277 с.
133. Комаров И. С. Многомерный статистический анализ в инженерной геологии / И. С. Комаров, Н. С. Хайме, А. П. Бабенышев. – Москва : Недра, 1976. – 199 с.
134. Корн Г. Справочник по математике. – Москва : Наука, 1974. – 840 с.
135. Корнейчук Н. П. Сплайны в теории приближения / Н. П. Корнейчук. – Москва : Наука, 1984. – 352 с.
136. Краснов М. П. Интегральные уравнения / М. П. Краснов. – Москва, 1975. – 304 с.
137. Крауч С. Методы граничных элементов в механике твердого тела / С. Крауч, А. Старфилд. – Москва : Мир, 1987. – 328 с.
138. Кризский Н. М. Напряженно-деформированное состояние и сопротивление грунта при вдавливании свай / Н. М. Кризский, Б. В. Моркляник // Будівельні конструкції. – К., 2006. – Вип. 64. – С. 368–376.
139. Кристиансен Р. Введение в теорию вязкоупругости / Р. Кристиансен. – Москва : Мир, 1974. – 338 с.
140. Кудряшев Л. И. Приближенные решения нелинейных задач теплопроводности / Л. И. Кудряшев, Н. Л. Меньших. – Москва : Машиностроение, 1979. – 232 с.
141. Кудряшов Н. А. Приближенные решения одномерных задач нелинейной теплопроводности при заданном потоке / Н. А. Кудряшов, М. А. Чмыхов // Журнал. вычисл. матем. и матем. физ. – 2007. – Т. 47. – № 1. – С. 113–123.
142. Кудряшов Н. А. Приближенное решение одной задачи нелинейной теплопроводности / Н. А. Кудряшов // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 2005. – Т. 45. – № 11. – С. 2048–2055.

143. Кудряшов Н. А. Применение приближенных решений при численном моделировании двумерных задач нелинейной теплопроводности / Н. А. Кудряшов, М. А. Чмыхов // Научная сессия МИФИ-2008 : Сб. науч. тр. : в 15 т. – Т. 9.
144. Купрадзе В. Д. Методы потенциала в теории упругости / В. Д. Купрадзе. – Москва : Физматгиз, 1963. – 472 с.
145. Кульчицкий Л. И. Роль воды в формировании свойств глинистых пород [Текст] / Л. И. Кульчицкий. – Москва : Недра, 1975. – 212 с.
146. Р. Курант. Методы математической физики / Р. Курант, Д. Гильберт. – Москва : Гостехиздат, 1951
147. Курдюмов С. П. Собственные функции горения нелинейной среды и конструктивные законы построения ее организации / С. П. Курдюмов // Современные проблемы математической физики и вычислительной математики. – Москва : Наука, 1982. – С. 217–243.
148. Кушнер С. Г. Расчет деформаций оснований зданий и сооружений / С. Г. Кушнер. – Запорожье, 2008. – 496 с.
149. Ландау Л. Д. Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – Москва : Физматлит, 2003. – 736 с.
150. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. – Москва : Государственное изд-во физико-математической литературы, 1961. – 524 с.
151. Лейбензон Л. С. О движении подогретой вязкой жидкости / Л. С. Лейбензон // Собрание трудов, Т. III, нефтепромысловая механика. – Москва : АН СССР, 1955. – С. 22–68.
152. Лейбензон Л. С. О движении нефти по трубам при температуре, близкой к температуре ее застывания // Собрание трудов, Т. III, нефтепромысловая механика. – Москва : АН СССР, 1955. – С. 204–249.
153. Леонардс Д. Основания и фундаменты / Д. Леонардс. – Москва : Стройиздат, 1968. – 504 с.

154. ЛИРА. Версия 9.0. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций. Руководство пользователя. Кн. 1–3. – К. : НИИАСС, 2002.
155. Лятхер М. В. Краевые задачи динамики водонасыщенной среды / М. В. Лятхер, Б. И. Дидух // Труды гидропроекта. – 1971. – № 20. – С. 52–78.
156. Максаковский В. Географическая картина мира : в 2 кн. Кн. I : Общая характеристика мира / В. П. Максаковский. – 4-е изд., испр. – Москва, 2008.
157. Максимов Р. Д. Особенности соблюдения температурно-временной аналогии при физически нелинейной ползучести полимерных материалов, относящихся к классу реологически простых тел / Р. Д. Максимов, Ч. Л. Дагусте, Е. А. Соколов // Механика полимеров. – 1974. – № 5. – С. 415–427.
158. Малышев М. О. О совместной работе жестких фундаментов и нелинейно-деформируемого основания / М. О. Малышев, Ю. К. Зарецкий // Труды к VIII Междунар. конгрессу по механике грунтов и фундаментостроению. – Москва : Стройиздат, 1973. – С. 97–103.
159. Малышев М. В. Расчет осадок фундаментов при нелинейной зависимости между напряжениями и деформациями в грунтах / М. В. Малышев, Н. С. Никитина // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1982. – № 2. – С. 21–25.
160. Мартинсон Л. К. Дифференциальные уравнения математической физики / Л. К. Мартинсон, Ю. И. Малов. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 368 с.
161. Мартыненко Н. А. Конечные интегральные преобразования и их применение к исследованию систем с распределенными параметрами / Н. А. Мартыненко, Л. М. Пустырников. – Москва : Наука, 1986. – 304 с.
162. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде / М. Маскет. – Москва ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2004. – 640 с.

163. Маслов Н. Н. Задачник по механике грунтов с подробными решениями / Н. Н. Маслов. – Москва : Высш. шк., 1963. – 312 с.
164. Маслов Н. Н. К оценке длительной устойчивости и деформаций подпорных сооружений / Н. Н. Маслов // Труды первого Всесоюзного симпозиума по реологии грунтов. – Ереван, 1973. – С. 69–85.
165. Маслов Н. Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии / Н. Н. Маслов. – Москва : Высш. шк., 1968. – 629 с.
166. Машиностроение. Энциклопедический справочник. Т. I. – Москва, 1947. – 456 с.
167. Медков Е. И. Лекции по курсу «Механика грунтов, основания и фундаменты» / Е. И. Медков. – Москва : Стройиздат, 1964. – 136 с.
168. Месчан С. Р. Механические свойства грунтов и лабораторные методы их определения / С. Р. Месчан. – Москва : Недра, 1974. – 191 с.
169. Мономах. Программный комплекс проектирования ж/б многоэтажных каркасных зданий. Руководство пользователя. Разделы 1–9. – К. : НИИ ИАСС, 2004.
170. Моркляник Б. В. Визначення несучої здатності пальового фундаменту при циклічному заморожуванні-розмерзанні ґрунту / Б. В. Моркляник, П. О. Проценко // Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений : матер. Междунар. студ. науч.-техн. конф. 9–10 апреля 2015 г. – Донецк : Норд-Пресс, 2015. – С. 235–237.
171. Моркляник Б. В. Вплив роботи колекторів теплових насосів на геомеханічну систему «ґрунтовий масив-надфундаментна споруда» / Б. В. Моркляник // Залізобетон минулого і майбутнього : матер. Всеукр. міжвуз. наук. семінару. – Львів, 14–15 травня 2015 р. – С. 49–53.
172. Моркляник Б. В. Влияние работы плоских коллекторов грунтовых тепловых насосов на деформации грунтовых оснований и фундаментов / Б. В. Моркляник, А. С. Фартушний // Перспективы развития горного дела и подземного строительства : матер. VII Междунар. науч.-техн. конф. «Энергетика.

Экология. Человек» (конференция молодых ученых – аспирантов и магистрантов). – Киев : Підприємство УВОІ «Допомога» УСІ», 2015. – С. 168–173.

173. Моркляник Б. В. Вплив колекторів теплових насосів на міцнісні та несучі характеристики основ та фундаментів при знакоперемінних температурах / Б. В. Моркляник, А. С. Фартушний, В. Г. Шаповал // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – Кременчук : КрНУ, 2013. – Вип. 2 (12). – С. 188–195.

174. Моркляник Б. В. Закономерности распределения тепловых полей в грунтовом основании u-образного коллектора теплового насоса / Б. В. Моркляник, В. С. Андреев, В. Г. Шаповал, А. С. Фартушний // Будівельні конструкції. – К., 2013. – Вип. 77. – С. 259–264.

175. Моркляник Б. В. Закономірності деформування геомеханічної системи «фундамент-грунтовий масив» в зоні дії колектора теплового насоса / Б. В. Моркляник. – Львів : Друк-Захід, 2015. – 340 с.

176. Моркляник Б. В. Определение методики расчета тепловых полей в грунтовом основании, образованных в ходе теплообмена между основанием и четырьмя u-образными коллекторами теплового насоса конечной длины / Б. В. Моркляник, В. С. Андреев, А. С. Фартушний, В. Г. Шаповал // Форум гірників – 2013 : матер. Міжнар. наук.-практ. конф., 8 жовтня 2013 р. – Дніпропетровськ : НГУ, 2013. – Т. 2. – С. 243–247.

177. Моркляник Б. В. Перспективи використання теплових насосів в Україні / Б. В. Моркляник // Перспективы освоения подземного пространства: тезисы докладов 1-й Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. – Днепропетровск : НГУ, 2007. – С. 57–59.

178. Моркляник Б. В. Температурное поле в основании плоского коллектора теплового насоса конечных размеров / Б. В. Моркляник, А. С. Фартушний, В. Г. Шаповал // Перспективы развития горного дела и подземного строительства : матер. V-й Междунар. науч.-техн. конф. «Энергетика. Экология. Человек» (конференция молодых ученых – аспирантов и магистрантов). – К., 2015. – С. 53–57.

179. Моркляник Б. В. Тепловые поля в грунтовом основании, образованные в ходе теплообмена между основанием и четырьмя U-образными коллекторами теплового насоса неограниченной длины / Б. В. Моркляник, А. С. Фартушный, В. Г. Шаповал // Перспективы развития горного дела и подземного строительства : матер. V-й Междунар. науч.-техн. конф. «Энергетика. Экология. Человек» (конференция молодых ученых – аспирантов и магистрантов). – К., 2013. – С. 49–53.

180. Моркляник Б. В. Закономерности изменения тепловой энергии в грунтовой основе при работе вертикального или плоского коллектора теплового насоса / Б. В. Моркляник // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук : КрНУ, 2015. – Вип. 3(92). – Ч. 1. – С. 85–90.

181. Моркляник Б. В. Закономерности изменения тепловой энергии в основании U-образного коллектора теплового насоса / Б. В. Моркляник, В. С. Андреев // Геотехнічна механіка. – Дніпропетровськ : ІГТМ НАН України. – 2011. – Вип. 94. – С. 140–143.

182. Моркляник Б. В. Закономерности сезонного распределения тепловых полей в грунтовом основании / Б. В. Моркляник // Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського. – 2015. – № 2 (91). – С. 149–153.

183. Моркляник Б. В. Методика розрахунку температурних полів, обумовлених теплообміном між чотирма U-подібними колекторами теплового насоса необмеженої довжини та ґрунтовими основами / Б. В. Моркляник, А. С. Фартушний, В. Г. Шаповал // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. – Рівне, 2014. – Вип. 28. – С. 436–441.

184. Моркляник Б. В. 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.

185. Моркляник Б. В. Особенности расчета и проектирования оснований тепловых насосов / Б. В. Моркляник, В. Г. Шаповал, А. С. Фартушный // Будівельні конструкції. – К., 2013. – Вип. 77. – С. 265–269.
186. Мустафаев А. А. Основы механики просадочных грунтов / А. А. Мустафаев. – Москва : Стройиздат, 1976. – 263 с.
187. Мустафаев А. А. Расчет оснований и фундаментов на просадочных грунтах / А. А. Мустафаев. – Москва : Высш. шк., 1979. – 368 с.
188. Мустафаев А. А. Прогноз просадки во времени в основаниях сооружений / А. А. Мустафаев, Э. М. Садетова // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1979. – № 3. – С. 14–17.
189. Наказ Держкомбуду України № 5 від 10.01.1995 “Про реалізацію заходів про впровадженню у проектуванні та житлово-цивільному будівництві енергоефективних огорожуючих споруд”.
190. Немчинов Ю. И. Метод пространственных конечных элементов. – К. : НДІБК, 1995. – 368 с.
191. Нерпин С. В. Физика почвы [Текст] / С. В. Нерпин, А. Ф. Чудновский. – Москва : Наука, 1967. – 584 с.
192. Новацкий В. Теория упругости / В. Новацкий. – Москва : Мир, – 1975. – 872 с.
193. Овсянников Л. В. Групповые свойства нелинейного уравнения теплопроводности / Л. В. Овсянников // Докл. АН СССР. – 1959. – Т. 125. – С. 492–495.
194. Омарова Б. А. Оценка промерзания земляного полотна железных дорог в регионах Казахстана / Б. А. Омарова // Будівельні матеріали, конструкції та споруди : зб. наук. пр. УкрДАЗТ. – 2013. – Вип. 138. – С. 210–215.
195. Осадки фундаментов. Обзор по ряду стран Африки, Азии и Европы. – *Bâtir*. – № 189. – 1970. – С. 37–42.
196. ОСТ 30491-2012 Смеси органоминеральные и грунты, укрепленные органическими вяжущими, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 25 с.

197. Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat/rosstatsite/main/comparison/> (дата звернення 23.10.2012 р.).
198. Пекарская Н. К. Прочность и ползучесть мерзлых грунтов и расчеты ледогрунтовых ограждений / Н. К. Пекарская, Е. П. Шушерина. – Москва : Изд-во АН СССР, 1962. – 254 с.
199. Подстригач Я. С. Термоупругость тел неоднородной структуры / Я. С. Подстригач, В. А. Ломакин, Ю. М. Коляно. – Москва : Наука, 1984 – 368 с.
200. Пономарев А. Б. Энергетические фундаменты / А. Б. Пономарев, А. А. Атаманов // Строительная наука и техника. – 2008. – № 4. – С. 57–61.
201. Популярная механика.– № 8 (70). – Москва , 2008. – С. 78–81.
202. Посібник з проектування інженерних систем житлових і громадських будинків з тепловими насосами. – Київ, 2010. – 82 с.
203. Приходченко О. Е. Напряженно-деформированное состояние лессовых оснований в процессе влагопереноса : автореферат докторской диссертации. – Киев, 1996. – 21 с.
204. Прогноз погружаемости забивных свай в грунтах со сложными реологическими свойствами / В. Н. Аптуков, И. М. Омельчак, Н. В. Абрешитов, Н. И. Большакова // В кн.: Расчет и проектирование свай и свайных фундаментов. Труды II Всесоюзной конференции «Современные проблемы свайного фундаментостроения в СССР». – Пермь, 1990. – Т. 1. – С. 70–71.
205. Продовольственная и сельскохозяйственная организация оон. 925 миллионов в мире страдают от хронического голода [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fao.org/news/story/ru/item/45302/icode/ресс-центр>.
206. Прудников А. П. Интегралы и ряды. Специальные функции / А. П. Прудников, Ю. А. Брычков, О. И. Маричев. – Москва : Наука, 1983. – 752 с.
207. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю. Н. Работнов. – Москва : Наука, 1979. – 744 с.

208. Ратькова Е.И. Изменения состояния лесных грунтов в переходные периоды: промерзание и оттаивание / Е. И. Ратькова // Resources and Technology. – 2010. – № 8. – С. 123–125.

209. Ратькова Е. И. Влияние цикла «замораживание – оттаивание» на модуль деформации и коэффициент сжимаемости суглинков / Е. И. Ратькова, В. С. Сюнёв, В. К. Катаров // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2013. – № 4(133). – С. 75–78.

210. Ратькова Е. И. Воздействие циклов «замораживание – оттаивание» на деформационные свойства лесных почво-грунтов Карелии / Е. И. Ратькова, В. С. Сюнёв, В. К. Катаров // Resources and Technology. – 2013. – № 10 (1) – С. 74–89.

211. Ржаницин А. Р. Теория ползучести / А. Р. Ржаницин. – Москва : Стройиздат, 1968. – 418 с.

212. Роза С. А. Механика грунтов / С. А. Роза. – Москва : Высш. шк., 1962. – 229 с.

213. Роман Р. Т. Сопоставительный анализ результатов прогноза длительной деформируемости мерзлых грунтов различными методами / Р. Т. Роман // Тезисы четвертого симпозиума по реологии грунтов. – Самарканд, 1982. – С. 145–146.

214. Роман Л. Т. Выбор прогнозных уравнений длительной прочности мерзлых грунтов / Л. Т. Роман, Д. Н. Кривов, В. И. Аксенов // Матер. Междунар. конф. «Криосфера нефтегазоносных провинций». – Тюмень, 2004 – С. 64–65.

215. Роман Л. Т. Механика мерзлых грунтов / Л. Т. Роман. – Москва : МАИК «Наука / Интерпериодика», 2002. – 426 с.

216. Рощин В. В. Определение модуля деформации глинистого грунта с учетом структурной прочности из компрессионных испытаний / В. В. Рощин // Строительство на слабых грунтах : сб. тр. РПИ. – Рига, 1970. – С. 160–163.

217. Руководство по наблюдениям за деформациями оснований и фундаментов зданий и сооружений // НИИОСП. – Москва : Стройиздат, 1978. – 156 с.
218. Руководство по проектированию зданий и сооружений // НИИОСП. – Москва : Стройиздат, 1978. – 375 с.
219. Русское географическое общество. Дефицит природных ресурсов в мире и в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://old.rgo.ru/2010/09/deficit-prirodnых-resursov/>
220. Савкин В. И. Продовольственная безопасность государства: от экономики производства до экономики потребления / В. И. Савкин, И. И. Прока // Образование, наука и производство. – 2012. – № 1. – С. 14–21.
221. Самарский А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1983. – 293 с.
222. Самарский А. А. Примеры численного расчета температурных волн / А. А. Самарский, И. М. Соболев // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 1963. – Вып. 3. – № 4. – Р. 703–719.
223. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем / А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1977. – 653 с.
224. Самарский А. А. Локализация процессов диффузии в средах с постоянными свойствами / А. А. Самарский, В. А. Галактионов, С. П. Курдюмов, А. П. Михайлов // Доклады АН СССР. – 1979. – Т. 247. – № 32. – С. 349–353.
225. Самарский А. А. Эффект метастабильной локализации тепла в среде с нелинейной теплопроводностью / А. А. Самарский, Н. В. Дмитренко, С. П. Курдюмов, А. П. Михайлов // Доклады АН СССР. – 1975. – Вып. 223. – № 6. – Р. 1344–1347.
226. Самарский А. А. Локализация тепла в среде с нелинейной теплопроводностью / В. А. Галактионов, С. П. Курдюмов, А. П. Михайлов, А. А. Самарский // Дифференциальные уравнения. – 1981. – Вып. 17. – № 10. – Р. 1826–1841.

227. Самарский А. А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / А. А. Самарский, А. П. Михайлов. – Москва : Наука. Физматлит, 1997. – 320 с.
228. Самарский А. А. Устойчивость разностных схем / А. А. Самарский, А. В. Гулин. – Москва : Эдиториал УРСС, 2005. – 384 с.
229. Свайные работы : Справочник. – Москва : Стройиздат, 1979. – 132 с.
230. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. – Москва : Наука, 1965. – 388 с.
231. Сергеев Е. М. Грунтоведение [Текст] / Е. М. Сергеев, Г. А. Голодковская, Р. С. Зиангиров и др. – Москва : Изд-во Московск. ун-та, 1983. – 392 с.
232. Слободянюк С. А. Особенности обследования конструкций автодорожных железобетонных мостов / С. А. Слободянюк, В. Г. Шаповал, А. Ю. Конопляник, А. П. Буратинский // Новини науки Придніпров'я. – Дніпропетровськ. – 2006. – № 4. – С. 43–50.
233. СП 58.13330.2012 Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003. – Москва : Мин-регион России, 2012.
234. СНиП 2.02.02–85. Основания гидротехнических сооружений.
235. СНиП 2.02.03–85. Свайные фундаменты.
236. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды / В. В. Соколовский. – Москва : Гостехиздат, 1954. – 275 с.
237. Сорочан Е. А. Совместная работа фундамента и основания при набухании грунта. Строительные свойства и расчет несущей способности и осадок фундаментов / Е. А. Сорочан, В. П. Дьяконов // Труды НИИОСП. – Москва : 1982. – Вып. 78. – С. 60–74.
238. Тер-Мартirosян З. Г. Механика грунтов / З. Г. Тер-Мартirosян. – М. : 2005. – 488 с.

239. Тер-Степанян Г. И. Исследования ползучести глинистых грунтов при сдвиге / Г. И. Тер-Степанян, С. Р. Месчан, Р. Р. Галстян // Труды к VII Международному конгрессу по механике грунтов и фундаментостроению. – Москва : Стройиздат, 1973. – С. 51–63.
240. Терцаги К. Строительная механика грунтов / К. Терцаги. – Москва : Госстройиздат, 1933. – 392 с.
241. Терцаги К. Теория механики грунтов / К. Терцаги. – Москва : Гостройиздат, 1961. – 507 с.
242. Тимошенко С. П. Теория упругости / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьир. – Москва : Наука, 1975. – 576 с.
243. Тимошенко С. П. С. Войновский – Кригер. Пластины и оболочки / С. П. Тимошенко. – Москва : Наука, 1966. – 636 с.
244. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1972. – 736 с.
245. Трощев В. Е. Проблема совмещения конечно — элементных схем в задачах газовой динамики с теплопроводностью / В. Е. Трощев, Р. М. Шагалиев // Математическое моделирование. – 2000. – Т. 12. – № 2. – С. 3–11.
246. Трощев В. Е. Консервативные узловые схемы методов конечных разностей и конечных элементов для двумерного уравнения теплопроводности / В. Е. Трощев, Р. М. Шагалиев // Численные методы механики сплошной среды. – 1984. – Т. 15. – № 4. – С. 131–157.
247. Туровская А. Я. О влиянии деформаций на структуру глинистых грунтов / А. Н. Туровская // Научное сообщение. – Днепропетровск : ДИИТ, 1956. – № 4. – С. 1–13.
248. Туровская А. Я. Ускоренный метод определения предела длительной прочности глинистых грунтов / А. Я. Туровская, Н. Б. Черненко // Тезисы докладов четвертого симпозиума по реологии грунтов. – Самарканд, 1982. – С. 166–168.

249. Уорсинг А. Методы обработки экспериментальных данных / А. Уорсинг, Дж. Гефнер. – Москва : Изд-во иностранной лит., 1953. – 347 с.
250. Ухов С. Б. Механика грунтов, основания и фундаменты : учебник / С. Б. Ухов и др. – Москва : Изд. АСВ, 1994. – 527 с.
251. Федорчук М. В. Асимптотические методы для линейных обыкновенных дифференциальных уравнений / М. В. Федорчук. – Москва : Наука, 1983. – 352 с.
252. Физическая энциклопедия / Гл. ред. А. М. Прохоров ; ред. кол. Д. М. Алексеев, А. М. Балдин, А. М. Бонч-бруевич, А. С. Боровик-Романов и др. – Москва : Сов. энциклопедия. Т. 1. Аарона-Бома эффект – Длинные линии, 1988. – 704 с.
253. Физическая энциклопедия / Гл. ред. А. М. Прохоров ; ред. кол. Д. М. Алексеев, А. М. Балдин, А. М. Бонч-бруевич, А. С. Боровик-Романов и др. – Москва : Сов. энциклопедия. Т. 2. Добротность – Магнитооптика. 1990. – 703 с.
254. Физическая энциклопедия / Гл. ред. А. М. Прохоров ; ред. кол. Д. М. Алексеев, А. М. Балдин, А. М. Бонч-бруевич, А. С. Боровик-Романов и др. – Москва : Большая Российская энциклопедия. Т. 3. Магнитоплазменный – Пойнтинга теорема, 1992. – 672 с.
255. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галеркина / К. Флетчер. – Москва : Мир, 1988. – 352 с.
256. Флорин В. А. Основы механики грунтов. – Ленинград ; Москва : Госстройиздат, 1959. – Т. 1. – 357 с.
257. Флорин В. А. Основы механики грунтов. – Ленинград ; Москва : Гостройиздат, 1961. – Т. 2. – 543 с.
258. Харр М. Е. Основы теоретической механики грунтов / М. Е. Харр. – Москва : Стройиздат, 1971. – 320 с.
259. Химическая энциклопедия : в 5 т. : т. 1: А–Дарзана / ред-кол.: И. Л. Кнунянц (гл. ред) и др. – Москва : Сов. Энцикл., 1988. – 633 с.

260. Химическая энциклопедия : в 5 т. Т. 2: Даффа-Меди / ред-кол.: И. Л. Кнунянц (гл. ред) и др. – Москва : Сов. Энцикл., 1990. – 671 с.
261. Химическая энциклопедия : в 5 т. Т. 3: Меди-Полимерные / ред-кол.: И. Л. Кнунянц (гл. ред) и др. – Москва : Большая Российская энцикл., 1992. – 639 с.
262. Химическая энциклопедия : в 5 т. Т. 4: Полимерные-Трипсин / ред-кол.: Н. С. Зефиоров (гл. ред) и др. – Москва : Большая Российская энцикл., 1995. – 639 с.
263. Химическая энциклопедия : в 5 т. : т. 5: Триптофан-Ятрохимия / Ред-кол.: Н. С. Зефиоров (гл. ред) и др. – Москва : Большая Российская энцикл., 1998. – 783 с.
264. Хокни Р. Численное моделирование методом частиц / Р. Хокни, Дж. Иствуд. – Москва : Мир, 1987. – 640 с.
265. Центр новин ООН. Глава ФАО сообщил о нехватке финансирования для проектов в Африканском Роге и регионе Сахель [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.un.org/russian/news/fullstorynews.asp?newsID=17470>
266. Центр новин ООН. Развитие не может быть устойчивым, если каждый седьмой человек в мире голодает [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.un.org/russian/news/fullstorynews.asp?NewsID=17348>
267. Цытович Н. А. Механика грунтов (краткий курс) : учеб. для строит. вузов / Н. А. Цытович. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высш. шк., 1983. – 288 с., ил.
268. Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов / Н. А. Цытович. – Москва : Высш. шк., 1973. – 446 с.
269. Цытович Н. А. Прогноз скорости осадок оснований и сооружений / Н. А. Цытович, Ю. К. Зарецкий, М. В. Малышев, М. Ю. Абелев, З. Г. Тер-Мартirosян. – Москва : Стройиздат, 1967. – 238 с.
270. Цытович Н. А. Основы прикладной геомеханики в строительстве / Н. А. Цытович, З. Г. Тер-Мартirosян. – Москва : Высш. шк., 1981. – 317 с.

271. Цытович Н. А. Развитие инженерного метода прогноза осадок фундаментов сооружений / Н. А. Цытович // Труды VII Международного конгресса по механике грунтов и фундаментостроению. – Москва : Стройиздат, 1969. – С. 110–117.
272. Чаповский Е. Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов / Е. Г. Чаповский. – Москва : Недра, 1975. – 304 с.
273. Человек и прогресс. Ресурсные проблемы [Электронный ресурс]. – Режим доступа (дата звернения 17.03.2012): ultraprogress.ru/problemi.../problema...resursov/reshenie-problemi.html
274. Черкасов И. И. Механические свойства грунтов в дорожном строительстве / И. И. Черкасов. – Москва : Стройиздат, 1976. – 247 с.
275. Черная К. В. Использование конструкций фундаментов глубокого заложения при извлечении геотермальной энергии / К. В. Черная // Світ геотехніки. – № 1. – 2006. – С. 27–31.
276. Черников А. К. Теоретические основы геомеханики / А. К. Черников. – Санкт-Петербург : Изд-во СПб ун-та, 1994. – 187 с.
277. Черный Г. И. Ефективність забивання та віброзанурення палей в ґрунти різної вологості / Г. И. Черный, Б. В. Моркляник // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2008. – № 627. – С. 200–204.
278. Черный Г. И. Зависимости сопротивления грунтов забивке свай от показателей их свойств / Г. И. Черный, Б. В. Моркляник // Свайные фундаменты. Экспериментально-теоретические исследования и практика проектирования : труды Междунар. науч.-технич. конф., посвященной 50-летию БашНИИ-Истроя. – Уфа, 2006. – С. 148–154.
279. Чмыхов М. А. Приближенные решения одномерных задач нелинейной теплопроводности / М. А. Чмыхов // Научная сессия МИФИ-2006 : сб. науч. тр. : в 16 т. – Москва : МИФИ, 2006. – Т. 7. – С. 110–111.
280. Шагапов В. Ш. О динамике накопления атмосферных выбросов отрицательной плавучести в безветренную погоду / В. Ш. Шагапов, Г. Р. Галиаскарова // ИФЖ. 2002. – Т. 75. – № 2. – С. 22–27.

281. Шаповал А. В. Теория взаимосвязанной фильтрационной консолидации : монография / А. В. Шаповал, В. Г. Шаповал. – Днепропетровск : Пороги, 2009. – 311 с.
282. Шаповал А. В. Алгоритм побудови асимптотичних рішень задач про осідання водонасичених основ / А. В. Шаповал, В. Г. Шаповал // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. – Рівне, 2014. – Вип. 28. – С. 463–469.
283. А. В. Шаповал. Новые проблемы фундаментостроения и механики грунтов – совмещенные основания и фундаменты тепловых насосов / А. В. Шаповал, В. В. Капустин, Б. В. Моркляник, А. С. Фартушный, В. В. Хаустов // Известия юго-западного государственного университета. Серия техника и технологии. – Курск, 2014. – № 3. – С. 61–64.
284. Шаповал А. В. Влияние глубины приложения нагрузки на распределение напряжений в грунтовом основании / А. В. Шаповал, В. И. Кабрель, В. Г. Шаповал // Зб. наук. пр. (галузеве машинобудування, будівництво) / Полтавський національний університет ім. Ю. Кондратюка. – Вип. 3 (28). – Полтава : ПолтНТУ, 2010. – С. 292–297.
285. Шаповал А. В. Метод граничных элементов в задачах определения НДС водонасыщенных грунтовых оснований, обладающих свойством ползучести / А. В. Шаповал, В. Г. Шаповал, В. В. Капустин // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Вип. 14. – Дніпропетровськ : Вид ДНУЗТ, 2007. – С. 220–224.
286. Шаповал А. В. Напряженно-деформированное состояние грунтового полупространства, внутри которого приложена осесимметричная распределенная загрузка : монография / А. В. Шаповал, Б. В. Моркляник, В. С. Андреев, В. Г. Шаповал, В. И. Кабрель. – Днепропетровск : Пороги, 2011. – 94 с.
287. Шаповал А. В. Приближенное общее решение задачи теории взаимосвязанной фильтрационной консолидации обладающего свойством ползучести грунта / А. В. Шаповал, В. Г. Шаповал // Форум гірників–2013 : матер.

міжнар. конф., 2–5 жовт. 2013 р., м. Дніпропетровськ. Національний гірничий університет, 2013. – Т. 2. – С. 7–13.

288. Шаповал В. Г. Алгоритм построения разложений в асимптотические ряды при нахождении обратного преобразования Лапласа в задачах теплопереноса и фильтрационной консолидации / В. Г. Шаповал, А. В. Шаповал, Е. С. Титякова // Світ геотехніки. – № 4. – 2005. – С. 12–16.

289. Шаповал В. Г. Вариационные методы граничных элементов и сплайнов в контактных задачах : монографія / В. Г. Шаповал, А. В. Шаповал, Б. В. Моркляник, В. С. Андреев. – Львів : Друк-Захід, 2014. – 96 с.

290. Шаповал В. Г. Закономерности изменения во времени температуры на дневной поверхности грунтовых оснований / В. Г. Шаповал, Б. В. Моркляник // Галузеве машинобудування, будівництво : зб. наук. пр. – Полтава : ПолтНТУ, 2010. – Вип. 3 (28). – С. 298–302.

291. Шаповал В. Г. Математическая формализация процессов уплотнения водонасыщенных грунтовых оснований / В. Г. Шаповал // Строительство, материаловедение, машиностроение. GAUDEAMUS. – Днепропетровск, 2000. – С. 321–327.

292. 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

293. Шаповал В. Г. Механика грунтов / В. Г. Шаповал, В. Л. Седин, А. В. Шаповал, Б. В. Моркляник, В. С. Андреев // Учебник. – Днепропетровск : Пороги, 2010. – 168 с.

294. Шаповал В. Г. Общее решение динамической задачи теории взаимосвязанной фильтрационной консолидации при осевой симметрии / В. Г. Шаповал // II Укр. науч.-техн. конф. по механике грунтов и фундаментостроению. – Полтава, 1995. – С. 14–16.

295. Шаповал В. Г. О целесообразности использования грунтовых оснований в качестве накопителей тепла / В. Г. Шаповал, Б. В. Моркляник,

А. В. Шаповал // Галузеве машинобудування, будівництво : зб. наук. пр. – Полтава, 2008. – Вип. 22. – С. 138–142.

296. Шаповал В. Г. О фильтрационной консолидации в условиях осевой симметрии / В. Г. Шаповал, В. Б. Швец, С. П. Кандзюба, С. О. Поповиченко // Интенсификация рабочих процессов строительного производства: – К., 1993. – С. 285–289.

297. Шаповал В. Г. Основания и фундаменты тепловых насосов / В. Г. Шаповал, Б. В. Моркляник. – Львов : Сполом, 2009. – 64 с.

298. Шаповал В. Г. Применение обобщенных функций в теории консолидации многослойных сред / В. Г. Шаповал, С. П. Кандзюба // Интенсификация рабочих процессов строительного производства. – К., 1992. – С. 57–62.

299. Шаповал В. Г. Температурные поля в основаниях грунтовых тепловых насосов : монография / В. Г. Шаповал, Б. В. Моркляник. – Днепропетровск : Пороги, 2011. – 123 с.

300. Шаповал В. Г. Теоретические исследования закономерностей сезонного распределения температуры в грунтовом основании / В. Г. Шаповал, Б. В. Моркляник // Перспективы развития строительных технологий: матер. 9-й Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов, 23–24 апреля 2015 г. – Донецк : НГУ, 2015. – С. 250–254.

301. Шаповал В. Г. Тепловые насосы, энергетические основания и фундаменты. Часть 1 / В. Г. Шаповал, Б. В. Моркляник // Світ геотехніки. – № 1. – 2009. – С. 27–29.

302. Шаповал В. Г. Тепловые насосы, энергетические основания и фундаменты. Часть 2 / В. Г. Шаповал, Б. В. Моркляник // Світ геотехніки. – № 2. – 2009. – С. 28–29.

303. Шаповал В. Г. Тепловые насосы, энергетические основания и фундаменты. Часть 3 / В. Г. Шаповал, Б. В. Моркляник // Світ геотехніки. – № 3. – 2009. – С. 24–26.

304. Шаповал В. Г. Тепловые насосы, энергетические основания и фундаменты. Часть 4 / В. Г. Шаповал, Б. В. Моркляник // Світ геотехніки. – № 4. – 2009. – С. 32–33.

305. Шашенко О. М. Механіка ґрунтів, основи і фундаменти. Методичні рекомендації до вивчення дисципліни студентами напряму підготовки 6.060101 Будівництво / О. М. Шашенко, В. Г. Шаповал, В. П. Пустовойтенко, Н. В. Хозяйкіна, К. С. Тітякова, К. С. Причина, В. А. Легенченко. – Донецьк : Національний гірничий університет, 2013. – 53 с.

306. Шашенко О. М. Напружено-деформований стан півпростору, всередині якого знаходиться точкове джерело об'ємної деформації / О. М. Шашенко, В. Г. Шаповал, Б. В. Моркляник, А. В. Шаповал // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – Кременчук : КрНУ, 2014. – Вип. 2 (14). – С. 24–31.

307. Шашенко А. Н. Механика горных пород / Нац. гор. ун-т. – Донецк, 2002. – 303 с.

308. Швец В. Б. Общее решение динамической задачи теории взаимосвязанной фильтрационной консолидации / В. Б. Швец, В. Г. Шаповал // Сб. трудов Российской конференции по механике грунтов и фундаментостроению «Геотехника-95». – С-Пб, 1995. – Т. 4. – С. 701–705.

309. Швец В. Б. Фильтрационная консолидация слоя конечной толщины под воздействием местной нагрузки / В. Б. Швец, В. Г. Шаповал, С. П. Кандзюба, С. О. Поповиченко // Сб. трудов Российской конференции по механике грунтов и фундаментостроению «Геотехника-95». – С-Пб, 1995. – Т. 4. – С. 711–715.

310. Швец В. Б. Фундаменты промышленных, гражданских и транспортных сооружений на слоистых грунтовых основаниях / В. Б. Швец, В. Г. Шаповал, В. Д. Петренко и др. – Днепропетровск : Новая идеология, 2008. – 274 с.

311. Швець В. Б. Механіка ґрунтів. Основи та фундаменти : підручник / В. Б. Швець, І. П. Бойко, Ю. Л. Винников, М. Л. Зоценко,

О. О. Петраков, О. В. Солодякин, В. Г. Шаповал, О. М. Шашенко, С. В. Біда. – Дніпропетровськ : Пороги, 2014. – 231 с.

312. Швец В. Б. Общее решение пространственной задачи теории взаимосвязанной фильтрационной консолидации / В. Б. Швец, В. Г. Шаповал // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1994. – № 5 – С. 19–21.

313. Шукле Л. Реологические основы механики грунтов / Л. Шукле. – Москва : Стройиздат, 1973. – 485 с.

314. Эльсгольц Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л. Э. Эльсгольц. – Москва : Наука. 1965 – 424 с.

315. Эмих В. Н. Математические модели фильтрации и их приложения : сб. науч. тр. / под ред. В. Н. Эмих. – Новосибирск : Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева, 1999. – 204 с.

316. Юркина Р. Г. Прогноз осадок сооружений по данным обработки / Р. Г. Юркина, Л. И. Веденистова. – Хабаровск, 1983.

317. Янисо В. А. Результаты измерений осадок зданий / В. А. Янисо // Прибалтийская геотехника. – Таллинн, 1972. – С. 4–15.

318. Янисо В. А. Ход осадки зданий и сооружений на слабых грунтах Эстонской ССР : автореф. канд. дис. ... / В. А. Янисо. – Талинн, 1977.

319. Яковлев К. П. Математическая обработка результатов измерений / К. П. Яковлев. – Москва : Гостехиздат, 1953. – 383 с.

320. Яненко Н. Н. Об одном разностном методе счета многомерного уравнения теплопроводности / Н. Н. Яненко // Доклады АН СССР. – 1959. – Т. 125, № 6. – С. 1207–1210.

321. Barends B. J. Associating With advancing insindht. 16 ICSMGE, Japan, Osaka, 2005. – P. 217–248.

322. Biot M. A. Effect of Certain Discontinuities on Pressure Distributions in a Loaded Soil. Physics. –1935. – Vol. 6. – P. 365.

323. Biot M. General Theory of Three-Dimensional Consolidation // I. Appl. Mech. – Vol. 12. – № 2. – P. 155–161.

324. Bishop A. Creep characteristics of two undisturbed clays / A. Bishop, H. Lownbery // Proc. 7-th ICSMFE. – Mechico, 1969. – V. I. – P. 29–37.
325. Brandl H. Energy foundation and other thermo-active ground structures / H. Brandl // Geotechnique 56. – 2006. – P. 81–122.
326. Brandl H. Energy piles and diaphragm walls for heat transfer from and into the ground / H. Brandl // Proceedings of the 3-h international Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles. Ghent. Technical University, Vienna, Austria, 1998. – P. 38–60.
327. Burmister D. M. Stress and Displacement Characteristics of a Two-Layer Rigid Base Soil System: Influence Diagrams and Practical Application. – Proc. 35th Annual Meeting, 1956. – P. 773.
328. Cannon, John Rozier. The One-Dimensional Heat Equation / Cannon, John Rozier // Encyclopedia of Mathematics and Its Applications, Reading – 1st ed. / Cambridge University Press. – Menlo Park ; London; Don Mills ; Sidney ; Tokyo ; Cambridge; New York ; New Rochelle ; Melbourne ; Sidney : Addison-Wesley Publishing Company. – 1984. – Vol. 23.
329. Carslaw H. S. Conduction of Heat in Solids / H. S. Carslaw. – 2nd ed. – Oxford : University Press, 1959.
330. Crank J. A Practical Method for Numerical Evaluation of Solutions of 33 of the Heat-Conduction Type / J. Crank, P. Nicolson, D. R. Hartree // Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. – 1947. – T. 43. – P. 50–67.
331. Einstein A. Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen / Albert Einstein // Ann. Phys. –Leipzig – 1905. – T. 322 (8). –P. 549–560.
332. Evans L. C. Partial Differential Equations / L. C. Evans // American Mathematical Society, 1998.
333. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Number of hungry people rises to 963 million [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fao.org/news/story/en/item/8836/icode/>

334. <https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&cad=rja&uact=8&ved=0CDUQFjAD&url=http%3A%2F%2Fblog.simmakers.ru%2Fprimeneniye-ansys-dlya-teplotekhnicheskikh-raschetov-gruntov%2F&ei=99KQVfWXGovzUNierugO&usg=AFQjCNHvJOvOHEHs2CbZu3fXaCaJD-jyQA>.

335. Fritz J. Partial Differential Equations / John Fritz. – 4th ed. – Springer, 1991.

336. Kezdi A. Handbuch der Bodenmechanik / A. Kezdi. – Verlag : VEB, 1969. – Bd. I. – 258 s.

337. Miansari M. Application of he's variational iteration method to nonlinear heat transfer equations / M. Miansari, D. Ganji, M. Miansari // Physics Letters A. – 2008. – Vol. 372. – No. 6. – P. 779–785.

338. Morklyanyk B. Simulation of the Impact of Work of Heat Pumps on the Frost Heaving of the Base Soil / B. Morklyanyk, A. Fartushnyy // Econtechmod: an International Quarterly Journal on economics of technology and modeling processes. – Lublin-Rzeszow, 2015. – Vol. 04, No. 2. – P. 71–74.

339. Morklyanyk B. V. The Heat Pumps Foundation Design Calculation Aspects / B. V. Morklyanyk // Academic Journal of Science. – 2013. – Vol. 02. – No. 01. – P. 283–288.

340. Perona P. Scale-Space and Edge Detection Using Anisotropic Diffusion / P. Perona, J. Malik // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1990. – T. 12 (7). – P. 629–639.

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

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

343. Shapoval V. G. Equation of motion of a water-bearing anisotropy soil // Theoretical Foundations in Civil Engineering. – Warsaw, 1996. – P. 326–331.

344. Shapoval A. V. Peculiarities of the Development of Deep Foundation Settlements / A. V. Shapoval, B. V. Morklyanyk // Academic Journal of Science. – 2013. – Vol. 02. – No. 01. – P. 289–293.
345. Shvets V. B. The method determining of reological characteristics of the saturated Soils / V. B. Shvets, V. G. Shapoval // Theoretical Foundations in Civil Engineering. – Warsaw, 1994. – P. 216–220.
346. Shvets V. B. The prognosis of the stress-strain state of plate foundations under the cyclic loading on the soil layer of finite thickness / V. B. Shvets, V. G. Shapoval, S. O. Popovichenko // Theoretical Foundations in Civil Engineering. – Warsaw, 1994. – P. 331–355.
347. Thambynayagam R. K. M. The Diffusion Handbook: Applied Solutions for Engineers / R. K. M. Thambynayagam. – McGraw-Hill Professional, 2011.
348. Unsworth J. Heat diffusion in a solid sphere and Fourier Theory / J. Unsworth, F. J. Duarte // Am. J. Phys. – 1979. – T. 47 (11). – P. 891–893.
349. Wilmott P. The Mathematics of Financial Derivatives: A Student Introduction / P. Wilmott, S. Howison, J. Dewynne. – Cambridge : Cambridge University Press, 1995.

ДОДАТКИ



**МІНІСТЕРСТВО РЕГІОНАЛЬНОГО РОЗВИТКУ,
БУДІВНИЦТВА ТА ЖИТЛОВО-КОМУНАЛЬНОГО
ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ**

Департамент систем життєзабезпечення та житлової політики

вул. Велика Житомирська, 9, м. Київ, 01601; (044) 207-18-56, 207-18-36, факс (044) 207-18-36

e-mail: Gesenko@minregion.gov.ua

02.07.2015 № 8/9-1957-15 на № _____ від _____

Національному університету

«Львівська політехніка»

Використання теплових насосів у містах з великою щільністю забудови викликає низку негативних наслідків щодо стійкості будівель і споруд, які розташовані поруч з місцями установки колекторів теплових насосів.

При цьому в Україні відсутні нормативні документи, що дозволяють виконувати проектування теплових насосів у містах з великою щільністю забудови.

Саме за цих причин, дослідження напружено – деформованого стану ґрунтових основ навколо колекторів теплових насосів є актуально науково – технологічною проблемою.

Робота к.т.н. Морклянником Богданом Васильовичем «Закономірності деформування геомеханічної системи «фундамент-ґрунтовий масив» в зоні дії колектора теплового насосу», що виконувалась в рамках наукових програм: «Енергоощадні технології у будівництві» 0114U005248, «Розробка та вдосконалення методів розрахунку конструкцій, мостів, будівель та споруд 0114U005249 кафедри «Мости та будівельна механіка» Національного університету «Львівська політехніка» є досить актуальною, а поставлені у ній задачі виконано, робота має чіткі рекомендації щодо проектування теплових насосів.

Загалом, за результатами виконаної роботи використано наступні результати:

1. Поставлено і вирішено задачу визначення теплових полів, зумовлених взаємодією колекторів теплових насосів і основ.

2. Запропоновано і досліджено методику розрахунку напружено-деформованого стану ґрунтів основи та елементів конструкцій, у яких розміщено колектори теплових насосів.

3. Розроблено практичні рекомендації і доповнення до нормативних документів із розрахунку і проектування основ і фундаментів, в яких розміщено колектори теплових ґрунтових насосів.

Результати роботи будуть використані при розробленні нормативних документів, які регламентуватимуть вимоги до проектування систем, що використовують низько потенційне тепло ґрунтів основи для опалення.

Директор Департаменту



С.І.Кушнір

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи

Національного університету

«Львівська політехніка»

проф. Чухрай Н.І.

« _____ » 2015р

р



ЗАТВЕРДЖУЮ

Голова правління

Корпорація «Ріел-Груп»

Мельник Р.Л.

« _____ » 2015



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, що нижче підписалися, комісія в складі представників Корпорації «Ріел-Груп»: голова правління Мельник Р.Л. та генеральний підрядник ТзОВ «Львів-Буд» в особі Дубовик О.М. з одного боку, і від Національного університету «Львівська політехніка» Моркляник Б.В, кандидат технічних наук, доцент кафедри «Мости та будівельна механіка» з іншого боку, склали цей акт про те, то за час з грудня 2012 року по липень 2015 року при проектуванні і будівництві житлових комплексів у м.Львові за адресою: площа Князя Святослава, 5 та в м. Києві за адресою: вул. Маршала Рибалка, 3А введена науково-дослідна робота «Закономірності деформування геомеханічної системи «фундамент-грунтовий масив» в зоні дії колектора теплового насосу». Ця робота виконувалася в рамках наукових програм «Енергоощадні технології у будівництві» 0114U005248, «Розробка та вдосконалення методів розрахунку конструкцій, мостів,будівель та споруд 0114U005249 кафедри «Мости та будівельна механіка» Національного університету «Львівська політехніка»,

В результаті впровадження отримані наступні результати:

1. Розроблено методику визначення температурних полів у розташованих в ґрунтовій основі елементах будівельних конструкцій, в яких розташовані колектори теплових насосів.

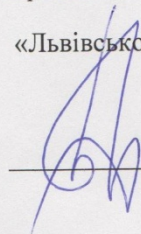
2. Розроблено методику визначення додаткових температурних деформацій і напружень в підземних елементах будівель і споруд, зумовлених дією температури і різними значеннями коефіцієнтів температурного лінійного розширення матеріалу фундаментів і розташованих в них полімерних колекторів теплових насосів.

3. Використано методику оцінки та розрахунку ефективності використання теплових насосів для даних геологічних умов при проектуванні систем опалення та вентиляції житлових комплексів.

Економічний ефект від впровадження склав 385000 (триста вісімдесят п'ять тисяч гривень)

Представники :

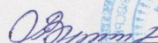
«Львівської політехніки»



Моркляник Б.В.

Корпорації «Ріел-Груп» та

ТзОВ «Львів-Буд»



Мельник Р.Л.



Дубовик О.М.

ЛЬВІВСЬКА
ОБЛАСНА
РАДА



вул. В. Винниченка, 18,
м. Львів, 79008,
Україна

№ 07 2015 р. № 02-лх-604
на № _____

Акт

**про впровадження результатів дисертаційного дослідження
к.т.н. Моркляника Б.В.
«Закономірності деформування геомеханічної системи «фундамент-грунтовий
масив» в зоні дії колектора теплового насосу»**

Сучасний стан економіки змушує звернути особливу увагу на відновлювані джерела енергії. Особливу увагу у Львівській області приділяють технології використання низько потенційного тепла ґрунтів основи, як альтернативи вуглеводневим ресурсам. Наукова робота «Закономірності деформування геомеханічної системи «фундамент-грунтовий масив» в зоні дії колектора теплового насосу» виконувалася к.т.н. Моркляником Богданом Васильовичем в рамках обласних програм з енергозбереження для населення і бюджетних установ і організацій та наукової програми «Енергоощадні технології у будівництві» 0114U005248 Національного університету «Львівська політехніка». Поставлені у науковій роботі задачі отримали практичне вирішення та чіткі рекомендації щодо проектування теплових насосів.

Запропоновано і досліджено методику розрахунку напружено-деформованого стану ґрунтів основи та елементів конструкцій, у яких розміщено колектори теплових насосів. Розроблено практичні рекомендації із розрахунку і проектування основ і фундаментів, в яких розміщено колектори теплових ґрунтових насосів.

Результати роботи будуть використані при реалізації програм розвитку альтернативної енергетики і енергозбереження у Львівській області. Науково-практичне значення та економічний ефект упродовж наступних років складатиме економію приблизно 20 млн. кубічних метрів газу на рік.

Голова Львівської обласної ради



Петро Колодій



00147

УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, тел. (380-32) 237-49-93, 258-27-58, факс: (380-32) 258-26-80
ел. пошта: cooffice@lp.edu.ua, інтернет: www.lp.edu.ua

01.07.2015 № 67-01-1119

на № _____

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Моркляника Богдана Васильовича

Основні положення та результати дисертаційного дослідження «Закономірності деформування геомеханічної системи «фундамент-грунтовий масив» в зоні дії колектора теплового насосу» на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, впроваджені у навчальний процес і застосовується при викладанні навчальної дисципліни «Основи теорії споруд» кафедри «Мости та будівельна механіка», а також використовуються при написанні кваліфікаційних робіт бакалавра та магістра. Ця робота виконувалася в рамках наукових програм «Енергоощадні технології у будівництві» 0114U005248, «Розробка та вдосконалення методів розрахунку конструкцій, мостів,будівель та споруд 0114U005249 кафедри «Мости та будівельна механіка» Національного університету «Львівська політехніка». Зокрема, у навчальному процесі впроваджено запропоновані Моркляником Б.В. наступні положення:

1. Важливість використання нових енергоощадних технологій у будівництві та вимоги щодо влаштування теплових насосів у межах міської забудови.
2. Рекомендації щодо вимог до ґрунтів основи, яких слід дотримуватися при проектуванні будівель та споруд з застосуванням теплових насосів для подальшої надійної експлуатації цих систем.

Проректор

з науково-педагогічної роботи, к.т.н., доцент



Давидчак О.Р.

Вик. Кваша В.Г.
Конг. тел. 258-21-80