

Міністерство освіти і науки України  
Державний вищий навчальний заклад  
"Національний гірничий університет"

**Будівництва**  
(факультет)

Кафедра **будівництва, геотехніки і геомеханіки**  
(повна назва)

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**  
**дипломного проекту (роботи)**  
**магістра**  
(назва освітньо-кваліфікаційного рівня)

галузь знань **19 Архітектура та будівництво**  
(шифр і назва галузі знань)  
спеціальність **192 Будівництво та цивільна інженерія**  
(код і назва спеціальності)  
спеціалізація **Промислове і цивільне будівництво**  
(назва спеціалізації)  
освітній рівень **вища освіта**  
(назва освітнього рівня)  
кваліфікація **2142.2 Інженер-будівельник**  
(код і назва кваліфікації)

на тему:

Скорочення термінів будівництва об'єктів на посилених з використанням джет-технології піщаних основах.

Виконавець:

студент \_\_\_\_\_ курсу, групи **192М-16-1 ФБ**

(підпис)

**Волобуєв М.С.**

(прізвище та ініціали)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка	Підпис
проекту	.Шаповал В.Г.		
розділів:			
Розділ 1	Шаповал В.Г.		
Розділ 2	Шаповал В.Г.		
Розділ 3	Шаповал В.Г.		
Розділ 4	Шаповал В.Г.		
Рецензент	Головко С.І.		
Нормоконтроль	Григор'єв О.Є.		

Дніпро  
2018

Міністерство освіти і науки України  
Державний вищий навчальний заклад  
"Національний гірничий університет"

---

---

**ЗАТВЕРДЖЕНО:**

завідувач кафедри

будівництва, геотехніки і геомеханіки  
(повна назва)

Гапєєв С.Н.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**ЗАВДАННЯ**

на виконання кваліфікаційної роботи магістра  
спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія  
(код і назва спеціальності)

студенту 192М-16-1 ФБ  
(група)

Волобуєв М.С.  
(прізвище та ініціали)

Тема дипломної роботи Скорочення термінів будівництва об'єктів на посиленних з використанням джет-технології піщаних основах.

---

**1 ПІДСТАВИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ**

Наказ ректора ДВНЗ "НГУ" від \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

**2 МЕТА ТА ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ**

**Об'єкт досліджень** - процес трансформації властивостей основ, посиленних методом струменевої високонапірної цементації, на інтервалі часу \_\_\_\_\_

**Предмет досліджень** - основи, посилені методом струменевої високонапірної цементації, в інтервалі часу \_\_\_\_\_

**Мета НДР** - Метою магістерської роботи є розробка методики розрахунку, що дозволяє виконати прогноз властивостей виготовлених з використанням струменевої цементації ґрунтоцементних елементів протягом часу \_\_\_\_\_

**Вихідні дані для проведення роботи** - дані літературних джерел, результати натурних випробувань моделей фундаментів

---

**3 ОЧІКУВАНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ**

**Наукова новизна** 1 отримано емпіричні аналітичні залежності міцності ґрунтоцементу на стиск і розтяг від часу, отримано емпіричні аналітичні залеж-

ності модуля загальної деформації ґрунтоцементу від часу.

Практична цінність полягає в розробці методики що дозволяє обґрунтовано скорочувати терміни проведення робіт з посилення основ.

#### 4 ВИМОГИ ДО РЕЗУЛЬТАТІВ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

#### 5 ЕТАПИ ВИКОНАННЯ РОБІТ

Найменування етапів робіт	Строки виконання робіт (початок-кінець)
Аналіз літературних джерел	
Експериментальні дослідження властивостей ґрунтоцементу	
Розробка методики розрахунку посилення з використанням методу струменевої цементації, основ	
Перевірка рекомендованої методики розрахунку основ	

#### 6 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ

Економічний ефект- полягає в зменшенні витрат на посилення основ та скороченні термінів будівництва, що значно впливає на вартість будівництва.

Соціальний ефект

#### 7 ДОДАТКОВІ ВИМОГИ

Завдання видав \_\_\_\_\_  
(підпис)

Шаповал В.Г.  
(прізвище, ініціали)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_  
(підпис)

Волобуєв М.С.  
(прізвище, ініціали)

Дата видачі завдання: \_\_\_\_\_

Термін подання дипломної роботи до ЕК \_\_\_\_\_

## РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 122 с., 55 рис., 6 табл., 104 джерела.

### СКОРОЧЕННЯ ТЕРМІНІВ БУДІВНИЦТВА ОБ'ЄКТІВ НА ПОСИЛЕНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ ДЖЕТ-ТЕХНОЛОГІЇ ПІЩАНИХ ОСНОВ.

Метою магістерської роботи є розробка методики розрахунку, що дозволяє виконати прогноз властивостей виготовлених з використанням струменевої цементації ґрунтоцементних елементів протягом часу від моменту їх виготовлення до прикладання до них навантаження.

Визначено місце джет технології в ряду методів перетворення будівельних властивостей ґрунтів, а також використання джет технологій в світовій практиці.

Лабораторними дослідженнями визначені міцнісні та деформаційні властивості ґрунтоцементу в процесі твердіння.

Визначена залежність міцності ґрунтоцементних елементів від часу твердіння, за залежність зогального модуля деформації від часу.

Проаналізовані результати випробування досліджених штампів виконаних білоруськими дослідниками проф. Бойко, аспірантом Раєд.

Розроблена методика розрахунку посиленних за допомогою джет технології основ на інтервалі часу від моменту виготовлення до набору проектної міцності. Проведено порівняння розрахованих осадок штампів за моєю методикою та їх натурними показниками.

Перевірена рекомендована методика розрахунку, посиленних з використанням джет технології, основ на адекватність експерименту.

## REDUCTION OF CONSTRUCTION PERIOD DUE TO THE JET GROUTING TECHNOLOGIES REINFORCED FOUNDATIONS

The goal of the master's work is to develop a calculation methodology that allows to perform a forecast of properties of cement-based elements made with the use of current-cementation during the time from the moment of their preparation to applying the load to them.

The place of JET-technology in a number of methods of transformation of building properties of soils, as well as the use of JET-technology in world practice is determined.

Laboratory studies have determined the strength and deformation properties of soil cement during the hardening process.

The dependence of the strength of the cementitious elements on the time of hardening is determined, depending on the dependence of the deformation module on time.

The results of testing the investigated stamps executed by the Belarusian researchers prof. Boyko, Raed.

The method of calculation of bases technologies strengthened by JET technology is developed on the interval of time from the moment of manufacture to the set of project durability. A comparison of the calculated precipitates of stamps according to my method and their natural indices is carried out.

The recommended method of calculation, enhanced with the use of JET technology, is based on the adequacy of the experiment.

## ЗМІСТ

Вступ .....	8
1. Аналіз літературних джерел. Методи покращення будівельних властивостей ґрунтових основ. Їх переваги і недоліки.....	12
1.1. Сучасні методи покращення будівельних властивостей основ....	12
1.2. Основні методи посилення основ і фундаментів.....	28
1.3. Досвід застосування струменевої цементації при посиленні основ будівель і споруд.....	30
1.4. Місце струменевої цементації в ряду методів посилення основ і фундаментів.....	38
2. Моделі ґрунтових основ.....	41
2.1. Рівняння, що дозволяють визначати напружено - деформований стан ґрунту при різних впливах. Методи їх вирішення.....	43
2.2. Метод кінцевих елементів.....	49
3. Експериментальні дослідження властивостей ґрунтоцементу та деформації, посиленої з використанням джет-технології, основи.....	54
3.1. Закономірності набору міцності ґрунтоцементом в процесі його твердіння.....	55
3.2. Зміна модуля деформації ґрунтоцементу в процесі набору ним міцності.....	65
3.3. Натурні випробування посиленої, з використанням методу струменевої цементації основи (дані Білоруського національного технічного університету). .....	73
4. Методика розрахунку посилених з використанням методу струменевої цементації, основ. Перевірка рекомендованої методики розрахунку посилених з використанням методу струменевої цементації, основ на адекватність експерименту.....	96

4.1. Методика розрахунку посиленних, з використанням методу струменевої цементації, основ.....	96
4.2. Перевірка рекомендованої методики розрахунку посиленних, з використанням методу струменевої цементації, основ на адекватність експерименту.....	103
Список використаних джерел.....	113

## ВСТУП

Актуальність теми. При реконструкції будівель і споруд часто доводиться зустрічатися з проблемами підвищення навантажень на основи і фундаменти, необхідністю забезпечення стійкості стінок траншей і бортів котлованів, створення протифільтраційних завіс, збільшення несучої здатності основ і зменшення осідання фундаментів.

У світовій практиці будівництва спостерігається тенденція збільшення поверховості і прольотів споруджуваних і реконструйованих будівель і споруд і як наслідок, збільшення навантажень на основи і фундаменти.

Також останнім часом все частіше доводиться використовувати території, що до цього вважалися непридатними для будівництва.

Ця проблема також потребує свого вирішення.

Одним з напрямків вирішення перерахованих проблем є посилення основ ґрунтоцементними палями і елементами з використанням технології струменевої цементації (в більшості зарубіжних країн цей процес носить назву «Jet grouting method»). Суть цієї технології полягає в наступному:

1. У попередньо пробурену технологічну свердловину опускають спеціальний свердловинний монітор, який має бічну насадку (можливо і кілька бічних насадок) з соплами.

2. До монітора по гнучкому рукаві подають розмиваючі рідини, наприклад, цементний розчин. При цьому з сопла насадки під великим тиском виходить високошвидкісний струмінь розчину, який розмиває ґрунт, утворюючи в ньому горизонтальну каверну. При цьому ґрунт частково виноситься з свердловини і на деякій відстані від неї опливає.

3. В результаті перемішування ґрунту з водно - цементним розчином утворюється водно - ґрунто - цементна суміш, яка після набору проектної міцності утворює міцні малодеформуємі структури. В результаті істотно знижуються деформації і підвищується несуча здатність ґрунту навколо цих ґрунтоцементних елементів.



Застосування даної технології для нового будівництва не зустрічає проблем, однак при її використанні для потреб реконструкції існуючих будівель і споруд виникають такі питання:

1. Яка відстань від існуючих фундаментів до місця зміцнення основи з використанням високонапірної цементациї є безпечним?

2. Який повинен бути мінімальний часовий інтервал для даних ґрунтових умов і параметрів процесу при влаштуванні розташованих поблизу один від одного ґрунтоцементних елементів?

3. Через якийсь час після влаштування ґрунтоцементних елементів до основи можна прикладати проектне навантаження?

4. Яким має бути мінімальний час твердіння ґрунтоцементу при посиленні основ реконструйованих будівель і споруд при використанні методу захваток?

При написанні магістерської роботи була зроблена спроба знайти відповіді на сформульовані вище питання.

Метою магістерської роботи є розробка методики розрахунку, що дозволяє виконати прогноз властивостей виготовлених з використанням струменевої цементациї ґрунтоцементних елементів протягом часу від моменту їх виготовлення до прикладання до них навантаження.

Для виконання поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- за допомогою аналізу сучасних способів поліпшення властивостей ґрунтових основ стосовно реконструкції будівель і споруд виявити особливості посилення ґрунтових основ з використанням високонапірної цементациї;

- виявити закономірності зміни характеристик міцності та деформаційних властивостей ґрунтоцементних зразків на інтервалі часу від їх виготовлення до набору проектної міцності;

- проаналізувати дані натурних дослідження осідань великорозмірних штампів на посиленому з використанням струменевої цементації основи при різних термінах твердіння ґрунтоцементу;

- виконати теоретичні дослідження в напрямку: процесу твердіння ґрунтоцементних елементів, визначення напружено - деформованого стану посиленої з використанням струменевої цементації основи на різних етапах набору ґрунтоцементом міцності;

- розробити методику розрахунку за граничними станами посилених з використанням струменевої цементації піщаних основ на інтервалі часу від початку їх виготовлення до завершення набору проектної міцності ґрунтоцементом.

**Об'єкт дослідження** - процес трансформації властивостей основ, посилених методом струменевої високонапірної цементації, на інтервалі часу від моменту їх виготовлення до моменту набору ґрунтоцементом проектної міцності

**Предмет дослідження** - основи, посилені методом струменевої високонапірної цементації, в інтервалі часу від моменту їх виготовлення до завершення набору проектної міцності ґрунтоцементом.

**Методи дослідження:**

- лабораторні випробування ґрунтоцементу в процесі його твердіння з метою визначення його міцності і деформаційних властивостей;

- польові випробування зміцнених за допомогою струменевої цементації піщаних основ великорозмірних штампів;

- теоретичні дослідження трансформації порового тиску в основі при влаштуванні та твердінні (наборі міцності) ґрунтоцементних елементів з використанням аналітичних методів математики;

- теоретичні дослідження напружено-деформованого стану основи, армованого вертикальними елементами, з використанням чисельного методу кінцевих елементів і програмного комплексу ЛІРА.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Отримано емпіричні аналітичні залежності міцності ґрунтоцементу на стиск і розтяг від часу, в інтервалі часу від моменту його виготовлення до набору міцності.

2. Отримано емпіричні аналітичні залежності модуля загальної деформації ґрунтоцементу від часу, в інтервалі часу від моменту його виготовлення до набору міцності.

**Практичне значення отриманих результатів полягає в:**

- розробці методики розрахунку осідання посиленних з використанням високонапірної цементації основ на інтервалі часу від моменту виготовлення ґрунтоцементу до набору ним проектної міцності, що дозволяє обґрунтовано скорочувати терміни проведення робіт з посилення основ за рахунок початку поступового прикладання до основи навантаження до повного набору ґрунтобетоном проектної міцності ;

- розробці методики розрахунку міцності виготовлених з використанням високонапірної цементації ґрунтоцементних елементів на інтервалі часу від моменту виготовлення до набору проектної міцності, що дозволяє обґрунтовано скорочувати терміни проведення робіт з посилення основ за рахунок початку поступового прикладання до основи навантаження до повного набору ґрунтобетоном міцності;

РОЗДІЛ 1  
АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ. МЕТОДИ ПОКРАЩЕННЯ  
БУДІВЕЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ҐРУНТОВИХ ОСНОВ.  
ЇХ ПЕРЕВАГИ І НЕДОЛІКИ

При написанні цього розділу переслідувалися такі цілі:

1. Розглянути існуючі в даний час методи покращення будівельних властивостей ґрунтових основ і виявити місце в їх ряду метода високонапірної цементації.
2. На конкретних прикладах виявити область застосування методу високонапірної цементації ґрунтових основ в ряду методів реконструкції будівель і споруд та на цій основі окреслити коло підлягаючих вирішенню в цій області практичних і теоретичних задач.
3. Проаналізувати сучасні методи прогнозу напружено - деформованого стану ґрунтових основ і залізобетонних конструкцій.
4. Розглянути існуючі в даний час принципи і методи розрахунку ґрунтових основ.

1.1. Сучасні методи покращення будівельних властивостей основ.

Для поліпшення складених ґрунтами з низькими будівельними властивостями основ в даний час використовують так звані методи покращення будівельних властивостей основ, які можна розділити на такі три основні групи [3, 6, 17, 19, 38, 41, 48, 49, 54, 63, 69, 82, 83, 20, 24, 25, 34, 55, 92, 38]:

1. Конструктивні методи, з використанням яких створюються сприятливі умови взаємодії системи "основа - фундамент - споруда" за рахунок регулювання її напружено-деформованого стану.
2. Поліпшення будівельних властивостей ґрунтів шляхом їх ущільнення (в цьому випадку відбувається зменшення пористості ґрунтів, збільшення мі-

жчасткових контактів і як наслідок - зменшення їх деформативності та підвищення міцності).

3. Закріплення ґрунтів за допомогою просочення їх розчином і створенням додаткових міцних штучних структурних зв'язків між мінеральними частинками.

#### 4. Комбіновані методи

До конструктивних методів відносять:

- повну або часткову заміну слабкого ґрунту;
- влаштування ґрунтових подушок;
- використання шпунтових огорож для запобігання видавлювання слабкого ґрунту з - під підшоши фундаменту [83];
- армування ґрунтових основ з використанням горизонтальних і похилих шарів геотекстилю у вигляді стрічок і (або) суцільних матів, а також жорстких вертикальних елементів (зазвичай з одночасним влаштуванням розподільних ґрунтових подушок);
- бічні донавантаження.

Повну або часткову заміну слабкого ґрунту здійснюють в тому випадку, коли він лежить на міцнішому і менш деформуємому ґрунті, а його розробка доцільна з економічної точки зору. Зазвичай на практиці цей метод найбільш часто використовується в тому випадку, коли слабкий ґрунт знаходиться на скельному, або великоуламковому, або іншому ґрунті з високими будівельними властивостями. При цьому товщина шару слабкого ґрунту зазвичай не перевищує 1, ..., 3 м.

До переваг способу посилення ґрунтової основи з використанням ґрунтових подушок відносяться зменшення розмірів фундаментів мілкого закладення в плані, за рахунок чого досягається економія бетону і арматури і зменшення нерівномірності осідання фундаментів [36, 83, 66].

Недоліками даного методу поліпшення будівельних властивостей основ є неможливість його використання при реконструкції будівель і споруд, високі

трудомісткість і час влаштування, а також сезонний характер виробництва робіт по влаштуванню подушок [83].

**Шпунтові конструкції** зазвичай застосовують для поліпшення умов роботи ґрунтів, що мають текучу або близьку до плинної консистенцію в основах споруд, оскільки шпунт перешкоджає видавлюванню слабого ґрунту з-під подошви фундаменту в сторони і вгору.

При посиленні основи шпунт занурюють у відносно щільний ґрунт. При цьому фундамент влаштовується на піщаній підготовці.

Перевагою цього методу поліпшення будівельних властивостей ґрунтових основ є значне скорочення обсягів земляних робіт при великій потужності товщі слабого ґрунту, а недоліками неможливість використання при реконструкції будівель і споруд (при забиванні шпунта поблизу існуючих будівель і споруд створюються динамічні дії [71]).

Якщо посилення основи виконується в використанні **методу армування** ґрунту геотекстилем, в ґрунт поміщають спеціальні армуючі елементи у вигляді стрічок і (або) суцільних матів.

Перевагою цього способу підсилення основ є його відносна дешевизна і ефективність, а недоліками - неможливість використання при основах будинків і споруд та проблема забезпечення надійності анкерування матів і стрічок з геотекстилю [61, 83, 64].

Суть поліпшення роботи ґрунту **методом армування** з використанням вертикальних і (або) похилих жорстких армуючих елементів полягає в локальному посиленні ґрунту з використанням, як правило, циліндричних

армуючих елементів підвищеної жорсткості (рисунок 1.1.4). У вигляді цих елементів зазвичай використовують [28, 32, 33, 50, 80, 83, 64, 67, 68, 70, 77]:

- забивні бурові, набивні, ґрунтові, і інші палі;
- стовпи і стрічки, створені з використанням технології високотемпературного випалу ґрунтів;

- стовпи і стрічки, створені з використанням технології електрохімічного закріплення ґрунтів.

До основних способів улаштування таких елементів відносяться [6, 18, 19, 85, 7, 8]:

- звичайне виготовлення залізобетонних конструкцій;
- ін'єктування;
- струменеві технології (в тому числі високонапірна струменева цементация);
- змішувальне закріплення.

Використання вертикальних і (або) похилих жорстких армуючих елементів дозволяє вирішувати такі практичні задачі [19, 34, 50, 55, 83, 110]:

- зміцнювати стінки траншей і котлованів в умовах обмеженого простору;
- покращувати властивості ґрунтів природної структури внаслідок ущільнення основи ґрунтовими палями;
- часткове або повне усунення просадних властивостей лесових просідаючих ґрунтів;
- посилювати основи існуючих фундаментів при реконструкції будівель і споруд.

До переваг цього способу посилення ґрунтової основи відносяться:

1. Великий клас вирішуваних з його використанням практичних задач.
2. Відносна (в порівнянні з пальовими фундаментами) дешевизна.
3. Поліпшення умов взаємодії елементів системи "основа - фундамент" (або "фундаменти - спорудження").
4. Можливість повного або часткового усунення осідаючих властивостей ґрунтів (якщо в товщі піску знаходяться прошарки лесового просадного ґрунту).
5. Можливість передачі на основу значних похилих і горизонтальних навантажень (в разі похилих елементів).

Недоліки способу посилення ґрунтової основи з використанням вертикальних і (або) похилих жорстких армуючих елементів обумовлені, в основному, способом їх влаштування [83]. Основними з них є:

1. Що виникають при влаштуванні вертикальних і (або) похилих жорстких армуючих елементів з використанням деяких технологій динамічних навантажень.

2. Неможливість забезпечення неруйнівного контролю якості виготовлення з використанням деяких технологій вертикальних і (або) похилих жорстких армуючих елементів.

3. Відсутність чітких вказівок з розрахунку і проектування вертикальних і (або) похилих армуючих елементів, влаштованих з використанням високонапірної цементації основ при реконструкції будівель і споруд.

В останньому випадку необхідно знати відповіді на такі питання:

1. Яка відстань від існуючих фундаментів до місця підсилення основ з використанням високонапірної цементації є безпечною?

2. Який повинен бути мінімальний часовий інтервал для даних ґрунтових умов і параметрів процесу повинен бути при влаштуванні розташованих поблизу один від одного ґрунтоцементних елементів?

3. Через якийсь час після влаштування ґрунтоцементних елементів до основи можна прикладати проектне навантаження.

4. Яким має бути мінімальний час твердіння ґрунтоцементу при посиленні основ реконструйованих будівель і споруд при використанні методу захваток?

Досить докладно методи улаштування, розрахунку та проектування армованих з використанням вертикальних і (або) похилих армуючих елементів ґрунтових основ викладені в [19, 34, 50, 55, 83, 110]

Суть поліпшення умов роботи ґрунту з використанням методу додавання **бічних донавантажень** полягає в додатку до укосів, насипах та (або) схилах похилих або горизонтальних навантажень, спрямованих в бік, зворотний їх руху. До переваг методу відносяться простота його реалізації і ефективність



застосування, а до недоліками - дорожнеча, висока вартість і трудомісткість [33, 65, 83].

Розрізняють поверхневі і глибинні всі методи **ущільнення ґрунтів** [33, 83].

При цьому розрізняють такі способи поверхневого ущільнення ґрунтових основ:

- укочування;
- трамбування;
- ущільнення вібраційними механізмами;
- ущільнення з використанням підводних вибухів;
- влаштування витрамбованих котлованів.

До цих методів глибинного ущільнення відносяться:

- влаштування піщаних, ґрунтових і вапняних паль;
- віброущільнення шляхом занурення вібраторів;
- глибинне водозниження;
- усунення просадних властивостей ґрунтових основ з одночасним використанням попереднього замочування і підземних вибухів.

Ущільнення виконується до певної межі, який залежить від виду, фізичних і механічних властивостей ґрунту, а також виду та ущільнюючого впливу (відмови).

Якість ущільнення основи зазвичай контролюють з використанням такого показника, як щільність сухого ґрунту або коефіцієнт ущільнення. При цьому, наприклад, при ущільненні основи з використанням важких трамбівок по ньому завдають фіксовану кількість ударів, яке називають заставою. Ущільнення слід проводити при н.т. оптимальної вологості ґрунту  $W_0$ .

**Ущільнення укочуванням** застосовується при пошаровому зведенні ґрунтових подушок, планувальних насипів та ін. земляних спорудах і здійснюється самохідними і причіпними катками на пневматичному ходу, навантаженими скреперами, автомашинами, тракторами та ін. механізмами. Необхідна

ступінь ущільнення досягається багаторазовою проходкою ущільнюючих механізмів (зазвичай від 6 до 12 разів) [83].

До переваг цього способу посилення ґрунтової основи відносяться: простота виконання робіт і доступність будівельного матеріалу (тобто ґрунту), можливість виконання великих обсягів робіт і використання місцевих ґрунтів.

Основними недоліками ущільнення основ методом укочування є: неможливість використання даного методу при реконструкції будівель і споруд, висока трудомісткість і тривалість будівництва, сезонний характер робіт [33, 83].

**Ущільнення важкими трамбівками.** Цей метод поліпшення будівельних властивостей ґрунтових основ запропонований Ю. М. Абелеві. Він отримав свій розвиток в роботах В. Б. Швеця (отримані ним результати увійшли до чинних і понині нормативних документів) [33, 83]. Суть методу полягає в скиданні з висоти 5... 10 м трамбовок діаметром 1,2... 3,5 м і вагою 25... 150 кН.

До переваг цього способу ущільнення ґрунтової основи відносяться: простота виконання робіт і доступність будівельного матеріалу (тобто ґрунту).

Основними недоліками методу ущільнення основ з використанням важких трамбовок є: неможливість використання даного методу при реконструкції будівель і споруд та в умовах щільної забудови [35, 83].

Піщані і ґрунтові палі (стовпи) застосовують для ущільнення сильности-скаючих пилувато - глинистих і заторфованих ґрунтів, рихлих пісків і т.п. на глибину до 18... 20 м [33, 83]. При їх використанні досягається подвійний ефект: вони є вертикальними армуючими елементами основи і при їх влаштуванні значно зменшується час фільтраційної консолідації.

Глибина ущільнення піщаними палями (стовпами) і крок їх розстановки приймаються такими, щоб спільні деформації споруди і ущільненої основи не перевищували граничних, а час завершення фільтраційної консолідації основи відповідав розрахунковому.

До переваг цього способу ущільнення ґрунтової основи відносяться: простота виконання робіт і відносна доступність будівельного матеріалу (тобто піску), відносна дешевизна.

Недоліками методу ущільнення основ з використанням піщаних паль є: неможливість використання даного методу при реконструкції будівель і споруд та висока трудомісткість і тривалість робіт [35, 83].

**Глибинне віброущільнення** застосовують для ущільнення незв'язних ґрунтів (природного залягання і насипних) [33, 83]. Суть методу полягає в тому, що при вібрації під дією сил тяжіння і інерції сипучі ґрунти ущільнюються. Іноді до місця віброущільнення подають воду. Такий метод часто називають гідровіброущільненням. Параметри процесу (величина, частота збуджуючої сили, крок розстановки точок ущільнення) визначають дослідним шляхом.

До переваг цього способу ущільнення ґрунтової основи відносяться простота виконання робіт і відносна дешевизна процесу. Недоліками методу ущільнення основ з використанням глибинного віброущільнення і гідровіброущільнення є неможливість використання даного методу при реконструкції будівель і споруд, і проблеми, що виникають при заляганні в основі прошарків зв'язного ґрунту [83].

Спільною рисою всіх методів закріплення ґрунтів є утворення міцних структурних міжчасткових зв'язків за рахунок протікаючих в основі фізико-хімічних процесів.

Розрізняють такі способи закріплення ґрунтів: силікатизація; смолізація, глинізація, електрохімічний і термічний методи, методи цементації (в тому числі високонапірна).

**Метод силікатизації** полягає в нагнітанні в основу водного розчину силікату натрію (тобто рідкого скла) [33, 83].

Розрізняють однорозчинний і дворозчинний методи силікатизації.

Метод силікатизації використовується в тих випадках, коли до складу ґрунтів входять солі, що виконують роль затверджувача рідкого скла.

Дворозчинним методом силікатизації зазвичай закріплюють піщані ґрунти. Цей спосіб відрізняється від однокомпонентного тим, що перед, або по черзі через один і той же ін'єктор, або одночасно через два ін'єктори, в основу нагнітають розчин хлористого кальцію (або вуглекислий газ) і розчин силікату натрію.

Закріплений піщаний ґрунт набуває міцність на одноосьовий стиск 2...5 МПа.

Перевагами даного способу закріплення ґрунтової основи є: простота виконання робіт, можливість використання при реконструкції будівель і споруд і відносно висока міцність закріпленої в такий спосіб основи.

Недоліками методу силікатизації є: неможливість використання методу нижче рівня підземних вод і висока вартість процесу [35, 65, 70, 71, 76, 83].

Суть методів смолизації, бітумізації і глинизації полягає у введенні в ґрунт високомолекулярних органічних сполук типу карбамідних, фенолформальдегідних чи інших синтетичних смол і їх затверджувачів, а також бітуму і суспензій бентонітових і монтморрілонітових глин. Як правило, ці методи використовуються при створенні протифільтраційних завіс і зменшення водопроникності пісків і тріщинуватих скельних порід.

Загальним недоліком цих методів є обмежене коло вирішуваних з їх використанням задач. Крім того, метод смолизації відрізняється високою вартістю.

**Цементация ґрунтів.** Розрізняють класичний метод цементації, метод високонапірної цементації і метод струменевої цементації [4, 18, 19, 28, 35, 75, 83, 25, 27, 7, 81, 90, 93].

Класичний метод цементації ґрунтів застосовують для зміцнення насипних ґрунтів, і ґрунтів з природною структурою при коефіцієнті фільтрації більше 80 метрів на добу. Цементацию використовують також для посилення конструкції фундаментів, заповнення карстових пустот, закріплення тріщинуватих скельних ґрунтів і створення протифільтраційних завіс. Є позитивний досвід використання даного методу для захоронення радіоактивних відходів.

Недоліком класичного методу цементації є можливість його використання тільки для закріплення ґрунтів з високим коефіцієнтом фільтрації.

**Метод високонапірної цементації ґрунтів** [19-24]. Цей метод застосовують для закріплення ґрунтових основ як нижче, так і вище рівня підземних вод. На відміну від класичного методу цементації, в даному випадку при нагнітанні водно - цементної або водно - цементно - силікатної суміші створюється такий тиск, при якому відбувається руйнування ґрунту в деякій зоні з утворенням гідророзривів і тріщин.

У ці тріщини відбувається проникнення водно - силікатно - цементної суміші, яка твердіє. При цьому під впливом тиску в нагнітаємій суміші відбувається додаткове ущільнення основи. Крім того, заповнені бетоном тріщини і свердловини утворюють просторову структуру підвищеної міцності.

В даний час існують дві основні схеми посилення ґрунтових основ з використанням методу високонапірної цементації ґрунтів:

- схема посилення "зверху вниз";
- схема посилення "від низу до верху".

Основною перевагою методу цементації в порівнянні з методом силікатизації ґрунту є можливість посилення основ нижче рівня підземних вод і відсутність обмежень по проникності ґрунтом. Однак ці переваги перекреслюються таким істотним недоліком методу, як відсутність контролю параметрів даного процесу.

Суть **струменевого методу цементації ґрунтових основ** (іноді цей процес називають джет - технологією) полягає у використанні кінетичної енергії струменя цементного розчину, що спрямовується на руйнування і перемішування ґрунту в масиві [6, 7, 77, 79, 94].

На першому етапі спеціальної буровою установкою буриться лідерна свердловина діаметром 73-90 мм.

Буріння проводиться до розрахункової глибини, яка визначається проектом, з попереднім промиванням водним розчином під тиском, що не перевищує 50 атм.

Зрошення подається безпосередньо на ріжучий інструмент (бурову шапку).

На наступному етапі насосом високого тиску подається водо-цементний розчин під тиском 450-500 атм. Цим високим тиском перекривається канал зрошення і відкриваються 2 отвори, в яких встановлені сопла діаметром 0.8-3.0 мм.

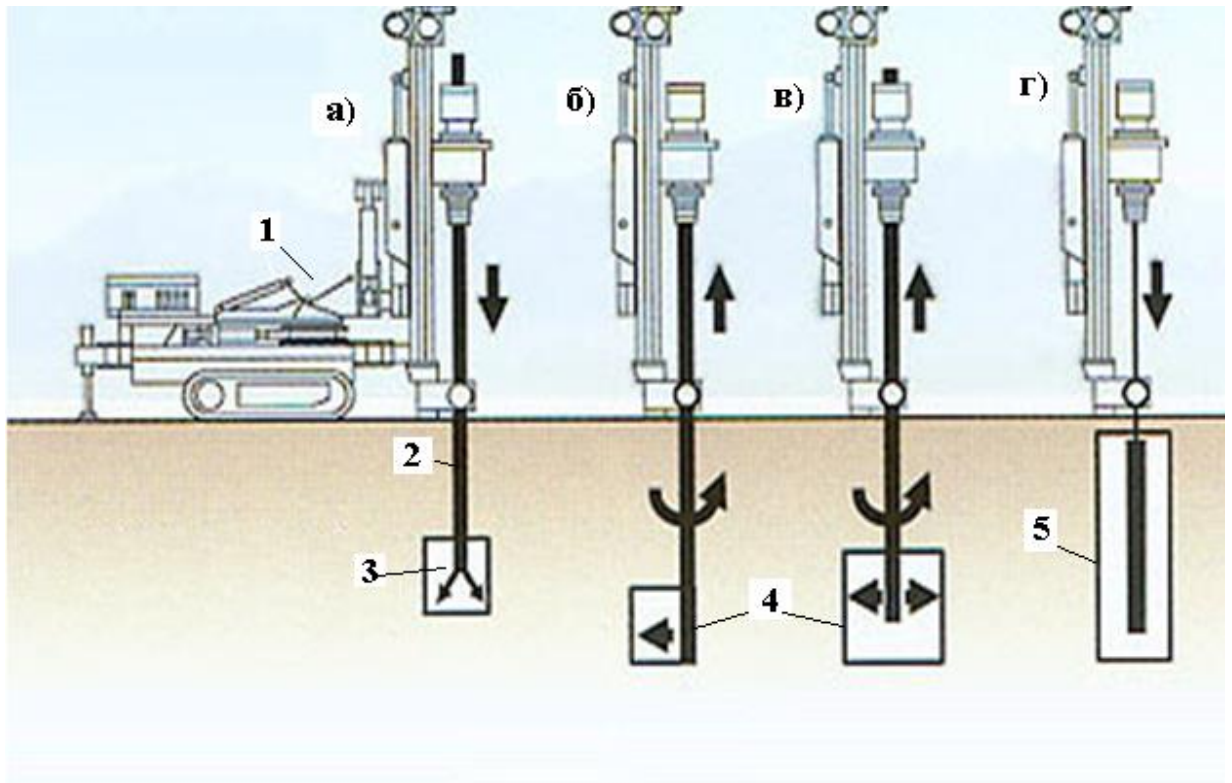


Рис. 1.1.1. Влаштування ґрунтоцементних елементів з використанням струменевої цементації.

а) - влаштування лідерної свердловини з промиванням вибою; б) - руйнування структури ґрунту і перемішування ґрунтових частинок з водо - цементним розчином при влаштуванні плоскої (панельної) конструкції; в) - руйнування структури ґрунту і перемішування ґрунтових частинок з водо - цементним розчином при влаштуванні конструкції циліндричної форми; г) - занурення в ґрунтоцементні розчин арматурного каркаса.

1 - бурова установка зі змонтованим на ній інжектором; 2 - штанга з закріпленим на ній монітором; 3 - промивка забою; 4 - зона струменевої цементації; 5 - готова конструкція з арматурним каркасом.

Повільно обертаючи (обороти 10-25 об. / Хв) і, повільно піднімаючи бурову колону, відбувається розрізання і перемішування ґрунту високою кінетичною енергією струменя, яка викидається з вищевказаних сопел. Виготовлені за цією технологією палі можуть армуватися (рис. 1.1.1)

Розрізняють три основні методи струменевої технології [6, 7, 44-48, 77, 79, 94]..

1. одноструменева технологія [47]. В цьому випадку використовуються 2 компонента: вода і цемент. Технологія надзвичайно проста і вимагає лише спеціалізовану технологічну лінію з застосуванням насоса високого тиску для перекачування цементного розчину. З її використанням можуть бути утворені ґрунтоцементні елементи довжиною до 40 метрів з діаметрами 0,5 до 0,8 м.

2. двоструменева технологія [47]. В цьому випадку для улаштування ґрунтоцементних елементів використовують буровий інструмент, який має два незалежні канали. Через один з них в ґрунт подають водоцементний розчин, так як це роблять при використанні одноструменевої технології, а через другий - повітряний струмінь під тиском 0,6-1,2 МПа.

Ефект досягається за рахунок додавання двох кінетичних енергій: водоцементного розчину і повітряного струменя. При цьому повітряний струмінь створює в ґрунті додаткову кавітацію, що сприяє кращому перемішуванню розчину і зруйнованого ґрунту.

Діаметр ґрунтоцементних елементів в даному випадку може досягати 0,8-1,5 м.

3. Трьохструменева технологія [47]. В цьому випадку в буровому інструменті влаштовують три незалежні канали.

Через перший канал в основу подається ґрунтоцементний розчин так, як це роблять при використанні одноструменевої технології.

Через другий канал подається стиснене повітря так, як це роблять при використанні двоструменевої технології.

Через третій додатковий канал в основу під тиском 200-300 атм нагнітають воду.

В даному випадку відбувається складання всіх трьох кінетичних енергій. В цьому випадку діаметр паль може досягати від 1,2-2,5.

За допомогою струменевої геотехнології споруджують ґрунтобетонні циліндричні, секторні конструкції (ґрунтобетонні палі і колони), і плоскі (панельні) конструкції.

Спорудження плоских конструкцій здійснюється шляхом попереднього улаштування технологічної свердловини, з подальшим зануренням в неї розмиваючого пристрою - струменевого монітора, орієнтації розмиваючих насадок в заданому напрямку і потім - розмиву ґрунту рідким струменем, що подається з повільно піднімаючого без обертання монітора.

Плоскі (панельні) конструкції можуть споруджуватися за такими схемами [44].:

- по тупиковій схемі, при якій пробурюється технологічна свердловина, що служить для переміщення струменевого монітора і для виходу пульпи, що складається з розмитого ґрунту, води і цементу;

- по наскрізній схемі, при якій, крім технологічної свердловини, що служить для переміщення струменевого монітора (моніторної свердловини), пробурюється у напрямку розмиву додаткова свердловина, для виходу пульпи, що складається з розмитого ґрунту, води і цементу (виливна свердловина);

- за комбінованою схемою, при якій секції плоскою конструкції, виконані по наскрізній схемі, чергуються з секціями, виконаними по тупиковій схемі.

Спорудження ґрунтобетонних паль здійснюється шляхом попереднього улаштування технологічної свердловини, з зануренням в неї розмиваючого пристрою - струменевого монітора і потім - розмиву ґрунту обертаючим рідким струменем, що подається з повільно піднімаючого монітора [44]. При цьому частина розмитого ґрунту видаляється через свердловину разом з відп-



рацьованою розмиваючою рідиною, а залишившийся розмитий ґрунт перемішується з твердіючим розчином (в окремому випадку твердіючий розчин може служити розмиваючою рідиною).

Ґрунтобетонні палі виконуються армованими і неармованими. Буріння технологічної свердловини зазвичай проводиться з промиванням. Як буровий розчин можуть використовуватися вода, глинистий розчин, при необхідності - цементний розчин.

Важливим фактором зміцнення масиву ґрунту або посилення фундаментів з використанням струменевої технології є можливість підтримки високого тиску (до 80 - 100 МПа). Це висуває певні вимоги до використовуваного устаткування, підводними трубопроводами та ін.

Розміри перетину підземних конструкцій, що споруджуються за допомогою струменевої геотехнології, залежать як від характеристик ґрунтів, так і від значень параметрів технологічного процесу.

До параметрів технологічного процесу відносять:

- тиск, що розвивається насосом;
- витрата розмиваючої рідини;



Рис. 1.1.2. Місце технології струменевої цементации в ряду методів покращення будівельних властивостей ґрунтових основ

- внутрішній діаметр струменевої розчинної насадки монітора;
- внутрішній діаметр струменевої насадки монітора;

- зовнішній діаметр струменевої насадки монітора (для дво- і трикомпонентної технологій);
- внутрішній діаметр повітряної насадки монітора (для дво- і трикомпонентної технологій)
- середня швидкість підйому монітора;
- частота обертання монітора;
- водо-цементне відношення в розчині і щільність розчину;
- вміст цементу в ґрунтоцементній суміші;
- продуктивність повітряного компресора (для дво- і трикомпонентної технологій);
- максимальний тиск, що розвивається компресором (для дво- і трикомпонентної технологій);
- діаметр технологічної свердловини.

Таким чином, метод високонапірної ін'єкції дає можливість отримати "Геотехнічний масив", що володіє значно меншою стисливістю і більш високою міцністю в порівнянні зі стисливістю і міцністю природної основи [6, 7, 44-48, 77, 79, 94].

При цьому стисливість і міцність геотехнічного масиву визначається спільним впливом ґрунту і затверділого ін'єкційного розчину.

Якість ущільнення ґрунту істотно залежить від наявності або відсутності захисних екранів, що обгороджують ущільнюємий масив ґрунту.

Далі зупинимося на місці струменевої цементації в ряду методів покращення ґрунтових осов (рис. 1.1.2).

Для цієї мети розглянемо загальні відмінні риси цього методу, загальні з властивостями конструктивних методів, методів ущільнення і закріплення ґрунту:

1. При струменевій цементації відбувається регулювання напружено - деформованого стану ґрунтового масиву. У цьому сенсі струменеві цементація є конструктивним методом.

2. При струменевої цементації відбувається збільшення міцності ґрунту і зростання числа міжчасткових контактів. За цією ознакою метод струменевої цементації відноситься до методів ущільнення ґрунтових основ.

3. При струменевої цементації відбувається утворення додаткових міцних штучних структурних зв'язків між мінеральними частинками ґрунту. За цією ознакою його слід віднести до методів закріплення ґрунтів.

Таким чином, струменова цементація є комбінованим методом, що включає в себе відмінні риси всіх відомих способів покращення будівельних властивостей ґрунтових основ.

Мабуть, поєднанням цих властивостей і пояснюється висока ефективність струменевої цементації при вирішенні практичних задач геомеханіки.

Для обґрунтування цієї тези познайомимося з досвідом застосування струменевої цементації в будівництві [6, 7, 44-48, 77, 79, 94].. Ці матеріали викладені нижче в пункті 1.2.

## 1.2. Основні методи посилення основ та фундаментів.

Даний розділ має таку структуру.

В концентрованій формі нами перераховані основні методи посилення основ і фундаментів.

Згідно [1, 19, 33, 24, 34, 55, 26, 66, 77, 92, 86, 37,] в даний час використовують такі методи зусилля основ і фундаментів:

- зміна умов передачі тиску по підшві фундаменту на ґрунти основ;
- підвищення міцності конструкції фундаменту;
- збільшення несучої здатності ґрунтів, що складають основу;
- пересадка фундаментів на палі;
- зміна умов передачі тиску по підшві фундаменту на ґрунт основ за допомогою збільшення опорної площі;
- збільшення глибини закладення підшви фундаменту;

- влаштування під будівлею фундаментної плити;
- влаштування протифільтраційних екранів, що перешкоджають обводненню основ;
- введення додаткових опор.

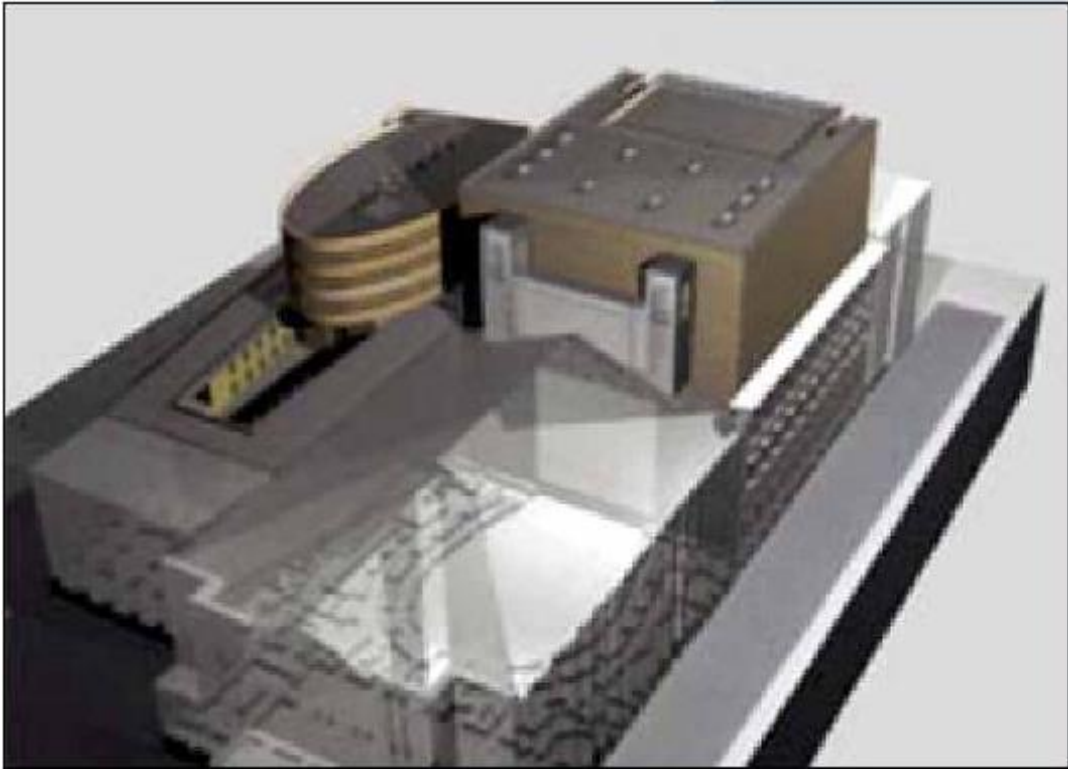


Рис. 1.2.1. Об'ємна модель театру «Ла Скала» після його реконструкції.

Виконаний нами аналіз робіт [42, 77 - 93] дозволив виявити, що метод струменевої цементації був використаний при вирішенні таких інженерних задач:

- попереднє закріплення ґрунту для полегшення будівництва метрополітену;
- посилення фундаментів шляхом використання похилих і вертикальних ґрунтоцементних елементів;
- влаштування оброблення тунелів;
- зміцнення насипів (в тому числі залізничних);
- в комунальному будівництві (кріплення стінок траншей і котлованів);
- улаштування тимчасових і постійних кріплень котлованів;

- спорудженні протифільтраційних екранів;
- в мостобудуванні (влаштування опор і зміцнення берегових устоїв);
- при реконструкції будівель і споруд;
- в гідротехнічному будівництві.

1.3 Досвід застосування струменевої цементациї при посиленні основ і реконструкції будівель і споруд.

Розглянемо приклади використання струменевої технології в світовій практиці посилення основ будівель і споруд.

В ході реконструкції міланського театру «Ла Скала» (рис. 1.2.1 і 1.3.1) був широко використаний метод струменевої цементациї [44].

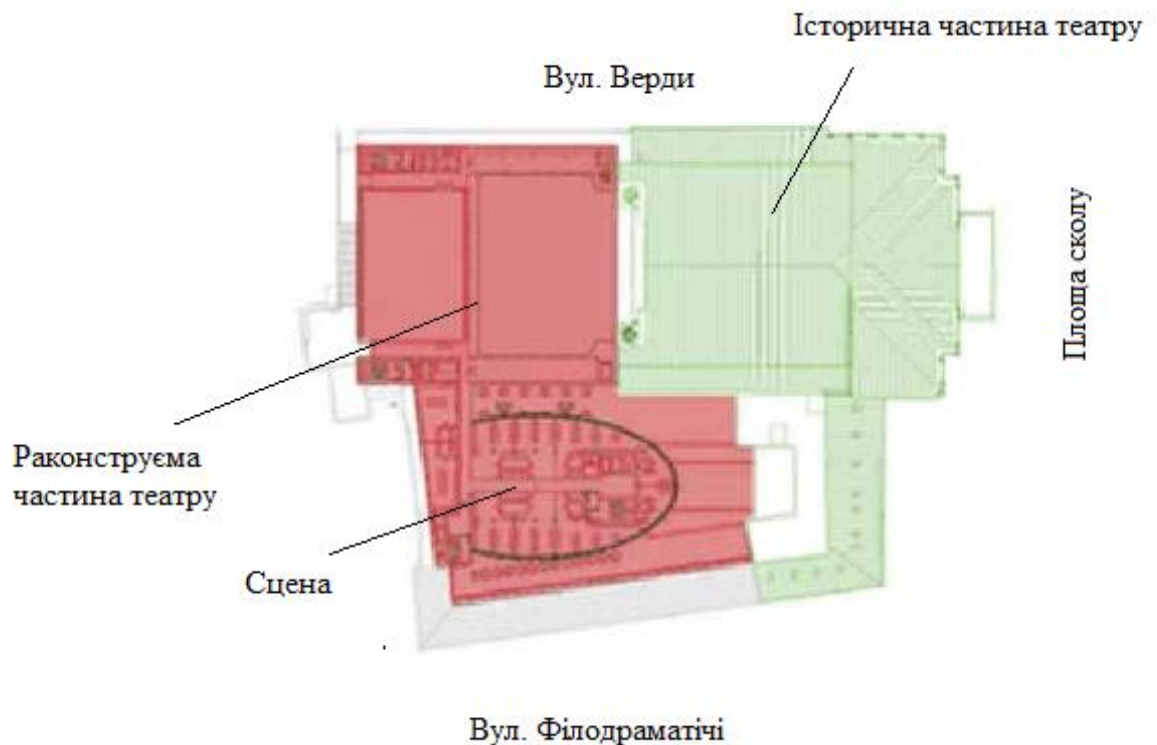


Рис. 1.3.1. Театр Ла Скала. План.

театральної сцени. Нижня відмітка нової сценічної зони знаходиться на глибині -17,2 м, при глибині котловану до 18,6 м.

Огорожа котловану виконано двома різними способами з денної поверхні: з боку корпусів будівель використані буроін'єкційні мікропалі, а з двох, що

залишилися сторін за технологією струменевої цементації зведені ґрунтоцементні стіни з врізаними в них мікропаллями.

Ґрунтоцементні елементи виготовлялися двокомпонентним способом струменевої цементації.

В результаті були отримані монолітні стіни, армовані сталевими трубами, що захищають прилеглі будівлі від деформацій і одночасно огорожують котлован від води (рис. 1.3.2, 1.3.3).



Рис. 1.3.2. Кріплення бортів котловану (загальний вигляд)

Виконана таким чином огорожа котловану з буроін'єкційних мікропаль і виготовлених з використанням високонапірної ґрунтоцементних елементів по периметру кріпилася до основи ґрунтовими анкерами.

Довжина анкерів коливалася від 26 до 24 м при довжині кореневої частини 10 м.

Кут нахилу анкерів становив  $20^{\circ}$  по відношенню до горизонталі, сила натягу  $450 \div 750$  кН (рис. 1.2.4).



Всі спеціальні геотехнічні будівельні роботи при реконструкції були виконані за допомогою бурових самохідних установок, які дозволили працювати в складних умовах (обмежений доступ до місця робіт, вузькі робочі майданчики, кілька підземних рівнів, буріння цегляної кладки фундаментів, необхідність обмеження шуму і вібрації) і виконувати всі ці роботи в строк.

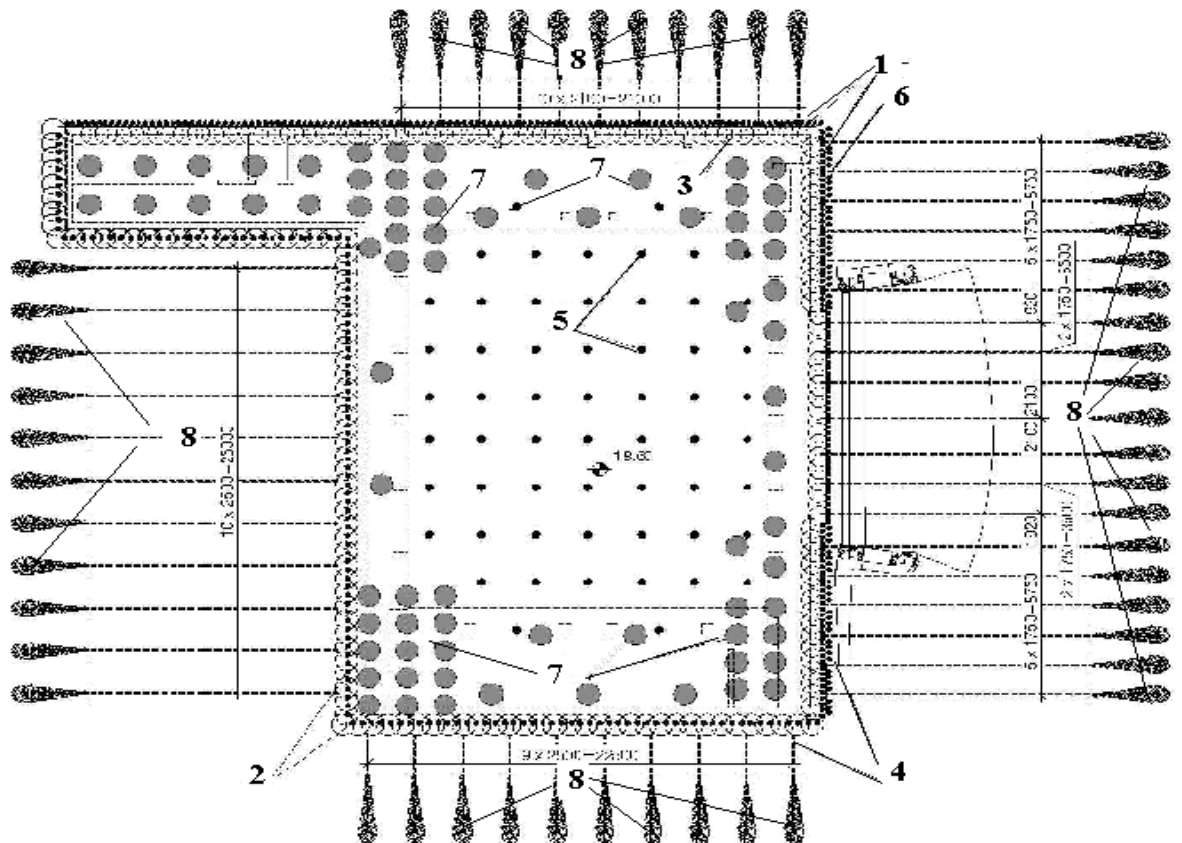


Рис. 1.3.3. Кріплення бортів котловану (план)

В даному конкретному випадку виготовлені з використанням високонапірної цементації ґрунтоцементні елементи виконували [44]:

- функцію утримуючої конструкції;
- функцію протифільтраційної завіси, яка виключає просочування води всередину котловану;
- функцію посилення фундаментної плити;
- функцію підсилення фундаментів мілкового закладання.



1,6 - огорожа, виконана зі мікропаль: 2 - те ж, з врізаних в стіну ґрунтоцементних елементів, виконаних методом високонапірної цементації; 3 - вертикальна протифільтраційна завіса, з ґрунтоцементних елементів, виконаних методом високонапірної цементації, 4 і 5 тимчасова і постійна анкерне кріплення; ґрунтоцементні елементи; 7 - ґрунтові анкери, які утримують стінки котловану і конструкцію від спливання

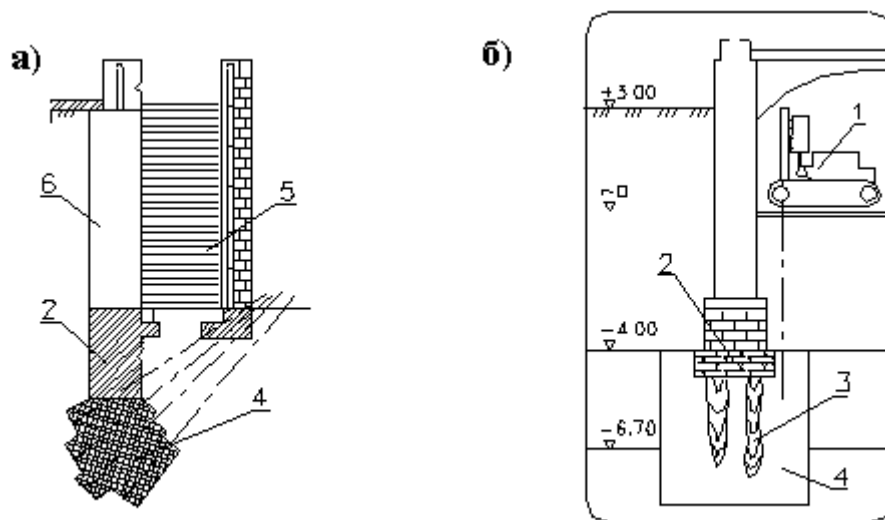


Рис. 1.3.4. Посилення основ будівель і споруд з використанням струменевого технології: а - підпорна стіна берегової підвалини моста через Дунай; б - пам'ятник військової архітектури у Відні (казарми Россауер)

1 - буровий верстат SC-1 (Keller); 2 - існуючий фундамент; 3 - дерев'яні палі; 4 - укріплені масиви ґрунту; 5 - ступені спуску; 6 - підпірна стіна каналу

При цьому дане конструктивне рішення має відмінні риси таких методів реконструкції:

- зміна умов передачі тиску по підшві фундаменту на ґрунти основ;
- підвищення міцності конструкції фундаменту;
- збільшення несучої здатності ґрунтів, що складають основу;
- введення додаткових опор.

- влаштування протифільтраційних завіс, що перешкоджають обводнення основ.

Як другий приклад використання методу струменевої цементації розглянемо реалізовані проект підсилення основ і фундаментів підпорної стінки берегового підвалини моста через Дунай (рис.1.3.4-а) і пам'ятника військової архітектури у Відні (казарми Россауер; рис.1.3.4-б).

Казарми були побудовані в 1870 р на фундаментах, які спираються на дерев'яні палі [44].

Необхідність посилення визначили 2 фактора:

- різке збільшення навантажень в зв'язку з заміною перекриттів;
- гниття голів паль через зниження горизонту підземних вод.

Розроблялися конкурсні варіанти посилення основ і фундаментів.

Була обрана струменева технологія.

Фактично прийнята технологія задовольняла всім розрахунковим геотехнічним і конструктивним вимогам, а саме:

- виключення з роботи дерев'яних паль з згнилими головами;
- передача тиску від масивного 5-поверхової будівлі з розмірами в плані 136x275 м на міцні гравійно - щебенчасті ґрунти;
- виключення порушень в роботі комунікацій, що йдуть уздовж будівлі із зовнішнього боку;
- повна стабілізація всіх осадків при збільшеною навантаженні.

Для ін'єкції розчинів використовували бурову установку на гусаку роздільного ходу SC-1 фірми Keller (ФРН).

Габарити установки дозволяли їй переміщатися через отвір шириною 0,8 м і працювати в підвальному приміщенні при висоті 2,8 м



Рис. 1.3.5. Малогабаритна установка, яку використовували для підсилення основи з використанням методу струменевої цементациї.

В даному конкретному випадку реалізовані такі методи реконструкції:

- зміна умов передачі тиску по підшві фундаменту на ґрунти основ;
- збільшення несучої здатності ґрунтів, що складають основу;
- пересадка фундаментів на палі;
- збільшення глибини закладення підшви фундаменту;
- введення додаткових опор.

Так при реконструкції цирку в Мінську на березі р. Свислочь треба було виконати заглиблений обсяг під магазин змінних арен.

Геотехнічні умови виявилися складними - відмітка днища котлована для улаштування заглибленого обсягу розташовувалася на 3,44 м нижче рівня підземної води і підшов існуючих фундаментів, а основа складалася піщаними ґрунтами з великими коефіцієнтами фільтрації.

Влаштування водозниження в таких умовах неминуче викликало б значні деформації фундаментів і існуючих конструкцій будівлі цирку.

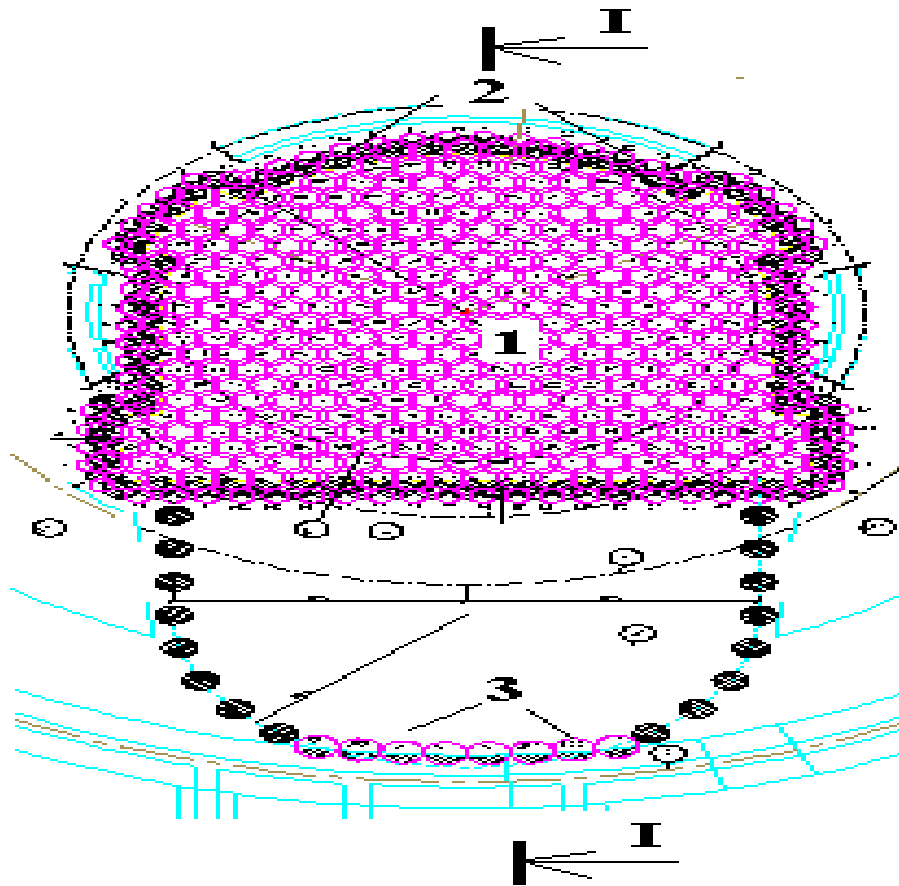


Рис. 1.3.6. Схема розташування виготовлених з використанням високо-напірної цементації паль в складі стін і днища ванни, а також огорожі котловану для магазину змінних арен.

1 - днище котловану; 2 - огорожа котловану; 3 - огорожі котловану в районі магазину змінних арен

Положення ускладнювала неможливість використання великогабаритної бурової техніки для влаштування паль в обмежених габаритах всередині будівлі. Задача здавалася технічно нерозв'язною або здійсненню її тягло значне збільшення термінів і вартості будівництва.

Стіни і днище її передбачалося виконати з пересічних паль і циліндричних елементів, які виконуються в обводненому ґрунті за технологією високо-напірної ін'єкції за допомогою малогабаритного обладнання "JetGrouting" (рис. 1.3.5).

Діаметр паль огорожі ванни, що примикає котловану становив 800 мм, довжина відповідно 9,25 і 4,0 м (рис. 1.3.6 і 1.3.7).

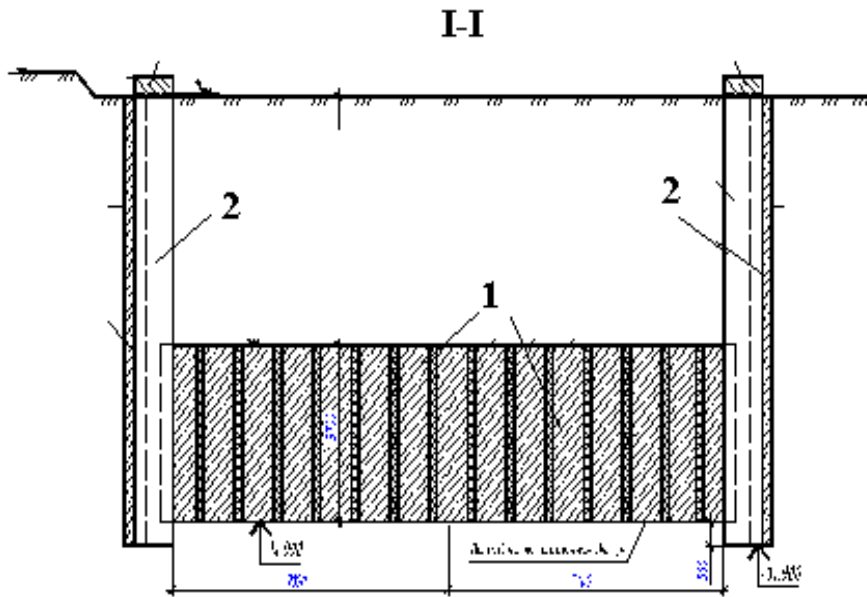


Рис. 1.3.7. Схема розташування виготовлених з використанням високо-напірної цементациї паль в складі стін і днища ванни, а також огорожі котловану для магазину змінних арен (розріз)

1 - днище котловану; 2 - огорожа котловану.

Первісним варіантом передбачалося армування паль жорсткою арматурою у вигляді двутаврів.

Однак складності з установкою їх в проектне положення по причині обмеженості і неможливості використання обладнання необхідної вантажопідйомності в умовах існуючої будівлі змусило шукати альтернативні способи армування паль.

В остаточному варіанті в якості арматури були застосовані високоміцні порожнисті стержні типу «Титан» з гвинтовою накаткою, що з'єднуються по довжині секціями за допомогою муфт, що нагвинчуються.

Для улаштування водонепроникного днища і виключення попадання води в котлован нижче позначки його днища передбачалося з поверхні влаштування циліндричних елементів діаметром 1000 мм з їх взаємним перетинанням

В даному конкретному випадку виготовлені з використанням високонапірної цементациї ґрунтоцементні елементи виконували:

- функцію утримування конструкції;

- функцію протифільтраційної завіси, яка виключає просочування води всередину котловану;

При цьому дане конструктивне рішення має відмінні риси таких методів реконструкції:

- зміна умов передачі тиску по підшві фундаменту на ґрунти основ;
- збільшення несучої здатності ґрунтів, що складають основу;
- влаштування протифільтраційних завіс, що перешкоджають обводненню основ.

#### 1.4 Місце струменевої цементації в ряду методів підсилення основ і фундаментів.

Розглянутих вище прикладів достатньо для того, щоб зробити висновок про ефективність і універсальність методу струменевої цементації і встановити його місце в загальному ряду методів посилення ґрунтових основ як комбінований метод посилення основ, будівель і споруд (рис. 1.4.1).

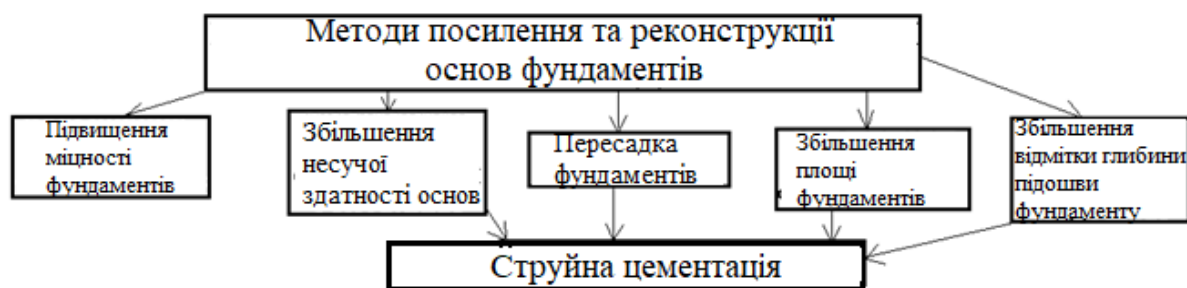


Рис. 1.4.1. Місце струменевої цементації в ряду методів посилення фундаментів і основ.

При цьому аналіз робіт авторів [7 – 19, 21-35, 37-42, 44 - 93] дозволив нам зробити висновок про те, що струменева технологія має і ряд недоліків, основними з яких є:

- небезпека локальних деформацій в процесі тимчасового розмиву ґрунтового масиву під фундаментом до набуття міцності;
- тривалий час твердіння ґрунтоцементу;
- висока вартість при використанні швидкотвердіючого цементу;
- підвищена небезпека при роботі з розташованими під високим тиском комунікаціями.

У зв'язку з цим актуальними є відповіді на такі питання:

1. Яке відстань від існуючих будівель і споруд є безпечним при влаштуванні ґрунтоцементних елементів?
2. Як позначиться високонапірна цементация на міцності і стійкості основи і її деформаціях?
3. Через якийсь час після влаштування ґрунтоцементних елементів до можливості збільшувати навантаження на основу?
4. В якій мірі може бути збільшена прикладена до посиленої з використанням методу високонапірної цементации основи навантаження після закінчення відомому наперед часу після завершення улаштування ґрунтоцементних елементів?

Для того, щоб відповісти на ці питання, необхідно навчитися вирішувати такі задачі:

1. Визначення деформацій основи та ґрунтоцементу при переході останнього від стану розпушеного ґрунту до стану бетону.
2. Визначення тиску, який виникає в ґрунтовій основі при її посиленні з використанням методу струменевої технології.
3. Перевірки міцності і стійкості основи при виконанні робіт по її посиленню з використанням методу струменевої технології поблизу існуючих будівель і споруд.
4. Визначення міцності ґрунтоцементу при переході останнього від стану розпушеного ґрунту до стану бетону.

Для цього необхідно проаналізувати роботи в напрямку:

- моделей, що описують поведінку ґрунтових основ (в тому числі водонасичених) при різних впливах;
- методів розрахунку напружено - деформованого стану основ фундаментів (в тому числі численних).

#### Висновки по розділу.

В цілому, виконані нами і викладені в цьому розділі матеріали досліджень дозволили зробити такі висновки:

1. Струменеву цементацію слід класифікувати як комбінований спосіб покращення будівельних властивостей ґрунту, оскільки він включає в себе відмінні риси всіх відомих методів, а саме: риси конструктивних методів, методів ущільнення і методів закріплення ґрунту.

2. Метод струменевої цементації є комбінованим методом підсилення основ і, оскільки з його використанням за рахунок утворення ґрунтоцементних монолітів досягається підвищення міцності фундаментів, збільшення їх площі, а також збільшення глибини закладення подошви. Крім того, в даному випадку збільшується несуча здатність основи.

3. Проблема прогнозу напружено - деформованого стану «посилювана з використанням струменевої цементації основа - фундамент» на інтервалі часу від початку до завершення набору ґрунтоцементом проектної міцності не знайшла свого відображення в практиці будівництва і потребує вирішення.



## РОЗДІЛ 2

### МОДЕЛІ ҐРУНТОВИХ ОСНОВ. МЕТОД КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В ОБЛАСТІ СТРУМЕНЕВОЇ ЦЕМЕНТАЦІЇ ҐРУНТІВ

Властивості ґрунтових основ відрізняються великою різноманітністю, в силу чого мають місце деформації основ, ґрунт в ряді випадків може руйнуватися, причому процеси деформування і руйнування протікають у часі [29, 30, 31, 83, 86].

Тому згідно [18, 39, 40, 68, 78, 87 88, 95 98, 99,21, 22, 23, 102, 103, 2, 100, 96, 59] в зв'язку з цим 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 деформацій ґрунтових масивів в часі.
4. Комбіновані моделі.

Перша група властивостей ґрунту дозволяє виконувати прогноз міцності і стійкості ґрунтових основ, друга їх деформації, а третя-трансформацію (тобто Зміна) властивостей основ протягом часу. В даний час ведуться дослідження по розробці моделей основ, що володіють комбінацією перерахованих властивостей, наприклад, деформаційних і міцнісних, деформаційних та реологічних і т.д. (Моделі четвертої групи).

Оскільки ґрунти можуть бути як суцільними (скеля), так і роздроблені, розрізняють такі дві основні групи моделей основи:

-модель дискретного середовища [91,];

- модель суцільного середовища [83].

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 суцільний, не маючий пор простір.

Реалізація першої моделі для практичних розрахунків на сучасному етапі розвитку обчислювальної науки і техніки в повній мірі не можлива.

Тому використовують модель суцільного середовища при таких припущеннях:

1. Замість елементарної точки, в якій розглядаються напруження і деформації, розглядається елементарний об'єм ґрунту - лінійний розмір якого в багато разів перевищує лінійний розмір часток, що утворюють ґрунт.

2. Діючі в ґрунтовій основі напруження і деформації відносяться вже не до точки, а до майданчиків, відповідним елементарного обсягу.

3. Застосування апарату механіки суцільного середовища для розрахунків напружень і деформацій в масиві ґрунту є коректним, коли розміри розрахункової області в цілому і розміри майданчиків, через які передаються навантаження, значно більше розміру елементарного об'єму ґрунту.

Властивості ґрунту за різними напрямками можуть відрізнитись один від одного (наприклад, в разі шаруватої текстури основ).

Тому при описі властивостей суцільних середовищ розрізняють дві основні групи моделей основи:

- модель ізотропного середовища;
- модель анізотропного середовища.

В основу першої групи моделей покладено уявлення про те, що властивості ґрунту однакові в усіх напрямках, а в другому-ні.

При цьому 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 задач 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 до них матеріальних констант.

2.1 Рівняння, що дозволяють визначити напружено - деформований стан ґрунту при різних впливах.

Загальним методом механіки ґрунтів і фундаментобудівництва є рішення т.зв. крайових задач, тобто спільне рішення рівнянь рівноваги і фізичних рівнянь стану при обліку відомих заздалегідь крайових (тобто початкових і граничних) умов.

При цьому в ряді випадків слід враховувати відповідні геометричні співвідношення, які впливають, наприклад, з умови нерозривності деформацій пружного середовища.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X &= 0; \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y &= 0; \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + Z &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.1.1)$$

Тут  $\sigma_x, \sigma_y$  і  $\sigma_z$  – нормальні напруження (вони мають розмірність  $\text{кН}/\text{м}^2$ );

$\tau_{xy}, \tau_{xz}$  і  $\tau_{yz}$  – дотикові напруження (вони мають розмірність  $\text{кН}/\text{м}^2$ );

$X, Y$  і  $Z$  – проекції на координатні вісі об'ємної сили (вона має розмірність  $\text{кН}/\text{м}^3$ ).

Прикладами рівнянь стану основи можуть бути узагальнений закон Гука, закон міцності Ш. Кулона і т.д.

У загальному вигляді рівняння рівноваги в напруженнях мають вигляд:

Рівняння (2.1.1) називають рівняннями рівноваги в напругах. Ці рівняння є загальними для всіх розглянутих нижче моделей ґрунтових основ.

Рівнянь рівноваги недостатньо для моделювання напружено-деформованого стану ґрунтових основ і масивів, оскільки з їх використанням неможливо описати властивості розглядаємого середовища (в нашому випадку це ґрунтова основа). Тому для описання властивостей того чи іншого середовища до них слід додати рівняння стану.

При певних умовах може відбутися руйнування або втрата стійкості ґрунтового масиву або його частини.

Для вирішення задач про руйнування ґрунту використовують закон сухого тертя Ш. Кулона при таких припущеннях:

1. Механізм руйнування основи в загальному випадку - зрушення.
2. Руйнування основи в його певній точці відбувається в наслідок досягнення діючих в ній напружень деякої критичної комбінації.
3. Прочностними властивостями основи є кут внутрішнього тертя і питоме зчеплення, які для кожного виду ґрунту треба визначати експериментально.

Теорія граничної рівноваги досліджує тільки напружений стан ґрунту і не дозволяє визначити його деформації.

В одновимірному випадку закон міцності Мора-Кулона має вигляд:

$$\tau \leq (\sigma - U) \cdot \operatorname{tg}(\varphi) + c, \quad (2.1.2)$$

а в просторовому випадку:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2 \cdot c \cdot \operatorname{ctg}(\varphi)} \leq \sin(\varphi), \\ \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3. \end{array} \right\} \quad (2.1.3)$$

Тут  $\tau$  і  $\sigma$  - діючі в певній точці основи дотичне і нормальне напруження,  $U$  - тиск в поровій рідині (іноді його називають нейтральним);  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  головні напруження в точці,  $\varphi$  - кут внутрішнього тертя, а  $c$  - питома зчеплення ґрунту.

При вирішенні низки практичних задач механіки ґрунтів і фунда-ментобудування виникає необхідність визначення деформацій ґрунту.

У цьому випадку втрати стійкості або руйнування основи не відбувається, оскільки діючі в ньому напруження значно менше граничних.

Для вирішення задач такого типу найчастіше використовують модель пружного лінійного ізотропного середовища. Стан цього середовища підпорядковується узагальненому закону Гука [39, 68, 60]:

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

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

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

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

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = G \cdot \left( \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right); \quad (2.1.4)$$

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

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

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

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

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

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

$$e = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z}. \quad (2.1.4)$$

Тут  $\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}$  и  $G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$  – пружні константи Ламе;  $E$  та  $\nu$  – тех-

нічні пружні константи (відповідно модуль пружності і коефіцієнт Пуассона ґрунту);  $\sigma_x, \sigma_y$  и  $\sigma_z$  – нормальні напруження;  $\tau_{xy}, \tau_{xz}$  и  $\tau_{yz}$  – дотикові напру-

ження;  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  и  $\varepsilon_z$  – нормальні лінійні відносні деформації;  $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}$  и  $\gamma_{yz}$  – кутові деформації;  $U, V$  и  $W$  – лінійні переміщення в напрямку координатних вісей  $Ox, Oy$  и  $Oz$  відповідно.

Якщо підставити (2.1.4) в (2.1.5), ми отримаємо рівняння рівноваги в переміщеннях:

$$G \cdot \Delta U + (\lambda + G) \cdot \frac{\partial e}{\partial x} + X = 0;$$

$$G \cdot \Delta V + (\lambda + G) \cdot \frac{\partial e}{\partial y} + Y = 0;$$

$$G \cdot \Delta W + (\lambda + G) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} + Z = 0. \quad (2.1.5)$$

Вода істотно впливає на поведінку ґрунту під навантаженням. Оскільки при виконанні подальших досліджень буде розглянуто процес насичення основи в процесі цементації, представляють інтерес рівняння і стану, які описують поведінку під навантаженням водонасиченого ґрунту. Згідно [39, 40, 95 101], вони мають вигляд:

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

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

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

$$c_v \cdot \Delta P = \frac{\partial P}{\partial t};$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

$$e = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z}. \quad (2.1.6)$$

Тут  $\lambda$ ,  $G$ ,  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}, U, V$  и  $W$  див. пояснення до формул (1.3.4);  $c_v$  - коефіцієнт просторової фільтраційної консолидації;

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

Системи рівнянь (2.1.4) і (2.1.6) дозволяють будувати загальні рішення задач механіки ґрунтів і фундаментобудівництва. При цьому для побудови приватних рішень до них слід приєднати граничні умови.

Згідно [40, 95 101] розрізняють:

- граничні умови в напруженнях (в цьому випадку на кордоні розглядаємої області задані напруження);
- граничні умови в переміщеннях (в цьому випадку на кордоні розглядаємої області задані переміщення);
- змішані граничні умови (в цьому випадку на частини кордону розглядаємої області задані переміщення, а на решті кордону - напруження).

## 2.2 Метод кінцевих елементів.

Побудова точних рішень рівнянь (2.1.4) і (2.1.6) - складне завдання. Тому для цієї мети використовують різні наближені методи, з яких найбільшого поширення набув метод кінцевих елементів [72, 58, 89, 104, 97, 52, 56, 62, 86].

Набирає останнім часом популярність метод граничних елементів отримав значно менше поширення [52].

Суть методу скінченних елементів полягає в тому, що область, в якій шукається рішення диференціальних рівнянь, розбивається на деяку кількість підобластей (елементів, рис. 2.2.1).

У кожному з елементів вибирається вид функцій, з використанням яких виконується апроксимація переміщень в межах кожної з підгалузей. У найпростішому випадку це лінійний поліном.

Значення функцій у вузлах елементів визначаються з умов рівності вузлових переміщень мають загальний вузол кінцевих елементів і рівності нулю проєкцій на координатні осі прикладених у вузлах зосереджених сил.

Рішення задачі зводиться до визначення невідомих коефіцієнтів апроксимуючих функцій і далі - переміщень і напружень в розрахунковій області.

При вирішенні задач з використанням методом кінцевих елементів необхідно виконати великий обсяг обчислювальної роботи.

Тому в даний час рішення задач з використанням техніки кінцевих елементів використовують програмні комплекси, найбільш відомими з яких є програми «Ліра», «Мономах», «Скад», «Робот», «ETABS», «PLAXIS» та інші.

При використанні перерахованих комплексів важливу роль відіграє точність отриманих з їх використанням рішень. Зокрема, вона істотно залежить від розмірів розрахункової області основи.

Зокрема, авторами роботи [112] було показано, що при інших рівних умовах в залежності від розмірів розрахункової області основи відмінності в напрузі і деформаціях розташованих на ґрунтовій основі конструкціях можуть відрізнятися більш, ніж на 50%.

У зв'язку з цим представляють викладені в роботі [94] матеріали досліджень, що дозволяють визначити розміри розрахункової області, при яких будуть забезпечені адекватні результати розрахунку.

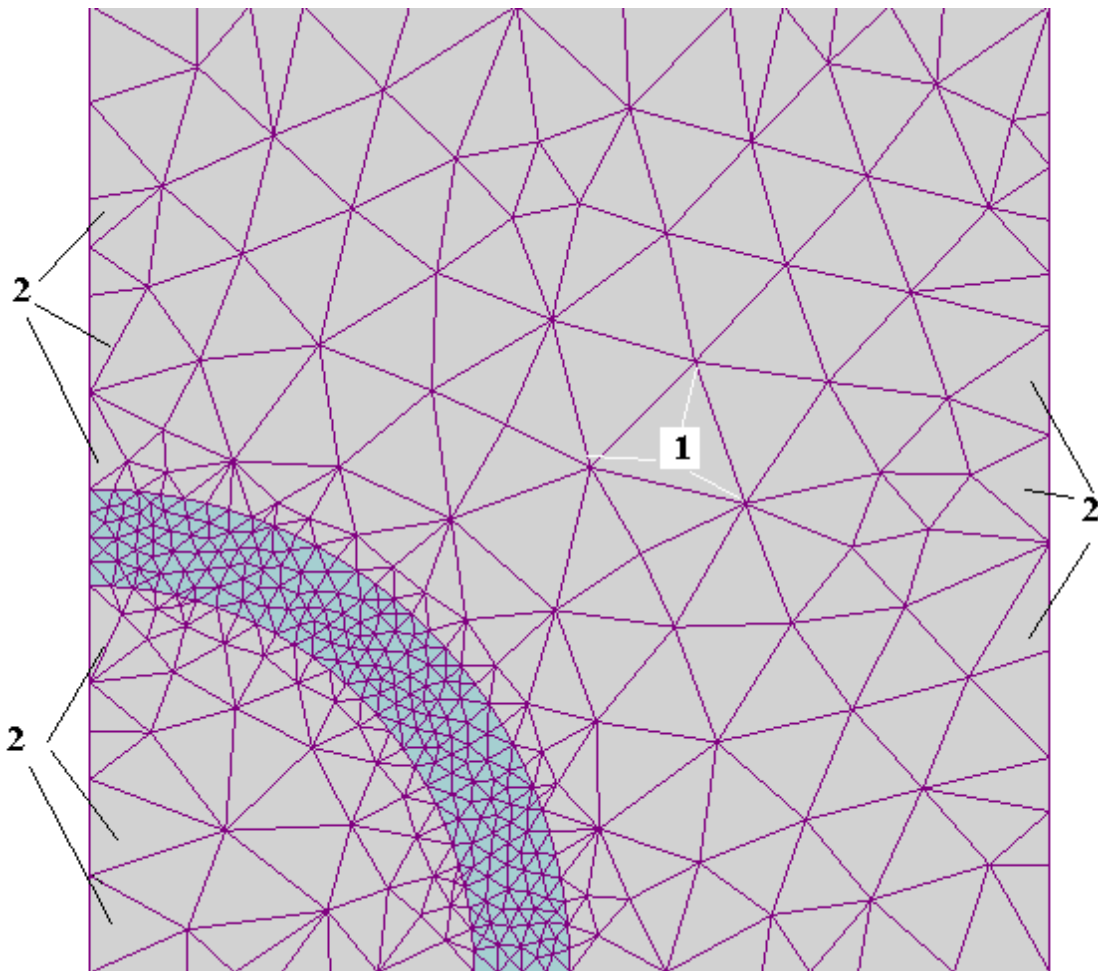


Рис. 2.2.1. кінцево - елементна апроксимація розрахункової області.

1 - вузли; 2 - кінцеві елементи.

В сучасних програмних комплексах за винятком, мабуть, комплексу «PLAXIS» дуже добре розроблені розділи, що дозволяють розраховувати напружено - деформований стан термопружних середовищ і дуже слабо - водонасичених.

У зв'язку з цим представляє інтерес виконані авторами роботи [59] дослідження, в результаті яких встановлено чисельну відповідність між матеріальними константами термопружного і пружного середовища, всередині якого має місце відносна об'ємна деформація  $\epsilon_0(x, y, z)$ :

$$\alpha^*(x, y, z) = \frac{\epsilon_0(x, y, z)}{T(x, y, z)}, \quad (2.2.1)$$

де  $\alpha^*(x, y, z)$  - фіктивний коефіцієнт температурного лінійного розширення;  $\varepsilon_0(x, y, z)$ - відносна об'ємна деформація;  $T(x, y, z)$ - температура в даній точці.

### Висновки за розділом

1. Для моделювання напружено - деформованого стану неводонасиченого ґрунту доцільно використовувати модель пружної основи і рівняння (2.1.4).

2. Для моделювання напружено - деформованого стану водонасиченого ґрунту доцільно використовувати модель пружної водонасиченої основи і рівняння (2.1.5).

3. Для вирішення задач про міцність ґрунту і його стійкості доцільно використовувати модель Мора - Кулона (рівняння (2.1.2) і (2.1.3).

4. Для побудови приватних рішень вирішуваних в даній роботі задач доцільно використовувати метод кінцевих елементів з урахуванням рекомендацій авторів робіт [112] і [94].

Далі зупинимося на роботах, присвячених струменевої цементації ґрунтів.

Умовно їх можна розбити на чотири групи:

1. Роботи, присвячені досвіду застосування струменевої цементації при будівництві різних об'єктів (більшість з них має описову або рекламну спрямованість) [43, 7, 44 - 46].

3. Роботи, присвячені вдосконаленню обладнання для струменевої цементації [4, 7, 11, 12, 13].

3. Роботи, присвячені вдосконаленню технологічних параметрів процесу струменевої цементації [59, 8, 9, 14,].

4. Роботи, присвячені розрахунку підсилених з використанням процесу струменевої цементації основ після набору ґрунтоцементом проектної міцності [64, 63].

При цьому в літературі практично повністю відсутні роботи, присвячені прогнозам напружено - деформованого стану системи «посилювана з використанням струменевої цементації основа - фундамент» на інтервалі часів від початку процесу цементації до набору ґрунтоцементом проектної міцності.

Виняток становить роботи авторів [14, 9, 5], в якій зроблено спробу пов'язати тиск в водно - ґрунтоцементної суміші зі швидкістю підйому штанги, на якій розташований монітор.

Таким чином, проблема прогнозу напружено - деформованого стану «посилювана з використанням струменевої цементації основа - фундамент» на інтервалі часу від початку процесу цементації до набору ґрунтоцементом проектної міцності потребує вирішення.

На вирішення цієї проблеми і спрямовані викладені нижче матеріали досліджень.

## РОЗДІЛ 3

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГРУНТОЦЕМЕНТУ ТА ДЕФОРМАЦІЙ ПОСИЛЕНОЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ДЖЕТ - ТЕХНОЛОГІЇ ОСНОВИ

У цьому розділі викладені експериментальні дослідження, в ході яких вирішувалися такі задачі.

Спочатку були виявлені закономірності набору міцності ґрунтоцементом в процесі його твердіння.

Ці дані необхідні для вирішення таких приватних задач:

1. Визначення зміни міцності ґрунтоцементних елементів в часі.
2. Скорочення часу реконструкції при переході з однієї захватки на наступну при посиленні основ з використанням методу струменевої цементації.
3. Скорочення часу будівництва нових об'єктів.

Матеріали цих досліджень викладені в пункті 3.1.

Далі нами були виконані дослідження зміни модуля загальної деформації ґрунтоцементу в процесі його твердіння.

Ці дані необхідні для вирішення таких приватних задач:

1. Виявлення закономірностей зміни міцності ґрунтоцементних елементів в часі.
2. Скорочення часу реконструкції при переході з однієї захватки на наступну при посиленні основ з використанням методу струменевої цементації.
3. Скорочення часу будівництва нових об'єктів.

Матеріали цих досліджень викладені в розділі 3.2.

Викладені в розділі 3.3. матеріали досліджень спрямовані на визначення коефіцієнта просторової консолідації ґрунтоцементу в процесі його твердіння, необхідного для визначення порового тиску при наборі ґрунтоцементного елемента в процесі набору їм міцності.

Нарешті, в розділі 3.4 представлені матеріали натурних випробувань посилених з використанням методу струменевої цементації основ.

3.1. Закономірності набору міцності ґрунтоцемент в процесі його твердіння.

В ході експериментів переслідувалася мета виявити закономірності зміни протягом часу міцності ґрунтоцементних зразків в процесі їх твердіння.

Досліджувалися залежності кубикової міцності ґрунтоцементу та його деформативності від часу.

Нами була прийнята така методика виготовлення зразків з ґрунтоцементу:

1. Спочатку проводилося зважування піску.
2. Після цього проводилося зважування цементу таким чином, щоб на один кубічний метр піску доводилося 550 кг цементу.
3. Після цього методом «п'яної бочки» проводилося перемішування піску з цементом.
4. Далі ґрунтоцементну суміш зволожувалася з розрахунку 500 літрів води на один кубічний метр піску.
5. Після цього зволожена ґрунтоцементна суміш перемішувалася до отримання однорідної маси і укладалася в металеві форми з внутрішніми розмірами 15x15x15 сантиметрів.
6. Форми з ґрунтоцемент витримувалися у вологому середовищі протягом від 2 до 28 діб, після чого виконувалося визначення міцності зразків.

В якості ґрунту, з якого виготовлявся ґрунтоцемент, використовувалися:

- пісок дрібний;
- пісок середньої крупності;
- пісок крупний.

Властивості ґрунту визначалися з використанням стандартної методики в лабораторних умовах [5].

Фізико - механічні властивості вихідного матеріалу представлені в таблиці 3.1.1.

Далі з використанням стандартної методики визначалася міцність ґрунтоцементу на стиск  $R_b$ .



Рис. 3.1.1. Форми для виготовлення цементно – піщаних зразків.



Рис. 3.1.2. Цементно – піщані зразки – кубіки 10x10x10 см.



Міцність ґрунтоцементу на стиск визначалася через 2, 3, 7, 9, 14 і 28 діб після виготовлення зразків (рис. 3.1.9).



Рис. 3.1.3. Методика визначення міцності цементно – піщаних зразків



Рис. 3.1.4. Цементно – піщані зразки після випробувань

## Лабораторні випробування. Вихідні властивості ґрунту

№ <i>n/n</i>	Назва характеристики	Позначення та одиниці виміру	ЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ		
			Пісок крупний	Пісок середній	Пісок мілкий
1	Питома вага ґрунтових часток	$\gamma_s$ , $\text{кН}/\text{м}^3$	26,4	26,5	26,8
2	Питома вага ґрунту	$\gamma$ , $\text{кН}/\text{м}^3$	16,70	16,50	16,80
3	Вагова вологість ґрунту	$W$ , д.ед.	0,06	0,04	0,05
4	Коеф. пористості	$e$ , д.ед.	0,68	0,67	0,68
4	Коеф. Пуассона	$\nu$ , д.ед.	0,27	0,30	0,30
5	Модуль загальної деформації	$E$ , МПа	27	24	17,5
6	Кут внутрішнього тертя	$\varphi$ , градуси	33	31	26
7	Питоме зчеплення	$C$ , кПа	1	1	2
8	Коеф. фільтрації	$k_f$ , м/доб	0,296	0,288	0,230

Міцність ґрунтоцементу на стиск  $Rb_i$  розтяг  $Rbt$  визначалася з використанням відомих емпіричних формул [17]:

$$\left. \begin{aligned} R_b &= 0,78 \cdot R; \\ R_{bt} &= 0,233 \cdot \sqrt[3]{R^2}. \end{aligned} \right\} \quad (3.1.3)$$

Залежність міцності на розтягнення ґрунтоцементу, виготовленого з великого, середнього і дрібного піску від часу твердіння представлені на рисунку 3.1.10.

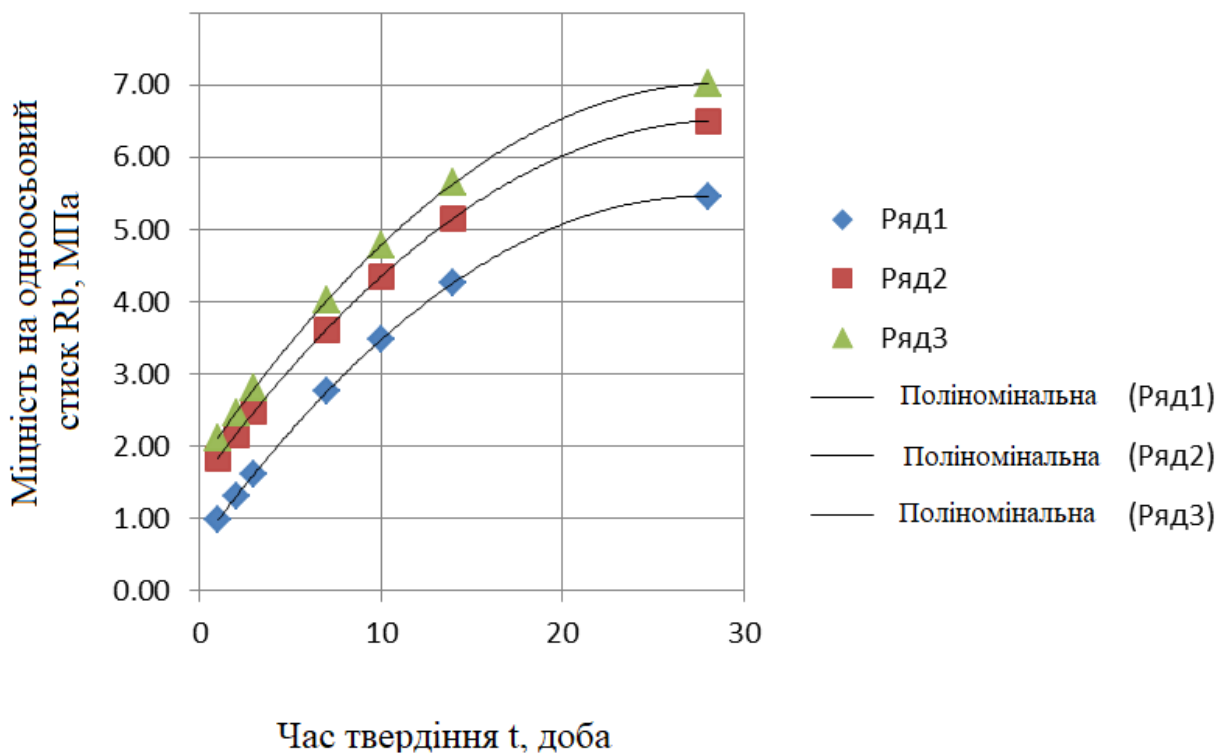


Рис. 3.1.5. Залежність міцності ґрунтоцементу на стиск  $R_b$  (МПа) від часу твердіння  $t$ .

Ряд 1 - вихідний матеріал, використаний для виготовлення ґрунтоцементу пісок великий; ряд 2 - вихідний матеріал, використаний для виготовлення ґрунтоцементу пісок середній; ряд 3 - вихідний матеріал, використаний для виготовлення ґрунтоцементу пісок дрібний.



1	a0	1,757	1,502	0,6358	0,0795	0,1877	0,2196
2	a1	0,367	0,3439	0,3459	0,0432	0,043	0,0459
3	a2	-0,0064	-0,0059	-0,0062	-0,0008	-0,0007	-0,0008
4	r	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99

З метою використання отриманих нами експериментальних даних для подальших досліджень вони були представлені у вигляді емпіричних аналітичних залежностей.

Апроксимація експериментальних табличних даних виконувалася з використанням методу найменших квадратів [51, 15, 84].

Результати апроксимації представлені в таблиці 3.1.2.

Як показник точності апроксимації нами був використаний коефіцієнт множинної кореляції  $r$  [51, 15, 84].

Виявилось, що для різного гранулометричного складу піщаного ґрунту залежність міцності ґрунтоцементу на стиск і розтяг від часу описується єдиним за формою записи поліномом другого ступеня:

$$\left. \begin{array}{l} R_b, \\ R_{bt} \end{array} \right\} = \begin{cases} \sum_{i=0}^2 a_i \cdot t^i; \\ npi \quad t \in (0,28). \end{cases} \quad (3.1.4)$$

При цьому для різного гранулометричного складу піску емпіричні коефіцієнти  $a_i$  приймають різні значення.

Для подальших досліджень доцільно мати узагальнені криві залежностей міцності бетону на стиск і розтяг для великого, середнього і дрібного піску.

Для їх побудови для великого, середнього і дрібного піску будувалися загальні залежності відносних прочностей ґрунтоцементу на стиск  $R_b^*$  і розтяг  $R_{bt}^*$  від часу твердіння  $t$

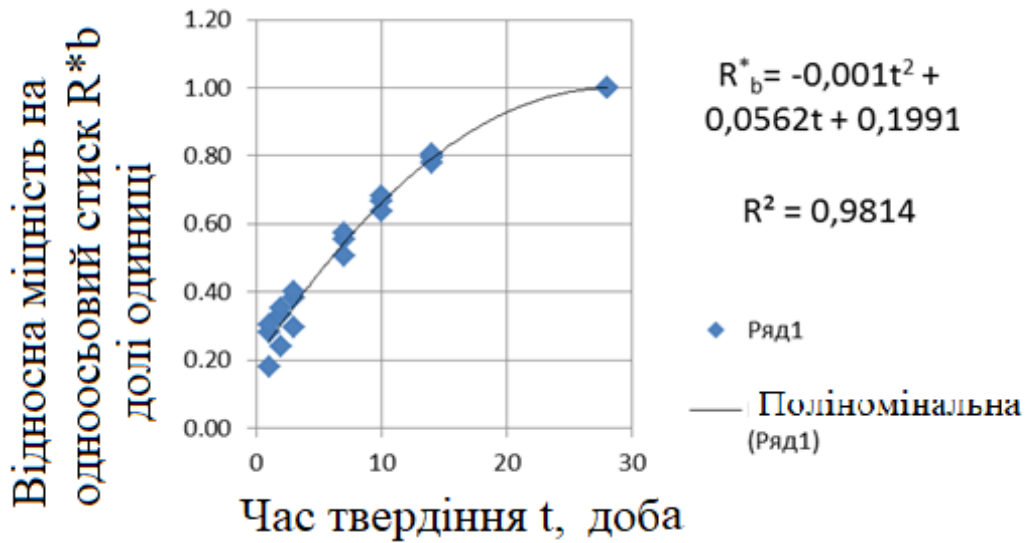


Рис. 3.1.7. Узагальнена залежність міцності ґрунтоцементу на стиск  $R \cdot b$  (д.ед.) від часу твердіння  $t$ .

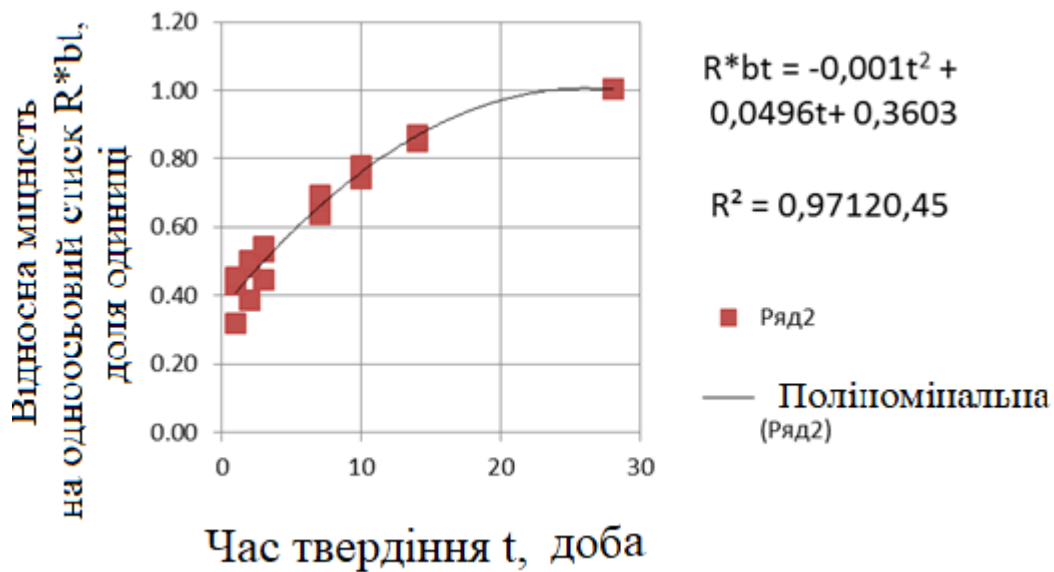


Рис. 3.1.8. Узагальнена залежність міцності ґрунтоцементу на стиск  $R \cdot bt$  (д.ед.) від часу твердіння  $t$ .

Відносні міцності ґрунтоцементу в розрахунковий момент часу визначалися за формулами:

$$\left. \begin{aligned} R_b^*(t) &= \frac{R_b(t)}{R_b(28)}; \\ R_{bt}^*(t) &= \frac{R_{bt}(t)}{R_{bt}(28)}; \end{aligned} \right\}, \quad (3.1.5)$$

де -  $R_b^*(t)$  відносна міцність бетону на стиск в момент часу  $t$ ;  
 $R_{bt}^*(t)$  - те ж, на розтягнення;  $R_b(t)$  фактична міцність бетону на стиск в момент часу  $t$ ;  $R_{bt}(t)$  - те ж, на розтягнення;  $R_b(28)$  фактична міцність бетону на стиск в момент часу  $t = 28$  діб;  $R_{bt}(28)$  фактична міцність бетону на стиск в момент часу  $t = 28$  діб.

Загальні залежності відносних міцностей на стиск і розтяг від часу представлені відповідно на рисунках 3.1.11 і 3.1.12.

В аналітичній формі вони мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} R_b^*(t) &= -0,001 \cdot t^2 + 0,0562 \cdot t + 0,1991; \\ R_{bt}^*(t) &= -0,001 \cdot t^2 + 0,0496 \cdot t + 0,3603; \\ t &\in (1, \dots, 28) \text{ суток.} \end{aligned} \right\} \cdot \quad (3.1.6)$$

Практична цінність рівності (3.1.6) полягає в тому, що якщо нам відомі міцності ґрунтоцементу, відповідна часу  $t = 28$  діб, то з використанням (3.1.6) міцність ґрунтоцементу в будь-який момент часу може бути встановлена з використанням таких формул:

$$\left. \begin{aligned} R_b(t) &= R_b(28) \cdot R_b^*(t); \\ R_{bt}(t) &= R_{bt}(28) \cdot R_{bt}^*(t); \\ t &\in (1, \dots, 28) \text{ суток.} \end{aligned} \right\} \quad (3.1.7)$$

В цілому, викладені в цьому розділі матеріали досліджень дозволили нам зробити такі висновки:

1. У розглянутих нами інтервалах часу ін'єктування і тисків в нагнітаємій в основу рідини міцність ґрунтоцементу слабо залежить від цих технологічних параметрів процесу струменевої цементації (рис. 3.1.7 і 3.1.8).

2. Найбільш сильно на міцності ґрунтоцементу позначаються гранулометричний склад піску, з якого він виготовлений, а також від часу набрання ним міцності (рис. 3.1.9 і 3.1.10).

3. В процесі набору міцності ґрунтоцемент на інтервалі часів від 2 до 28 діб його міцність на стиск і розтяг збільшується в 3-6 разів.

4. Залежність міцності ґрунтоцементу на стиск від часу твердіння в інтервалі часу від 2 до 28 діб описується поліномом другого ступеня (коефіцієнт множинний кореляції  $r > 0,9$ ).

5. Залежність міцності ґрунтоцементу на розтягнення від часу твердіння на інтервалі часів від 2 до 28 діб описується поліномом другого ступеня (коефіцієнт множинний кореляції  $r > 0,9$ ).



3.2. Зміна модуля деформації ґрунтоцементу в процесі набору ним міцності.

При написанні цього розділу переслідувалася мета виявити закономірності зміни в процесі твердіння ґрунтоцементу його модуля деформації.

В якості вихідного матеріалу для виготовлення ґрунтоцементу використовувався пісок великий, пісок середньої щільності і пісок дрібний.

Фізико - механічні властивості піску, який використовувався для виготовлення зразків, представлені в таблиці 3.2.1.

Визначення модуля загальної деформації виконувалося в одометрі (компресійному приладі, рис..3.2.1) з використанням такої методики:

1. Спочатку проводилося зважування піску.
  2. Після цього проводилося зважування цементу таким чином, щоб на один кубометр піску доводилося 550 кг цементу.
  3. Після цього методом «п'яної бочки» проводилося перемішування піску з цементом.
  4. Далі ґрунтоцементні суміш воложилася з розрахунку 550 літрів води на один кубічний метр піску.
  5. Після цього зволожена ґрунтоцементні суміш перемішувалася до отримання однорідної маси шпателем і укладалася в металеві обойми компресійного приладу, укладені нижньою частиною на гладку поверхню (лист металу товщиною 4 мм).
- Для зменшення впливу на результати випробувань сил тертя на контакті «стінка компресійного кільця - ґрунтоцемент» внутрішня поверхня компресійного кільця змащувалася солідолом.
6. Далі обойми з ґрунтоцемент поміщалися в ємність з підвищеною вологістю (ексикатор з шаром води завтовшки 15 мм і розташованої вище рівня води підставкою для укладання підлягаючих випробуванню зразків).

Кільця з ґрунтоцементу витримувалися у вологому середовищі протягом часу від 2 до 28 діб, після чого виконувалося визначення його модуля загальної деформації.

При цьому кожен ступінь навантаження витримувався протягом 24 годин.

В якості ґрунту, з якого виготовлявся ґрунтоцемент, використовувалися:

- пісок дрібний;
- пісок середньої крупності;
- пісок крупний.

Визначення модуля загальної деформації вироблялося точно також, як це робиться для ґрунту з використанням загальноприйнятої методики [31] в інтервалі тисків 0,1-0,5 МПа.

При цьому, оскільки ґрунтоцемент є суцільним (не роздробленим) матеріалом, адекватне визначення його початкового коефіцієнта пористості неможливо.

Тому для визначення модуля загальної деформації використовувалася відома формула, яка використовується для визначення осадків ґрунтового шару необмежених в плані розмірів, товщина якого дорівнює  $H$  (тобто що зазнає постійного компресійного стиску):

$$\left. \begin{aligned} S &= \frac{q \cdot H}{a_k}; \\ a_k &= \lambda + 2 \cdot G; \\ \lambda &= \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}; \\ G &= \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}. \end{aligned} \right\} \quad (3.2.1)$$

Тут  $S$  - осідання основи;  $q$  - прикладена до денної поверхні основи розподілене навантаження;  $H$  - товщина ґрунтового шару;  $a_k$  - компресійний модуль деформації;  $\lambda$  і  $G$  - пружні константи Ламе [92];  $E$  - модуль загальної деформації основи;  $\nu$  - коефіцієнт Пуассона основи.



Рис. 3.2.1. Компресійний прилад. Загальний вигляд.

Далі знайдемо:

$$S = \frac{q \cdot H \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}{E \cdot (1 - \nu)}, \quad (3.2.2)$$

звідки модуль загальної деформації  $E$  дорівнює:

$$E = \frac{q \cdot H \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}{S \cdot (1 - \nu)}. \quad (3.2.3)$$

Оскільки коефіцієнт Пуассона ґрунтоцементу дорівнює 0,2 [16], рівняння (3.2.3) було приведено до виду:

$$E = 0,9 \cdot \frac{q \cdot H}{S}$$

Зважаючи на значну величини модуля загальної деформації ґрунтоцементу та, як наслідок, відносно малу осадку верхнього штампа компресійного приладу, нами в системі координат «осадка - навантаження» будувалися експериментальні залежності осідання ґрунтоцементу від прикладеного до нього зовнішнього тиску.

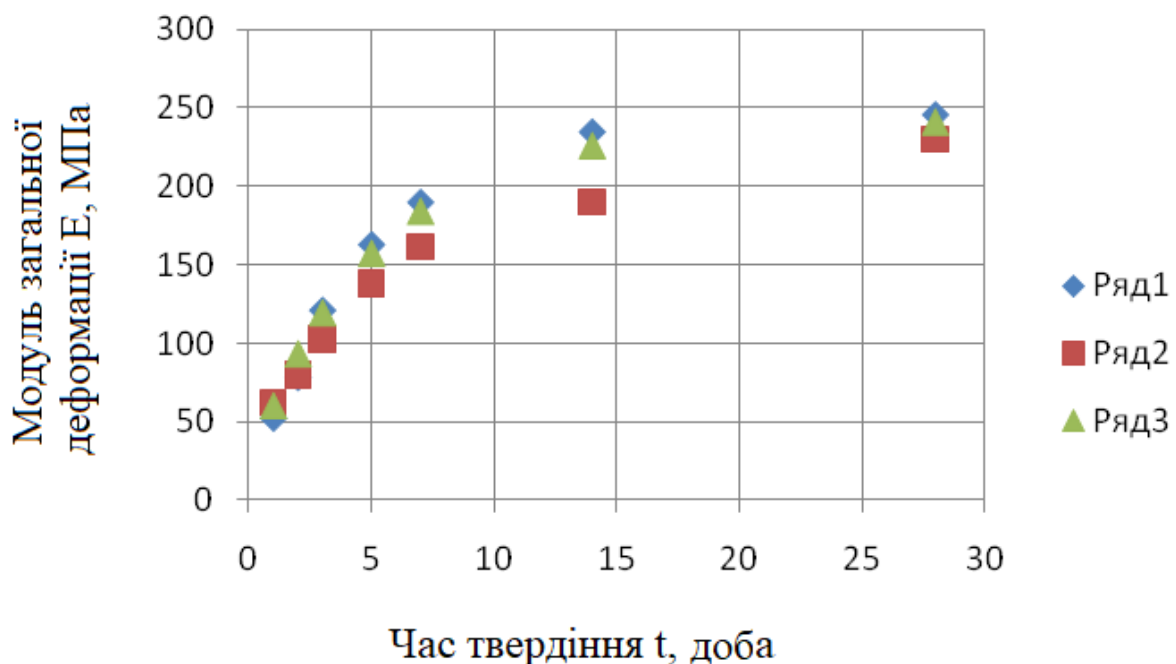


Рис. 3.2.2. Залежність модуля загальної деформації від часу твердіння t

Ряд 1 - вихідний матеріал, використаний для виготовлення ґрунтоцементу пісок великий; ряд 2 - вихідний матеріал, використаний для виготовлення

грунтоцементу пісок середній; ряд 3 - вихідний матеріал, використаний для виготовлення грунтоцементу пісок дрібний.

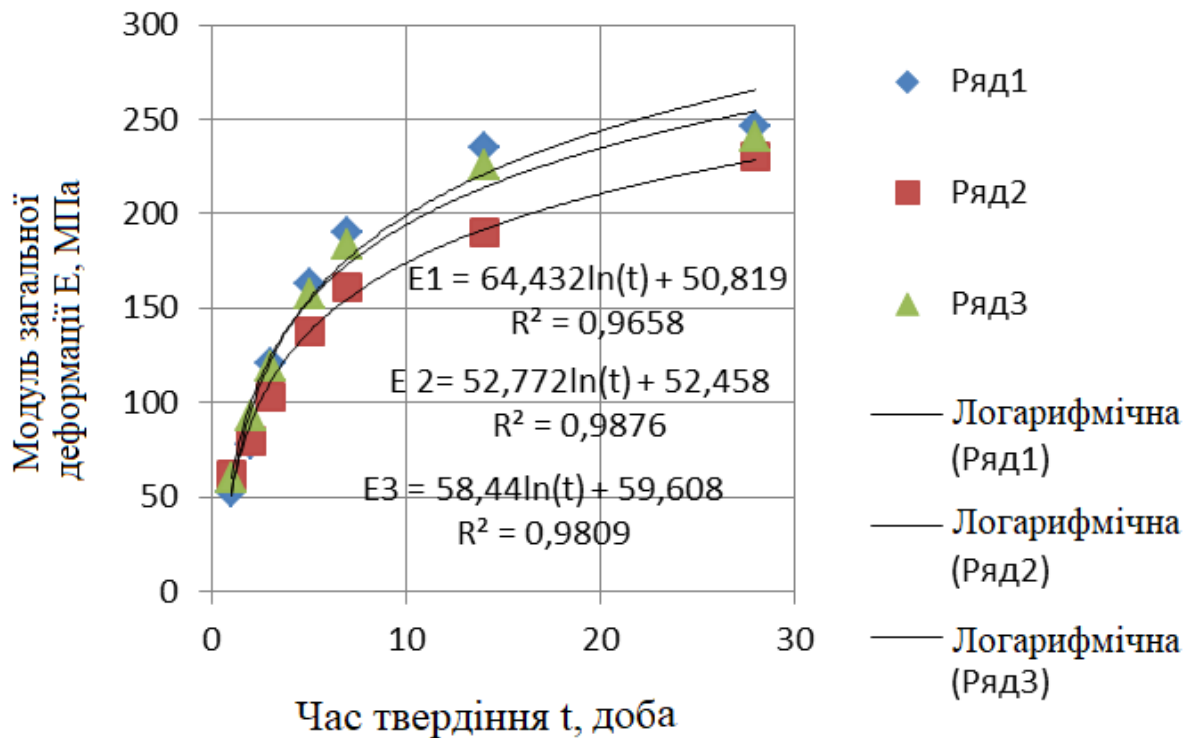


Рис. 3.2.3. Залежність модуля загальної деформації від часу твердіння t.

Ряд 1 - вихідний матеріал, використаний для виготовлення грунтоцементу пісок великий; ряд 2 - вихідний матеріал, використаний для виготовлення грунтоцементу пісок середній; ряд 3 - вихідний матеріал, використаний для виготовлення грунтоцементу пісок дрібний.

Примітка: Суцільні і штрихові чорні лінії - це лінії трендів.

Після цього експериментальні криві з використанням програмного комплексу «Ехсел» апроксимувались лінійною залежністю виду

$$S = k \cdot q, \quad (3.2.5)$$

де  $k = 0,9 \cdot \frac{H}{E}$ , а модуль загальної деформації визначався за формулою:

$$E = 0,9 \cdot \frac{H}{k}. \quad (3.2.6)$$

Результати визначення залежностей модуля загальної деформації від часу твердіння ґрунтоцементу представлені на рисунку 3.2.2.

Їх аналіз дозволив нам зробити висновок про те, що найбільші значення модуля загальної деформації ґрунтоцементу має для крупного піску.

При цьому отримані нами залежності модуля загальної деформації, отримані при використанні при виготовленні ґрунтоцементу великого, середнього і дрібного піску знаходяться в межах експериментального розкиду.

В ході подальшого аналізу експериментальних досліджень нами була виконана їх апроксимація (рис. 3.2.3).

Виявилося, що на інтервалі часу  $t \in (1, \dots, 28)$  доби найбільш точно експериментальні криві можуть бути апроксимувати з використанням логарифмічної залежності виду:

$$E = a \cdot \ln(t) + b, \quad (3.2.7)$$

Де  $a$  і  $b$  - емпіричні коефіцієнти, які зведені в таблицю 3.2.1.

Таблиця 3.2.1.

Результати апроксимації залежностей модуля загальної деформації ґрунтоцементу від часу твердіння. Емпіричні коефіцієнти.

№ п.п.	Коеф. $a$ і $b$	Модуль загальної деформації ґрунтоцементу $E$ , МПа		
		Пісок крупний	Пісок середній	Пісок мілкий
1	$a$	64,432	52,772	58,44

<b>2</b>	<b>b</b>	50,819	52,458	59,608
<b>3</b>	<b>r</b>	0,84	0,99	0,99

Для подальших досліджень доцільно мати узагальнені криві залежності модуля загальної деформації від часу твердіння ґрунтоцементу для великого, середнього і дрібного піску одночасно.

Для цієї мети була отримана загальна залежність відносного модуля загальної деформації від часу твердіння ґрунтоцементу  $t$ .

Відносний модуль загальної деформації ґрунтоцементу в розрахунковий момент часу визначався за формулою:

$$E^*(t) = \frac{E(t)}{E(28)}. \quad (3.2.8)$$

де -  $E^*(t)$  відносний модуль загальної деформації ґрунтоцементу в момент часу  $t$ ;  $E(t)$  - фактичний модуль загальної деформації ґрунтоцементу в момент часу  $t$ ;  $E(28)$  - фактичний модуль загальної деформації ґрунтоцементу в момент часу  $t = 28$  діб.

Загальна залежність відносного модуля загальної деформації представлена на рисунку 3.2.4.

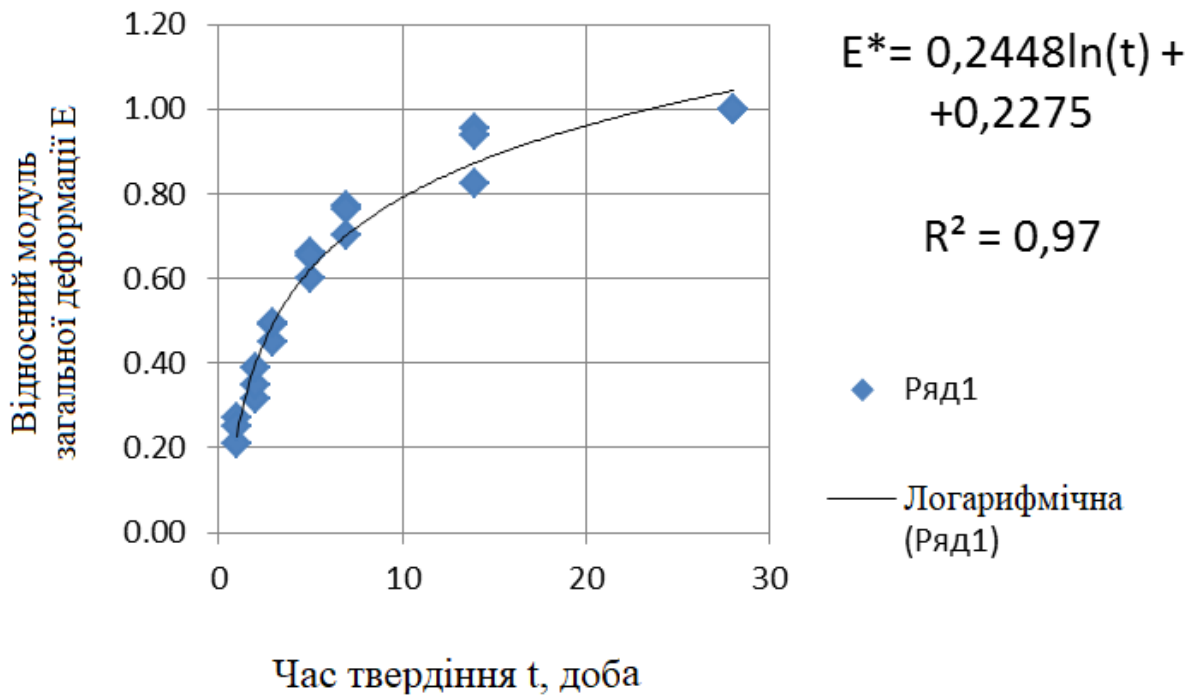


Рис. 3.2.4. Залежність відносного модуля загальної деформації від часу твердіння  $t$ .

В аналітичній формі вона має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} E^* &= 0,2448 \cdot \ln(t) + 0,2275; \\ t &\in (1, \dots, 28) \text{ суток.} \end{aligned} \right\} \quad (3.2.9)$$

Практична цінність рівності (3.2.8) полягає в тому, що якщо нам відомий модуль загальної деформації ґрунтоцементу, відповідний часу  $t = 28$  діб, то з використанням модуль загальної деформації ґрунтоцементу в будь-який момент часу може бути встановлений з використанням такої формули :

$$E(t) = E(28) \cdot E^*(t). \quad (3.2.10)$$

В цілому, виконані нами і представлені в цьому розділі матеріали досліджень дозволили нам зробити такі висновки:



1. В процесі набору міцності ґрунтоцемент на інтервалі часе від 1 до 28 діб його модуль загальної деформації збільшується в 3,8-5 разів.

2. Залежність модуля загальної деформації від часу твердіння на інтервалі часу від 2 до 28 діб з високим ступенем точності (коефіцієнт множинний кореляції  $r > 0,9$ ) описується логарифмічною функцією.

3.3. **Натурні випробування посилених з використанням методу струменевої цементації основ.** (Дані Білоруського національного технічного університету)

При виконанні викладених у цьому розділі матеріалів натурних випробувань фундаментів нами переслідувалися такі цілі:

1. Встановити, яким чином час набору ґрунтоцементом міцності позначається на осадках розташованих на посилених з використанням струменевої цементації основах фундаментів.

2. Напрацювати експериментальний матеріал, необхідний для перевірки на адекватність експерименту матеріалів виконаних нами досліджень.

Майданчик будівництва, на якому виконувалися випробування, розташований в мікрорайоні №7 селища Східний (м.Мінськ) ". Перша черга будівництва. Будинок №1.

Всього було випробувано два залізобетонних фундаменти з розмірами в плані 2x2 метра і товщиною 500 мм, схема розташування яких представлена на рисунку 3.3.1.

Фундаменти розташовані на посиленій з використанням струменевої цементації оснґві.

Схема системи «армована основа- фундамент» представлена на рисунку 3.3.2.

Будова ґрунтової товщі експериментального майданчика в місці проведення штапових випробувань представлена на рисунках 3.3.3 - 3.3.6.

При цьому на рисунку 3.3.7 представлені прийняті на рисунках 3.3.4-3.3.6 умовні позначення.

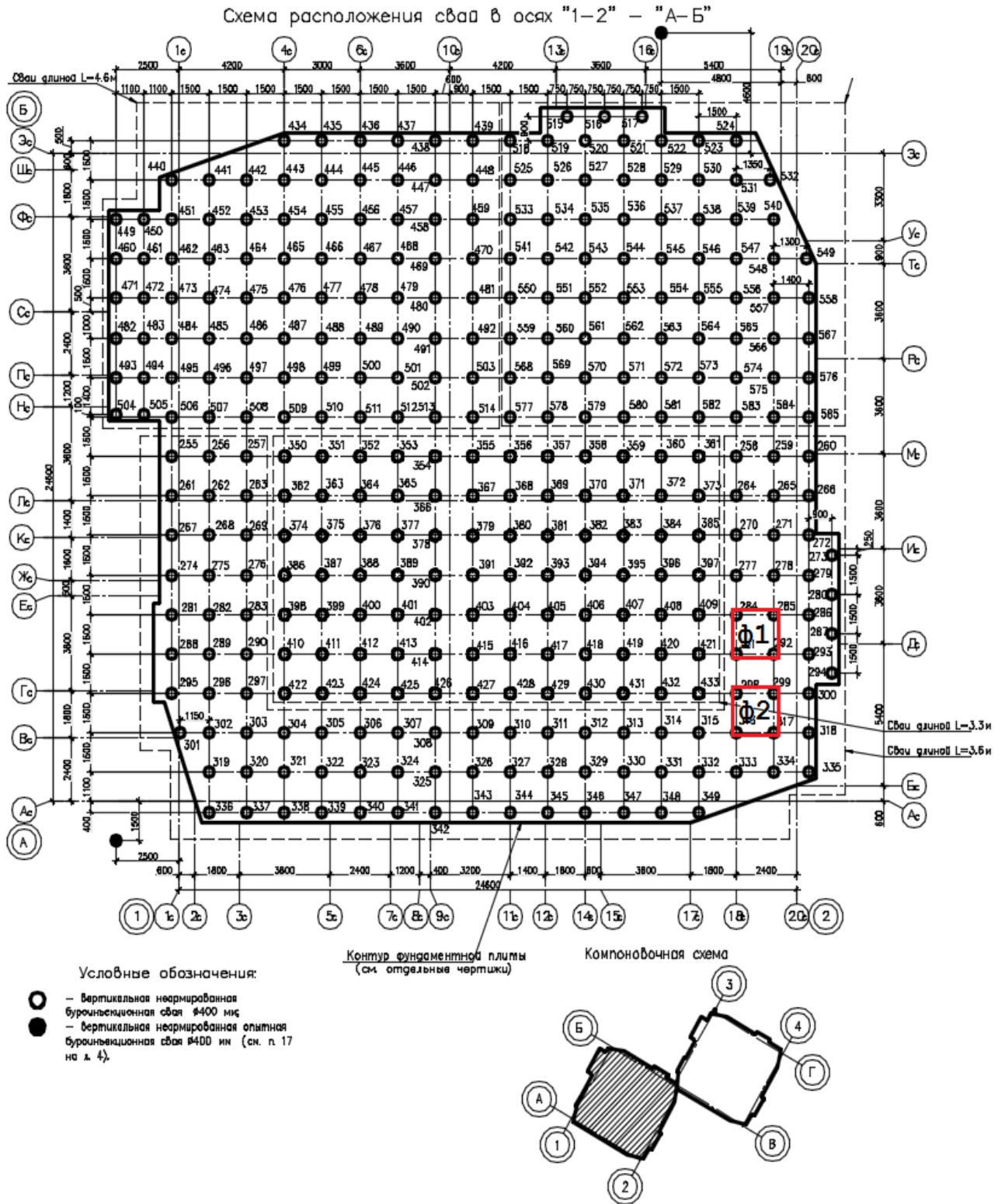


Рис. 3.3.1. Схема розташування фундаментів

Примітка. Рисунок слід читати разом з рисунками 3.3.2-3.3.7

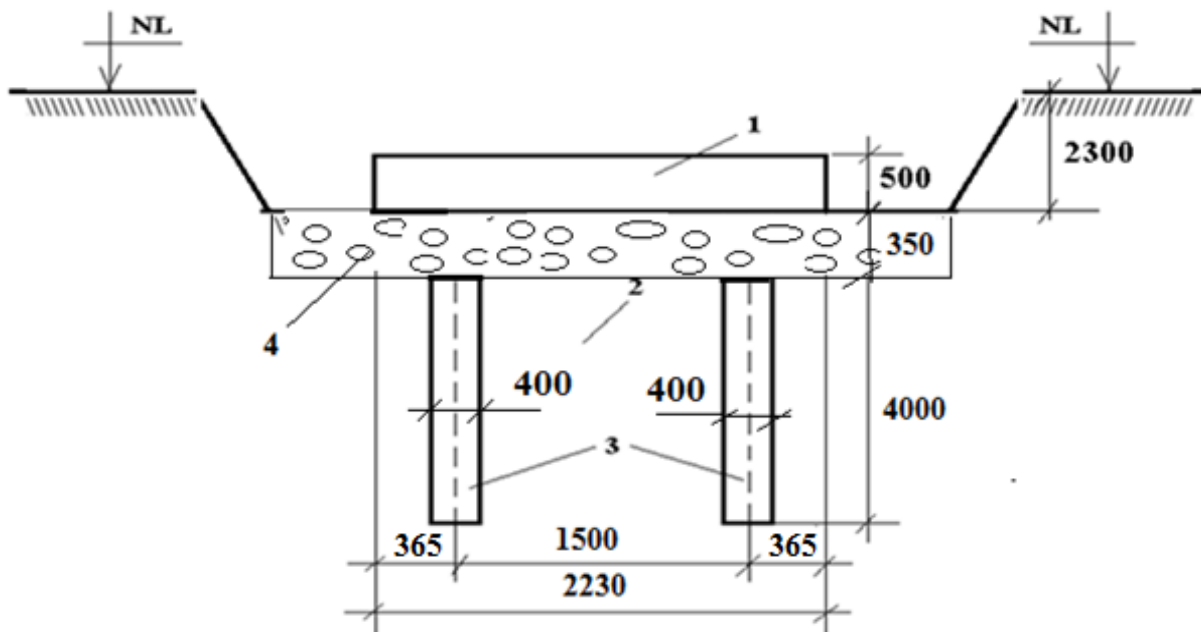


Рис. 3.3.2. Система «експериментальний фундамент - основа - ґрунтоцементні вертикальні елементи» (схема)

1 - великорозмірних штамп; 2 - основа; 3 - ґрунтоцементні елементи; 4 - підбетонка товщиною 100 мм і подушка зі щєбню і крупного піску 250 мм

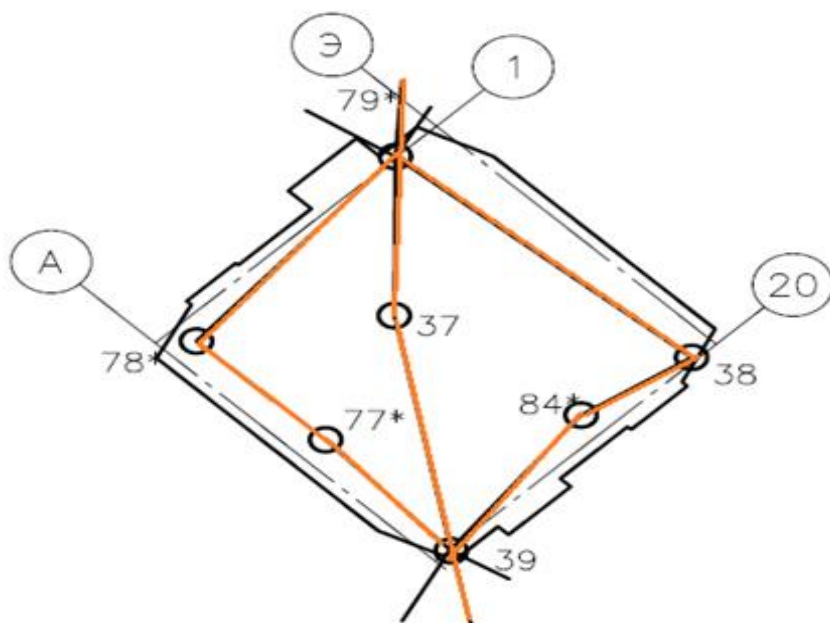


Рис. 3.3.3. Схема розташування свердловин, за якими побудовані інженерно - геологічні розрізи.

Примітки:

1. Кольоровими лініями показані напрямки, за якими побудовані інженерно - геологічні розрізи.
2. Чорною суцільною лінією позначений контур будівлі (рис. 3.3.1).
3. Цей рисунок слід читати разом з рисунками 3.3.1, 3.3.4, -3.3.7.

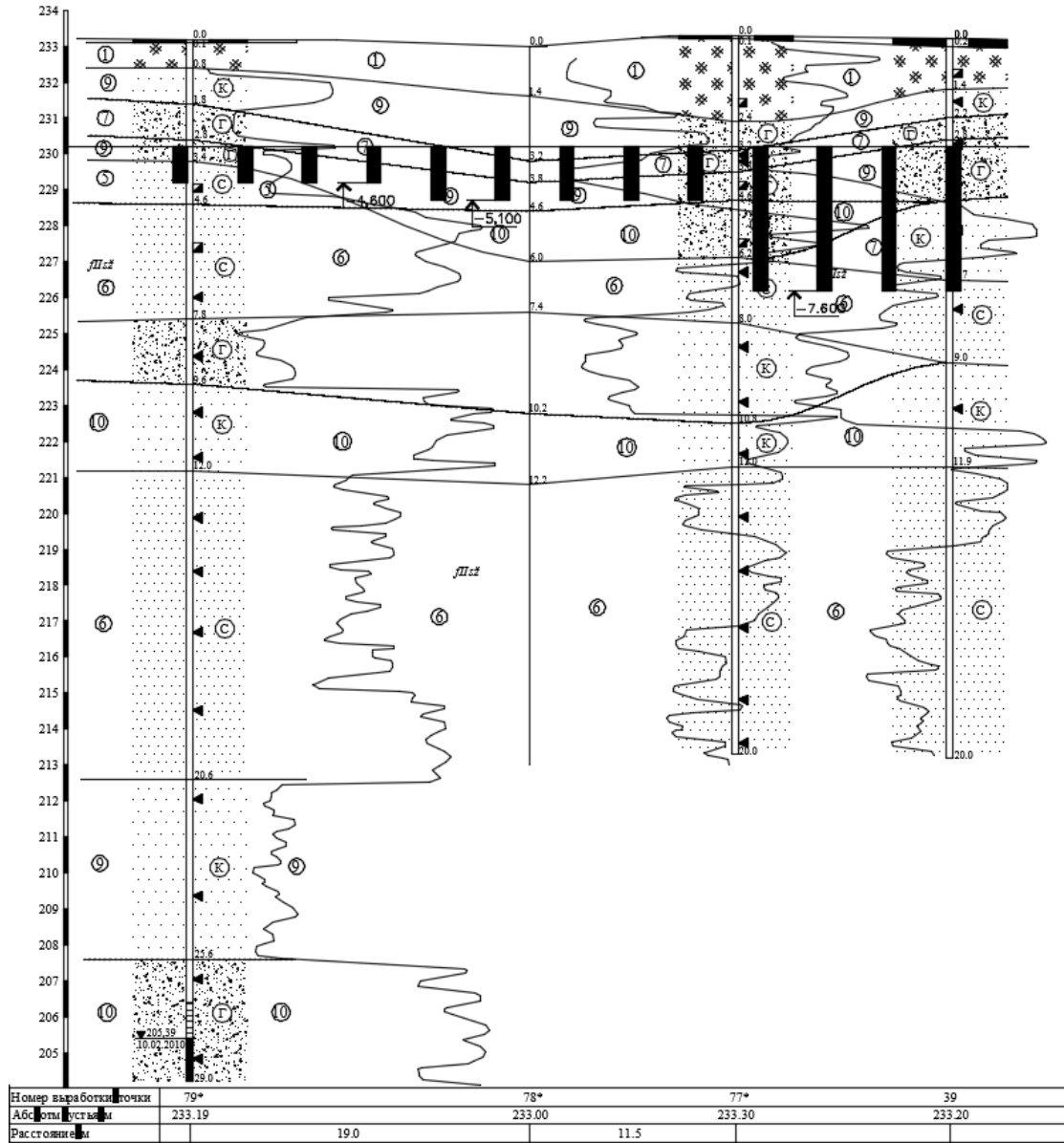


Рис. 3.3.4. Інженерно - геологічний розріз по свердловинах 79-78-77 \* -39.

Примітка:

Рисунок слід читати разом з рисунками 2.3.1, 2.3.3, 2.3.5, 2.3.6, 2.3.7.

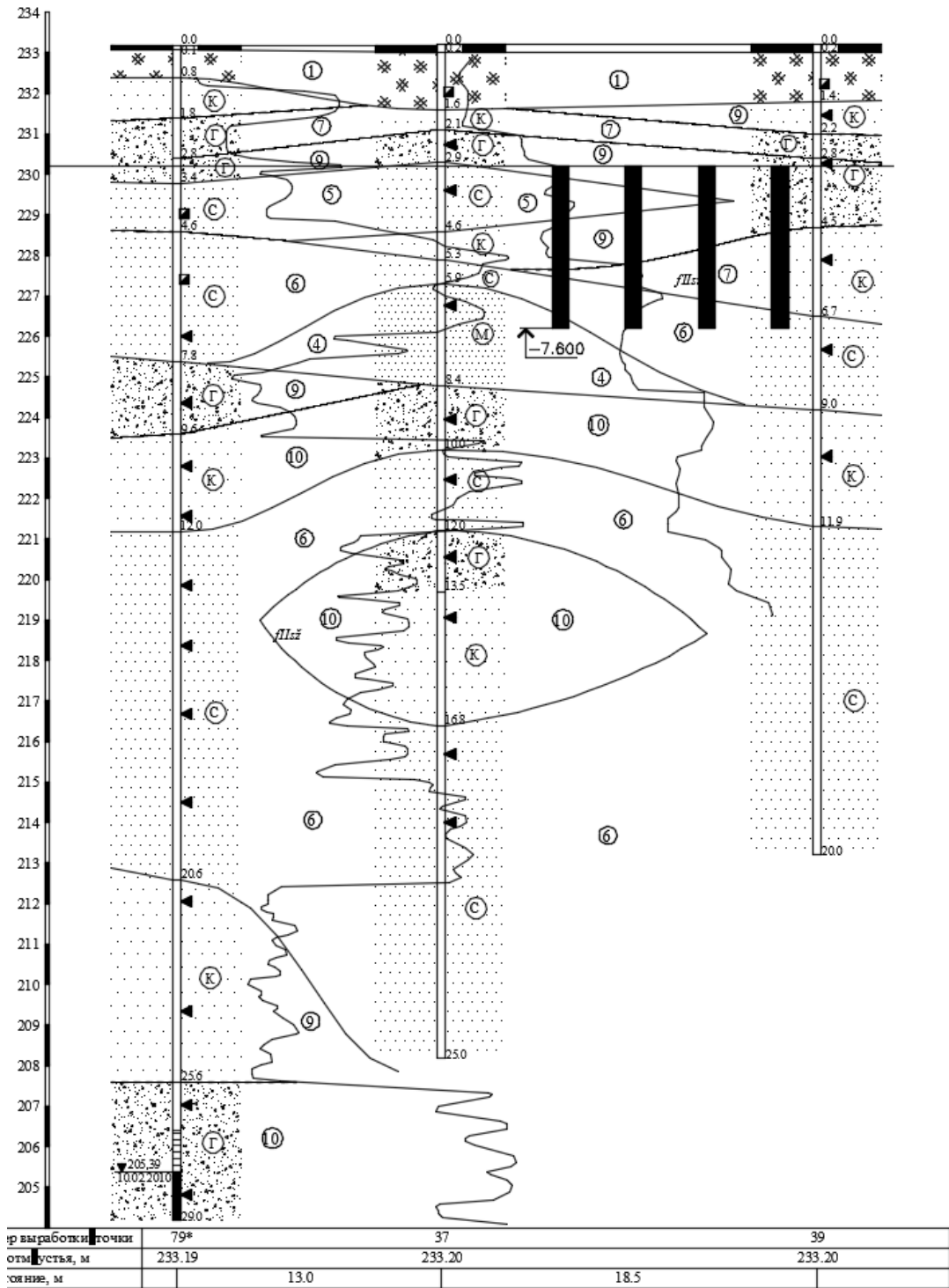


Рис. 2.3.5. Інженерно - геологічний розріз по свердловинах 77 - 37 - 39.

Примітка:

Рисунок слід читати разом з рисунками 3.3.1, 3.3.3, 3.3.4, 3.3.6, 3.3.7

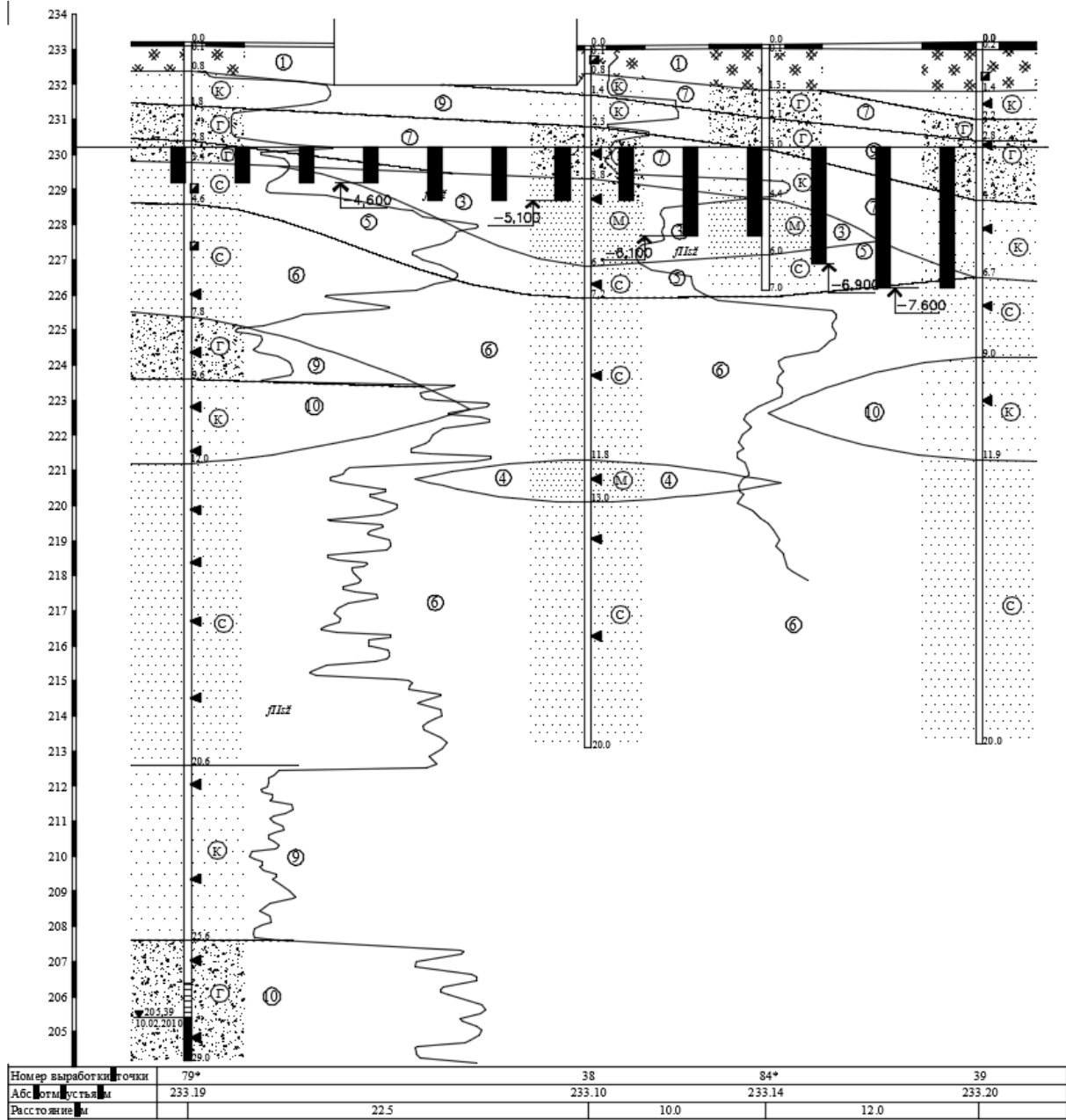


Рис. 3.3.6. Інженерно - геологічний розріз по свердловинах 79 \* -38-84 \* - 39.

Примітка:

Рисунок слід читати разом з рисунками 3.3.1, 3.3.3, 3.3.4, 3.3.5, 3.3.7

## УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ




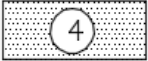






	– насипний ґрунт ( $\gamma_{II}=16.6 \text{ кН/м}^3$ );
	– супісь пилувата середньої міцності ( $\gamma_{II}=20.6 \text{ кН/м}^3$ ; $\phi_{II}=26^\circ$ ; $Q_{II}=22.0 \text{ кПа}$ ; $E=11.0 \text{ МПа}$ );
	– піски дрібні середньої міцності ( $\gamma_{II}=16.6 \text{ кН/м}^3$ ; $\phi_{II}=32^\circ$ ; $Q_{II}=2.0 \text{ кПа}$ ; $E=29.0 \text{ МПа}$ );
	– піски дрібні міцні ( $\gamma_{II}=17.7 \text{ кН/м}^3$ ; $\phi_{II}=35^\circ$ ; $Q_{II}=3.0 \text{ кПа}$ ; $E=31.0 \text{ МПа}$ );
	– пісок середньої крупності середньої міцності $q_c < 10 \text{ Мпа}$ ( $\gamma_{II}=17.1 \text{ кН/м}^3$ ; $\phi_{II}=36^\circ$ ; $Q_{II}=1.0 \text{ кПа}$ ; $E=26.0 \text{ МПа}$ );
	– пісок середньої крупності середньої міцності та міцні $q_c > 10 \text{ Мпа}$ ( $\gamma_{II}=17.7 \text{ кН/м}^3$ ; $\phi_{II}=37^\circ$ ; $Q_{II}=2.0 \text{ кПа}$ ; $E=32.0 \text{ МПа}$ );
	– піски крупні та гравелісті рихлі $\gamma_{II}=15.8 \text{ кН/м}^3$ ; $\phi_{II}=30^\circ$ ; $E=9.0 \text{ МПа}$ );
	– піски крупні та гравелісті середньої міцності $< 5 \text{ Мпа}$ ( $\gamma_{II}=16.7 \text{ кН/м}^3$ ; $\phi_{II}=35^\circ$ ; $E=15.0 \text{ МПа}$ );
	– піски крупні та гравелісті середньої міцності $5 < q_c < 10 \text{ Мпа}$ ( $\gamma_{II}=17.2 \text{ кН/м}^3$ ; $\phi_{II}=37^\circ$ ; $E=23.0 \text{ МПа}$ );
	– піски крупні та гравелісті середньої міцності та міцні $q_c > 10 \text{ Мпа}$ ( $\gamma_{II}=17.7 \text{ кН/м}^3$ ; $Q_{II}=1.0 \text{ кПа}$ ; $\phi_{II}=40^\circ$ ; $E=31.0 \text{ МПа}$ ).

Рис. 3.3.7. Умовні позначення, прийняті при побудові інженерно - геологічних розрізів на рисунках 3.3.4 - 3.3.6.

Майданчик, на якому виконувалися випробування моделей фундаментів, знаходиться на об'єкті "група житлових будинків і надземна гараж-стоянка в мікрорайоні №7 селища Східний (м.Мінськ)". Перша черга будівництва. Будинок №1.

Природний рельєф денної поверхні основи рівний (перепад висот по всьому гирлі свердловин не перевищує 0,30 м).

Інженерно-геологічні вишукування були проведені НПУП «будіндустрія» в 2011 році.

Виходячи з даних досліджень, було встановлено, що основа, на якій виконувалися штампові випробування, включає в себе насипні ґрунти (ІГЕ 1), піски великі і гравісті (ІГЕ 7, 8, 9 і 10), піски середньої крупності (ІГЕ 5 і 6), піски дрібні (ІГЕ 3 і 4), а також супіски пилуваті (ІГЕ 2).

Рівень підземних вод не вкрит.

Властивості і товщини ґрунтових шарів на вертикалях, що проходять через центри дослідних фундаментів, представлені в таблиці 3.3.1.

При посиленні основи з використанням струменевої цементації і улаштуванні фундаментів використовувалася така технологія.

Таблиця 3.3.1.

## Товщина і властивості ґрунтових шарів

№ п.п.	Назва ґрунта	№ ИГЭ	Товщина слою, м	$\gamma_{II}$ , кН/м <sup>3</sup>	$\varphi_{II}$ , град.	$C_{II}$ , кПа.	$E_{II}$ , МПа
1	НасипнийНасыпной ґрунт	1	0,8	16,6	-	-	-
2	Піски крупні та граві- сті	7	0,6	15,8	30	-	9
3	Піски крупні та граві- сті	9	0,9	17,2	37	-	32
4	Піски крупні та граві- сті	7	1,5	15,8	30	-	9
5	Піски мілкі та серед- ньої величини	3	2,5	16,6	32	2,0	31
6	Пісок середньої вели- чини	5	0,9	17,1	36	1,0	26
7	Пісок середньої вели- чини	6	4,6	17,7	37	2,0	9,0
8	Піски мілкі	4	1,2	17,7	35	3,0	31
9	Необмежений	6	4,6	17,7	37	2,0	9,0

Примітка. Рівень підземних вод не розкритий



1. Обладнання встановлювалося над точкою, в якій проводилося розбурювання лідерної свердловини (рис. 3.3.8).

2. Після цього відповідно до технічного завдання в розчино-змішувальному вузлі приготувався ін'єкційний розчин заданого складу і концентрації.

3. Далі розчин перекачувався в накопичувальну ємність і під високим тиском подавався на буровій став.

4. Після цього виконувалося буріння свердловин шарошечним долотом діаметром 127 мм на глибину, що перевищує глибину закладення палі на 500 мм.

5. Потім виконувалася промивка забою цементним розчином під тиском 8-12 атмосфер при витраті розчину 30 - 70 літрів в хвилину (рис. 3.3.9).

6. Далі здійснювався покроковий підйом монітора з одночасною подачею розчину через форсунки діаметром 2-3 мм з чотириразовим нагнітанням в одну і ту ж зону (рис. 3.3.10).

Це сприяє руйнуванню структури ґрунту і його перемішуванню з цементним розчином, а також повному заповненню свердловин.

6. Потім обладнання витягувалися із забою і переміщалося на нову точку, після чого процес повторювався.

7. Спуск монітора в свердловину здійснювався при одночасній подачі розчину під низьким тиском. Таким чином запобігати засмічення форсунок монітора.

8. Тиск і витрата розчину до проектного значення збільшувалась тільки тоді, коли головка монітора досягала проектної глибини.

9. Швидкість підйому монітора регулювалася з використанням електронної системи спостереження.

10. Тиск в нагнітаємому розчині регулювався візуально, шляхом контролю виносу пульпи із забою - при відсутності виносу тиск в розчині підвищувався, а при через мірному виносі - зменшувався.

Крім того, при влаштуванні ґрунтоцементних елементів були прийняті такі параметри:

1. Водно - цементне відношення нагнітає мого розчину становило  $В / Ц = 0,8-1,2$ .
2. При нагнітанні завжди використовувався зворотний хід (тобто воно виконувалося тільки при підйомі снаряда).
3. Швидкість обертання снаряда навколо своєї осі дорівнювала 20 - 30 оборотів в хвилину.
4. Вертикальна швидкість підйому снаряда становила 8 - 16 сантиметрів на хвилину.



Рис. 3.3.8. Розбурювання лідерної свердловини.





Рис. 3.3.9. Промивання забою цементним розчином





Рис. 3.3.10. Покроковий підйом монітора з одночасною подачею розчину через форсунки.

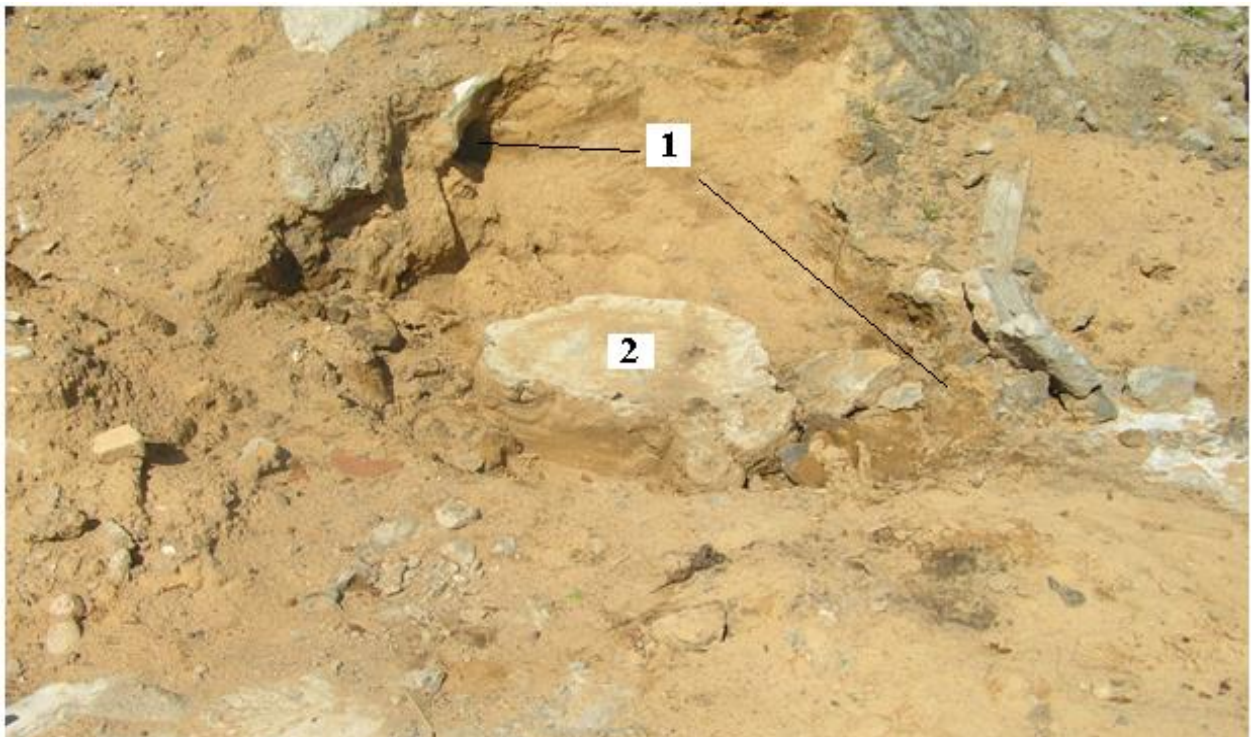


Рис. 3.3.11. Грунтоцементні елемент, виготовлений з використанням викладеної в цьому розділі технології. 1- основа; 2 - грунтоцементні елемент



5. Розчин нагнітався під тиском 300 - 400 атмосфер.

6. Витрата розчину цементу М550 при  $V / Ц = 1,0$  становить 550 кг на 1 кубічний метр ґрунту.

Отриманий з використанням даної технології ґрунтоцементний елемент представлений на рисунку 3.3.11.

Після виготовлення ґрунтоцементних елементів в основу вгвинчувались ґрунтові анкери (рис. 3.3.12, позиція 2), потрібні для кріплення поперечних упорних балок (рис. 3.3.12, позиція 3).

Далі виконувалося вирівнювання поверхні основи, на неї насипався шар піску товщиною 15 мм, на пісок встановлювався залізобетонний штамп (рис. 3.3.12, позиція 1), який притирався до основи з метою забезпечення повного контакту між його підшвою і основою.

Після цього в центрі штампа встановлювався гідравлічний домкрат (рис. 3.3.12, позиція 5).

Потім монтувалася поздовжня упорна балка (рис. 3.3.12, позиція 4).



Рис. 3.3.12. Експериментальна установка, призначена для випробувань фундаменту на посиленій з використанням струменевої цементациї основи.

1 - модель фундаменту (залізобетонний штамп з розмірами в плані 2х2 метра); 2 - ґрунтові анкери, що працюють на висмикування; 3 - поперечні упорні балки; 4 - поздовжня упорна балка; 5 - гідравлічний домкрат.

Далі встановлювалися поперечні упорні балки (рис. 3.3.12, позиція 3).

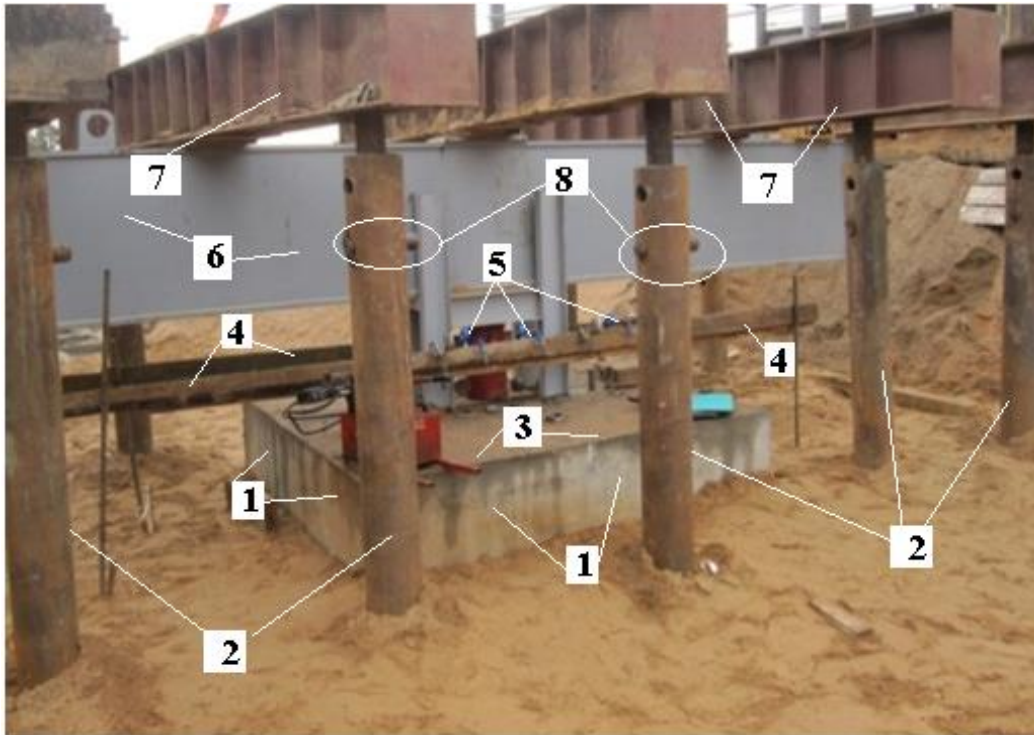


Рис. 3.3.13. Експериментальна установка, призначена для випробувань фундаменту на посиленій з використанням струменевої цементації основи. Реперна система.

Після цього монтувалася реперна система (рисунок 3.3.13, позиція 4), до якої кріпилися прогиноміри 6 ПАТ ЛИСИ(рисунок 3.3.13, позиція 5), з використанням яких визначалися вертикальні переміщення штампа.

Для забезпечення міцності бетонного штампа на зминання, перед установкою на фундамент встановлювалася розподільна металева плита з розмірами в плані 300х300 мм і товщиною 12 міліметрів (рисунок 3.3.13, позиція 3).

Довжина пов'язаних з ґрунтовими анкерами тяжів регулювалася шляхом перестановки металевих пальців (рисунок 3.3.13, позиція 8) в отвори.

Кріплення поперечних балок до ґрунтових анкерів здійснювалося з використанням гайок (рисунок 3.3.14, позиція 3)

1 - модель фундаменту (залізобетонний штамп з розмірами в плані 2х2 метра); 2 - ґрунтові анкери, що працюють на висмикування; 3 - розподільна металева плита товщиною 12 мм; 4 - реперна система; 5 - прогиноміри 6 ПАТ ЛИСИ; 6 - поздовжня упорна балка; 7 - поперечні упорні балки; 8 - вузол сполучення елементів ґрунтових анкерів



Рис. 3.3.14. Експериментальна установка, призначена для випробувань фундаменту на посиленій з використанням струменевої цементації основі. Кріплення поперечних балок.

1 - модель фундаменту (залізобетонний штамп з розмірами в плані 2х2 метра); 2 - ґрунтові анкери, що працюють на висмикування; 3 - розподільна металева плита товщиною 12 мм; 4 - петлі для монтажу штампа; 5 - гідравлічний домкрат; 6 - поздовжня упорна балка; 7 - поперечні упорні балки; 8 - вузол сполучення елементів ґрунтових анкерів

Експериментальна установка в зборі, підготовлена до випробувань, представлена на рисунку 3.3.15.



При проведенні штампових випробувань переслідувалося мета визначення модуля загальної деформації посиленої з використанням струменевої цементації основи при різних термінах набору ґрунтоцементом міцності.

Випробування проводилися в такій послідовності і при дотриманні таких правил.

1. Навантаження штампа здійснювалося попередньо відтарированим гідравлічним домкратом (рисунок 3.3.15, позиція 8).

2. Навантаження вимірювалася з похибкою не більше 5% ступені тиску з використанням зразкового гідравлічного манометра (рисунок 3.3.15, позиція 10).

3. Прогиноміра для вимірювання осідання штампа по реперній системі.



Рис. 3.3.15. Експериментальна установка, призначена для випробування фундаменту на посиленій з використанням струменевої цементації основи в зборі.

1 - модель фундаменту (залізобетонний штамп з розмірами в плані 2х2 метра); 2 - ґрунтові анкери, що працюють на висмикування; 3 - розподільна металева плита товщиною 12 мм; 4 - реперна система; 5 - прогиноміри 6 ПАТ



ЛИСИ; 6 - поздовжня упорна балка; 7 - поперечні упорні балки; 8 - гідравлічний домкрат; 9 - маслосос; 10 - манометр.

4. Штмп з'єднувався з прогиноміром ниткою зі сталевого дроту діаметром 0,3 мм.

5. Осідання вимірювалися з похибкою не більше 0,1 мм. При цьому точність відліку по шкалі прогиноміра дорівнювала 0,01 мм.

6. Поправка на деформацію дроту від температурних впливів визначалася за показниками контрольного прогиноміра.

Контрольний прогиномір для врахування впливу температури на зміну деформації встановлювався на реперній системі. Його нитка закріплювалася до нерухомого репера. Довжина нитки дорівнювала довжині нитки прогиноміра, що вимірює осадку штампа.

7. Осадка штампа визначалася як середньоарифметичне значення показань трьох прогиномірів, які фіксують осадку штампа в трьох точках, розташованих під кутом  $120^\circ$  від осі штампа в горизонтальній площині.

8. Для досягнення щільного контакту подошви штампа з ґрунтом вироблялося три повороти штампа навколо його вертикальної осі.

При цьому напрямок повороту кожен раз змінювався.

Після установки і притирання штампа з використанням рівня перевірялася горизонтальність його положення.

9. Поверхня ґрунту в межах площі установки штампа ретельно планувалася і вирівнювався.

10. ступені тиску і час умовної стабілізації деформації при проведенні штампових випробувань приймалися відповідно до вимог таблиці 3.2.2. Час витримки кожного наступного рівня тиску повинен бути не менше часу витримки попереднього.

При цьому в перший щабель включалась вага домкрата.

11. Кожна ступінь тиску дотримувалися до умовної стабілізації деформації ґрунту (осідання штампа). При цьому за критерій умовної

стабілізації деформації приймають швидкість осідання штампа, що не перевищує 0,1 мм за час, вказаний в таблиці 3.3.2.

Таблиця 3.3.2

Ступені тиску і час умовної стабілізації деформації при штампових випробуваннях для великоуламкових і піщаних ґрунтів

Назва ґрунту	Коефіцієнт водонасичення $S_r$ , д.ед.	Ступені тиску $\Delta P$ , МПа, при щільності ґрунтів:			Час умовної стабілізації деформації $t$ , час
		Щільні	Середньої щільності	Рихлі	
Великоуламкові	$S_r \leq 1,0$	0,1	0,1	0,1	0,5
Піски гравеліті та крупні	$S_r \leq 1,0$	0,1	0,05	0,025	0,5
Піски середньої величини	$S_r \leq 0,5$	0,1	0,05	0,025	0,5
Піски середньої величини	$0,5 < S_r < 1,0$	0,1	0,05	0,025	1,0
Піски малі та пилуваті	$S_r \leq 0,5$	0,05	0,025	0,01	1,0
Піски малі та пилуваті	$0,5 < S_r \leq 1,0$	0,05	0,025	0,01	2,0

12. Відлік по прогиномірами на кожному ступені навантажування знімались:

- через кожні 10 хв протягом першої півгодини;
- через кожні 15 хв протягом другої півгодини;

- далі через кожні 30 хв до умовної стабілізації деформацій ґрунту.

З використанням викладеної вище методики нами були виконані випробування двох штампів.

Перший з них, на рис. 3.3.1 він має позначення Ф1, був випробуваний через 5 діб після посилення основи з використанням методу струменевої цементації.

Отримані в ході обробки експериментальні данні залежності «осадка - навантаження» представлені на рисунку 3.3.16.

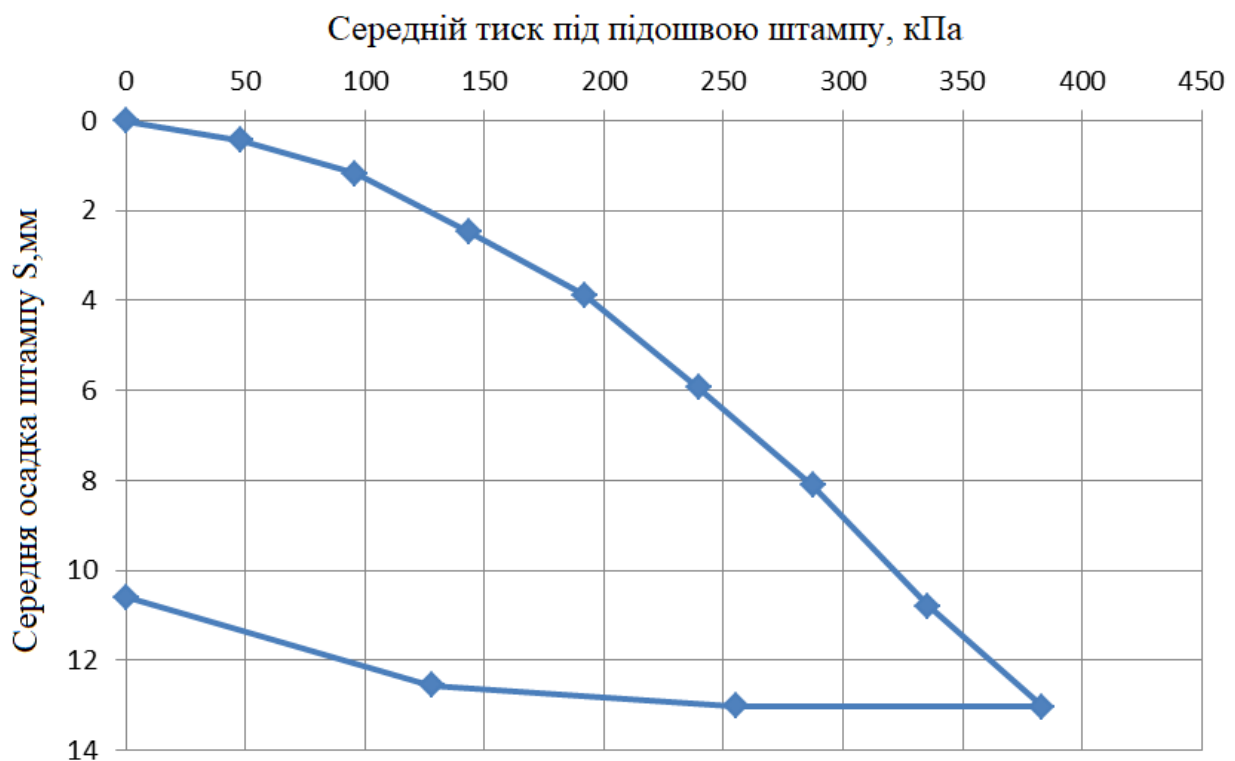


Рис. 3.3.16. Експериментальна залежність «осадка - навантаження», отримана в ході випробувань посиленої з використанням струменевої цементації основи.

Час набору ґрунтоцемент міцності дорівнює 5 діб

Другий штамп, на рис. 3.3.1 він позначений Ф2, був випробуваний через 28 діб після посилення основи з використанням методу струменевої цементації.

Отримані в ході обробки експериментальних даних залежності «осадка - навантаження» представлені на рисунку 3.3.17.

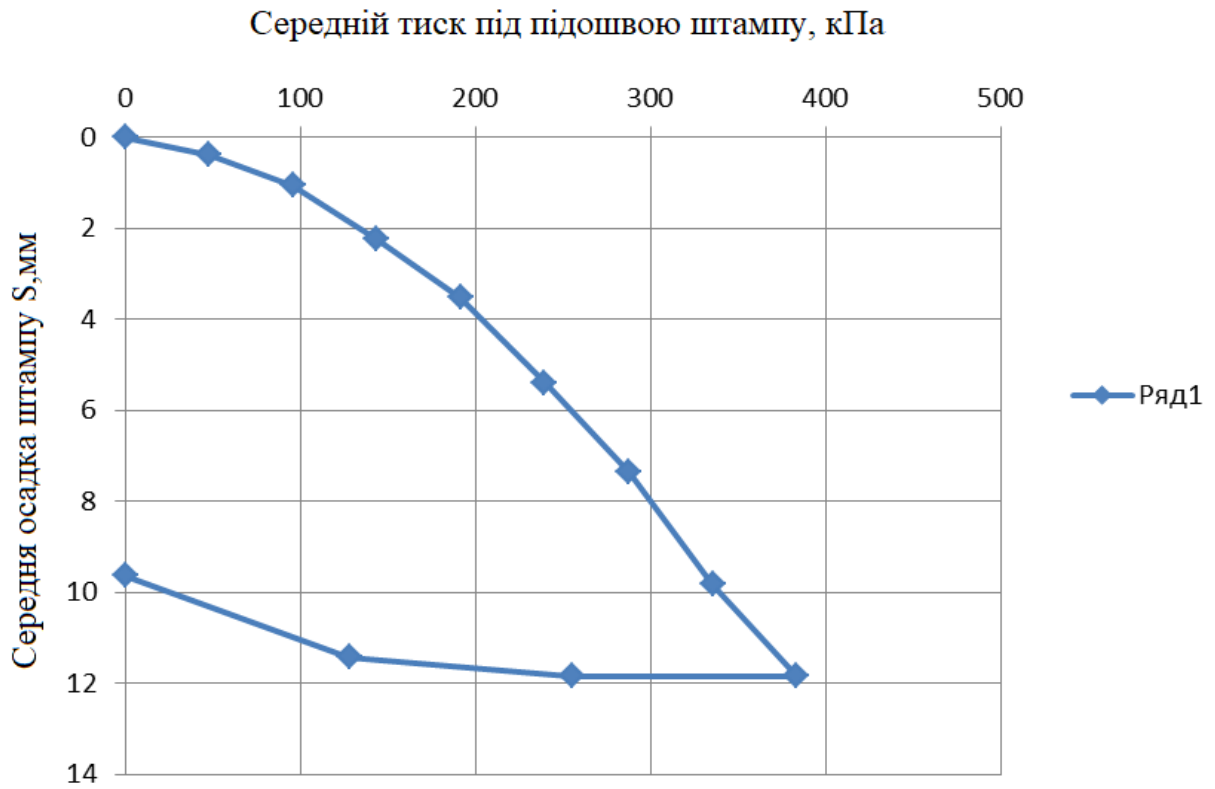


Рис. 3.3.17. Експериментальна залежність «осадка - навантаження», отримана в ході випробувань посиленої з використанням струменевої цементації основи.

Час набору ґрунтоцементом міцності 28 діб



Рис. 3.3.18. Голова відритого ґрунтоцементного елемента



Рис. 3.3.19. Керни, випиляні з ґрунтоцементних елементів після їх випробувань великорозмірними штампами



Рис. 3.3.20. Керни, випилені з ґрунтоцементних елементів в процесі їх випробувань на пресі

Після завершення випробувань великорозмірних штампів виконувався їх демонтаж і виконувалася розкопка ґрунтоцементних елементів (рис. 3.3.18) і з них відбиралися керни довжиною 150 мм і діаметром 75 мм (рис. 3.3.19), які випробовувались на гідравлічному пресі (рис. 3.2.20).

Виявилося, що ґрунтоцемент в 28 - добовому віці має такі характеристики міцності і деформаційні властивості:

- опір руйнуванню  $R = \text{кПа}$ ;
- міцність на стиск  $R_b = \text{кПа}$ ;
- міцність на стиск  $R_{bt} = \text{кПа}$ ;
- модуль загальної деформації  $E = \text{МПа}$ .

Висновки по розділу.

Викладені в цьому розділі матеріали досліджень дозволили зробити такі висновки:

1. Міцність ґрунтоцементу залежить від гранулометричного складу (точніше, крупності) піску, з якого він виготовлений, а також від часу твердіння.

2. В процесі набору міцності ґрунтоцемент в інтервалі часу від 2 до 28 діб його міцність на стиск і розтяг збільшується в 3-6 разів.

3. Залежність міцності ґрунтоцементу на стиск від часу твердіння на інтервалі часу від 2 до 28 діб описується поліномом другого ступеня (коефіцієнт множинний кореляції  $r > 0,9$ ).

4. Залежність міцності ґрунтоцементу на розтягнення від часу твердіння на інтервалі часів від 2 до 28 діб описується поліномом другого ступеня (коефіцієнт множинний кореляції  $r > 0,9$ ).

5. В процесі набору міцності ґрунтоцемент на інтервалі часу від 1 до 28 діб його модуль загальної деформації збільшується в 3,8-5 разів.

6. Залежність модуля загальної деформації від часу твердіння на інтервалі часу від 2 до 28 діб з високим ступенем точності (коефіцієнт множинний кореляції  $r > 0,9$ ) описується логарифмічною функцією.

7. Експериментальні осідання великорозмірних штампів, розташованих на посиленій з використанням методу струменевої цементації основі при різних термінах набору ґрунтоцемент міцності (5 і 28 діб після їх виготовлення), в даному конкретному випадку розрізняються не більше ніж на 10%.

## РОЗДІЛ 4

# МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПОСИЛЕНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ СТРУМЕНЕВОЇ ЦЕМЕНТАЦІЇ ОСНОВ. ПЕРЕВІРКА РЕКОМЕНДОВАНОЇ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ПОСИЛЕНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ СТРУМЕНЕВОЇ ЦЕМЕНТАЦІЇ ОСНОВ НА АДЕКВАТНІСТЬ ЕКСПЕРИМЕНТУ.

У даному розділі викладені матеріали досліджень, які включають в себе:

1. Рекомендовану нами методику, спрямовану на розрахунок посилених з використанням методу струменевої цементації основ реконструйованих будівель і споруд.
2. Матеріали перевірки рекомендованої нами методики на адекватність експериментальними даними.

### 4.1. Методика розрахунку посилених з використанням методу струменевої цементації основ

У цьому розділі викладена методика, розрахунку посилених із використанням методу струменевої цементації основ реконструйованих будівель і споруд.

Основною її відмінністю від прийнятих в даний час в нормативних документах методик є те, що розрахунок міцності і деформацій реконструюючих з використанням методу струменевої цементації основ будівель і споруд виконується на етапах устрою ґрунтоцементних елементів і набору ними міцності в інтервалі часу від початку їх виготовлення до завершення твердіння ґрунтоцементу.

Суть методики полягає в наступному:



1. Основи реконструйованих будівель і споруд, які посилюються з використанням методом струменевої цементації, на етапі їх виготовлення і набору ґрунтоцементом проектної міцності слід розраховувати по першій і другій групах граничних станів, тобто по міцності, стійкості, несучої здатності і деформаціям.

1.1. Основу по несучій здатності і міцності слід розраховувати в тому випадку, коли цементація виконується в безпосередній близькості від існуючих фундаментів або в тому випадку, коли додавання до нього навантаження здійснюється до повного розсіювання порового тиску в нагнітаємій в ґрунт рідині.

1.2. Перевірку міцності ґрунтоцементних елементів слід виконувати в тому випадку, коли навантаження до основи прикладається до набору ними проектної міцності.

1.3. Розрахунок основ за деформаціями слід виконувати в усіх випадках.

2. В результаті розрахунку основ по першій групі граничних станів необхідно домогтися виконання умов:

$$F \leq \gamma_c \cdot F_u / \gamma_n, \quad (4.1.1)$$

де  $F$  - розрахункове навантаження на основу;

$F_u$  - сила граничного опору основи;

-  $\gamma_c$  - коефіцієнт умов роботи, що приймається:

- для пісків, крім пілуватих  $\gamma_c = 1,0$

- для пісків пілуватих, а також пілувато-глинистих ґрунтів

- в стабілізованому стані  $\gamma_c = 0,9$

- для пілувато-глинистих ґрунтів в нестабілізованому стані  $\gamma_c = 0,85$ ;

-  $\gamma_n$  - коефіцієнт надійності за призначенням споруди, приймаємо рівним

1.2; 1.15 і 1.10 відповідно для будівель і споруд I, II і III класів.

Вхідні у формулу (4.1.1) параметри слід приймати відповідно до рекомендацій [63].

При цьому замість фактичного значення кута внутрішнього тертя  $\varphi_I$  слід приймати його фіктивне значення  $\varphi_I^*$ , яке необхідно визначати за формулою:

$$\varphi_I^* = \arcsin \left[ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2 \cdot c \cdot \operatorname{ctg}(\varphi_I)} \right]; \sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3, \quad (4.1.2)$$

де:

- $\varphi_I$  фактичне значення кута внутрішнього тертя, визначене на інтервалі довірчої ймовірності  $\alpha = 0,95$ ;
- $\varphi_I^*$  фактичне значення кута внутрішнього тертя, визначене на по формулі (4.1.2);
- $\sigma_1, \sigma_2$  та  $\sigma_3$  - головні напруження в даній точці основи, які слід визначати відповідно до вимог пункту 2.1 цієї методики;
- $P$  - поровий тиск в даній точці, який слід визначати відповідно до вимог пункту 2.2 цієї методики.

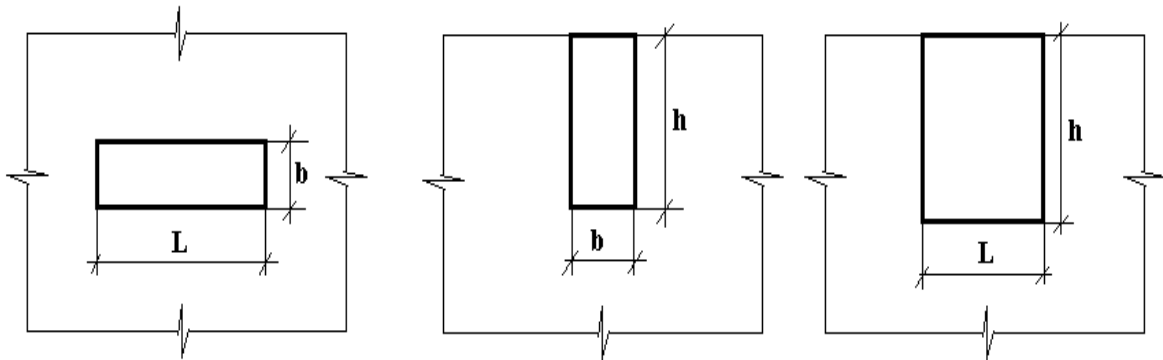


Рис. 4.1.1. Фактична розрахункова схема основи.

Примітка:  $b$  та  $L$  - розміри завантаженої області в плані; а  $h$  - відстань від денної поверхні до низу ґрунтоцементних елементів

2.1. Головні напруження в основі слід визначати з використанням техніки кінцевих елементів [72, 57, 112].

Ґрунт слід моделювати з використанням 4 - вузлових (тетраєдрів), 6 - вузлових (гексаєдрів) і 8 - вузлових (октаєдрів) елементів.

Ґрунтоцементні елементи слід моделювати з використанням лінійних (2 - вузлових) елементів.

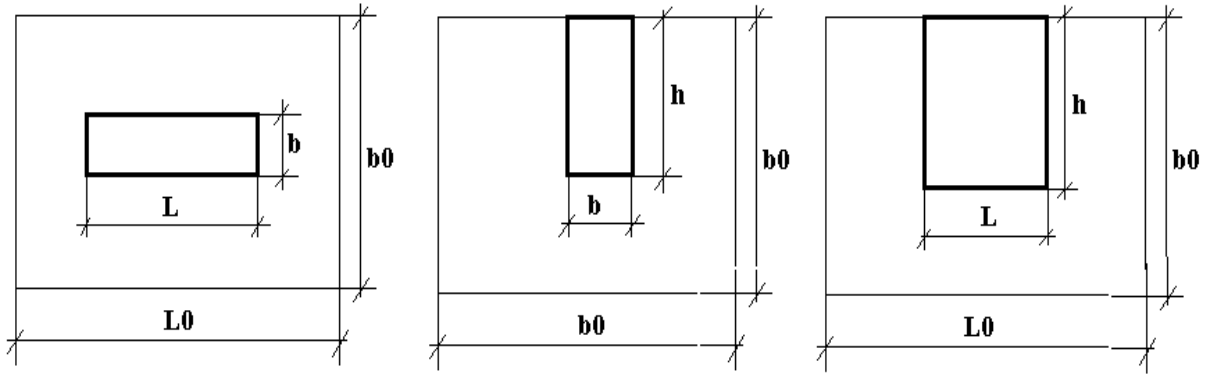


Рис. 4.1.2. Наближена розрахункова схема основи

Примітки:

1.  $b$  та  $L$  - розміри завантаженої області в плані; а  $h$  - відстань від денної поверхні до низу ґрунтоцементних елементів
2.  $b_0$ ,  $L_0$  та  $h_0$  - розміри розрахункової області.

Розміри розрахункової області слід приймати відповідно до вимог таблиці 4.1.1 і розрахунковими схемами, представленими на рисунках 4.1.1 і 4.1.2 (ці дані отримані в роботі [94]):

Розміри розрахункової області слід визначати за формулами:

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= K_b \cdot b; \\ L_0 &= K_L \cdot b; \\ h_0 &= K_h \cdot b; \end{aligned} \right\}, \quad (4.1.3)$$

де  $K_b$ ,  $K_L$  та  $K_h$  - коефіцієнти, які слід приймати по таблиці 4.1.1, а  $b$  - ширина завантаженої області.

Деформаційні властивості ґрунту слід приймати відповідно до даних інженерно - геологічних вишукувань, а деформаційні властивості ґрунтоцементу - відповідно до формулами (4.1.7).

3. В результаті розрахунку ґрунтоцементних елементів необхідно домогтися виконання умови:

$$K = \left. \begin{array}{l} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2 \cdot c_{2y}(t) \cdot ctg(\phi_{2y}(t))} \leq 1 \\ \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3, \end{array} \right\} \quad (4.1.4)$$

де:

-  $\phi_{2y}(t)$  - кут внутрішнього тертя ґрунтоцементу, який визначається за формулою (4.1.6);

-  $c_{2y}(t)$  - питоме зчеплення ґрунтоцементу, яке визначається за формулою (4.1.6);

-  $\sigma_1, \sigma_2$  та  $\sigma_3$  - головні напруження в даній точці основи, які слід визначати відповідно до вимог пункту 2.1 цієї методики;

У формулі (4.1.4) допускається приймати:

$$K = \left. \begin{array}{l} \sigma_1 = \frac{N}{A}; \sigma_2 = \sigma_3; \\ \frac{N}{A} \\ \frac{N}{A} + 2 \cdot c_{2y}(t) \cdot ctg(\phi_{2y}(t)) \end{array} \right\} \leq 1 \quad (4.1.5)$$

де:

- $N$  - максимальна осьова сила в ґрунтоцементі (визначається в процесі кінцево - елементного розрахунку);
- $A$  - площа поперечного перерізу ґрунтоцементного елемента;
- $\varphi_{zu}(t)$  та  $c_{zu}(t)$  - див. пояснення до формули (4.1.5).

3.1. Кут внутрішнього тертя і питоме зчеплення ґрунтоцементу в розрахунковий момент часу визначається за формулою:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{zu}(t) &= \arcsin \left[ \frac{R_b(t) - R_{bt}(t)}{R_b(t) + R_{bt}(t)} \right]; \\ c_{zu}(t) &= \frac{1}{2} \cdot \sqrt{R_b(t) \cdot R_{bt}(t)} \end{aligned} \right\} \quad (4.1.6)$$

де:

- $R_b(t)$  - міцність ґрунтоцементу на стиск в розрахунковий момент часу;
- $R_{bt}(t)$  - міцність ґрунтоцементу на розтягнення в розрахунковий момент часу.

3.2. Міцність ґрунтоцементу на стиск  $R_b(t)$  і розтяг  $R_{bt}(t)$ , а також його модуль загальної деформації  $E(t)$  в розрахунковий момент часу слід визначати за формулами:

$$\left. \begin{aligned} R_b(t) &= R_b(28) \cdot (-0,001 \cdot t^2 + 0,0562 \cdot t + 0,1991); \\ R_{bt}(t) &= R_{bt}(28) \cdot (-0,001 \cdot t^2 + 0,0562 \cdot t + 0,1991); \\ E(t) &= E(28) \cdot (0,2448 \cdot \ln(t) + 0,2275); \\ t &\in (1, \dots, 28) \text{ суток.} \end{aligned} \right\} \quad (4.1.7)$$

Тут,  $R_b(28)$ ,  $R_{bt}(28)$  та  $E(28)$  - відповідно міцність ґрунтоцементу на стиск і розтяг, а також модуль загальної деформації ґрунтоцементу у віці 28 діб;  $t$  - час в добах;

4. В результаті розрахунку за другою групою граничних станів необхідно домогтися виконання умов:

$$S \leq S_u, \quad (4.1.8)$$

Тут:  $S$  - розрахункова осадка;  $S_u$  - граничне значення спільної деформації основи і споруди для даного класу споруд.

4.1. Деформації основи слід визначати з використанням техніки методу кінцевих елементів.

Ґрунт слід моделювати з використанням 4 - вузлових (тетраедрів), 6 - вузлових (Гексаедр) і 8 - вузлових (октаедрів) елементів.

Ґрунтоцементні елементи слід моделювати з використанням лінійних (2 - вузлових) елементів.

Розміри розрахункової області слід приймати відповідно до вимог таблиці 4.1.1 і розрахунковими схемами, представленими на рисунках 4.1.1 і 4.1.2 (ці дані отримані в роботі [94]):

Деформаційні властивості ґрунту слід приймати відповідно до даних інженерно - геологічних вишукувань, а деформаційні властивості ґрунтоцементу - відповідно до формулами (4.1.7).

4.2. Розрахунок деформацій посилених з використанням струменевої центації основ повинні виконуватися з використанням спільної схеми розрахунку.

4.3. Допускається виконувати розрахунок з використанням роздільної схеми.

#### 4.2. Перевірка рекомендованої методики розрахунку посилених з використанням методу струменевої цементації основ на адекватність експерименту

В ході перевірки на адекватність експерименту викладеної вище методики (розділ 4.1) нами були розраховані осідання великорозмірних штампів (розділ 4.3).

В якості вихідних даних нами були використані представлені в таблиці 2.3.1 дані інженерно - геологічних вишукувань і встановлені в ході інженерно - геологічних вишукувань.

Розрахунок виконувався в такій послідовності.

1. Спочатку був виконаний розрахунок з використанням викладеної в розділі 4.1 цієї роботи методики для моменту часу 5 діб після виготовлення ґрунтоцементних паль.

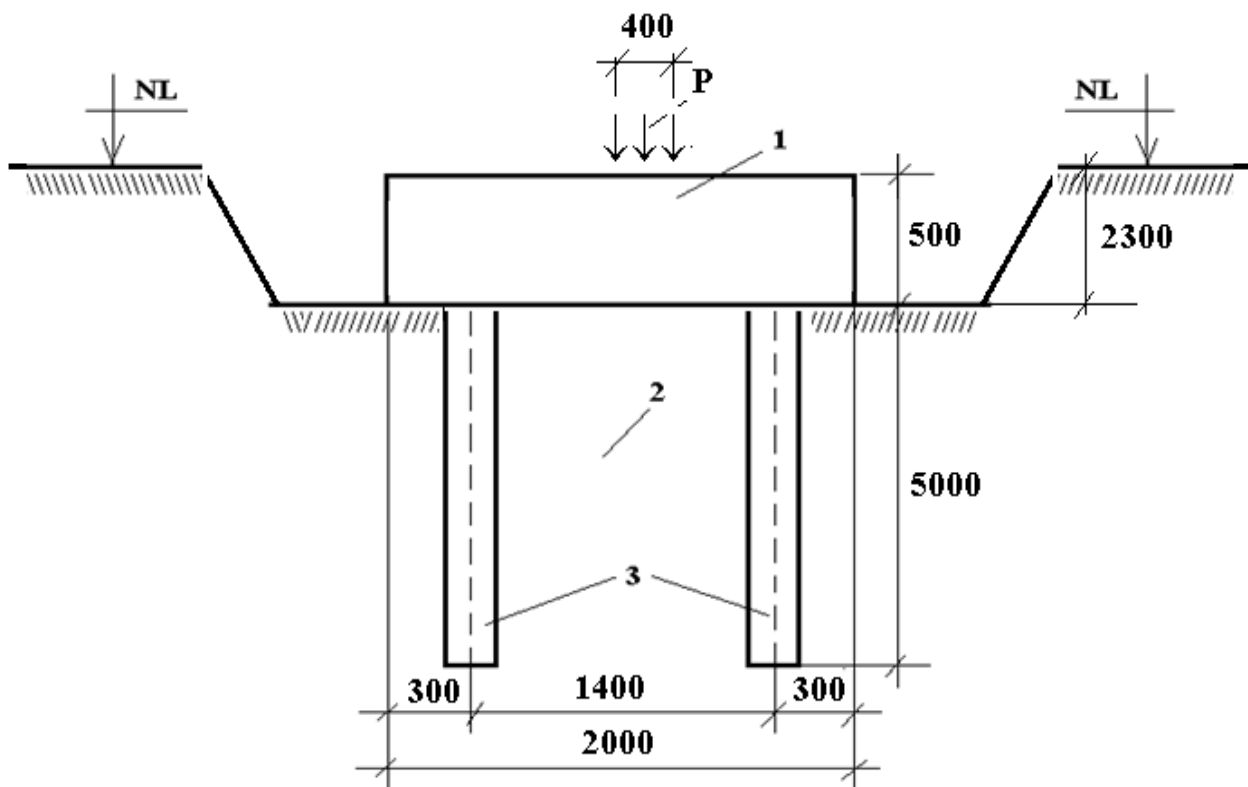


Рис. 4.2.1. Система «посилена з використанням струменевої цементації основа - фундамент».

1 - великорозмірних штамп; 2 - основа; 3 - ґрунтоцементні елементи

Для цієї мети був використаний програмний комплекс «Ліра».

2. Після цього був виконаний розрахунок з використанням викладеної в розділі 4.1 цієї роботи методики для моменту часу 28 діб після виготовлення ґрунтоцементних паль.

Для цієї мети був використаний програмний комплекс «Ліра».

Розрахункова схема фундаменту на посиленій з використанням струменевої цементації основі представлена на рисунку 4.2.1.

Навантаження, які прикладалися до штампів, представлені в таблиці 4.2.1.

Таблиця 4.2.1.

Навантаження на фундамент

Номер ступеня навантаження	Зосереджене навантаження на фундамент N, кН	Середній тиск під металевою розподільчою плитою P1, кПа	Середній тиск під підошвою фундамент P, кПа
1	192	1198	48
2	383	2396	96
3	575	3594	144
4	767	4792	192
5	958	5991	240
6	1150	7189	288
7	1342	8387	335
8	1534	9585	383

Загальний вигляд розрахункової області основи представлений на рисунку 4.2.2, на рисунках 4.2.3 і 4.2.4 представлена нумерація вузлів просторових (ґрунту) і лінійних (ґрунтоцементу) елементів відповідно



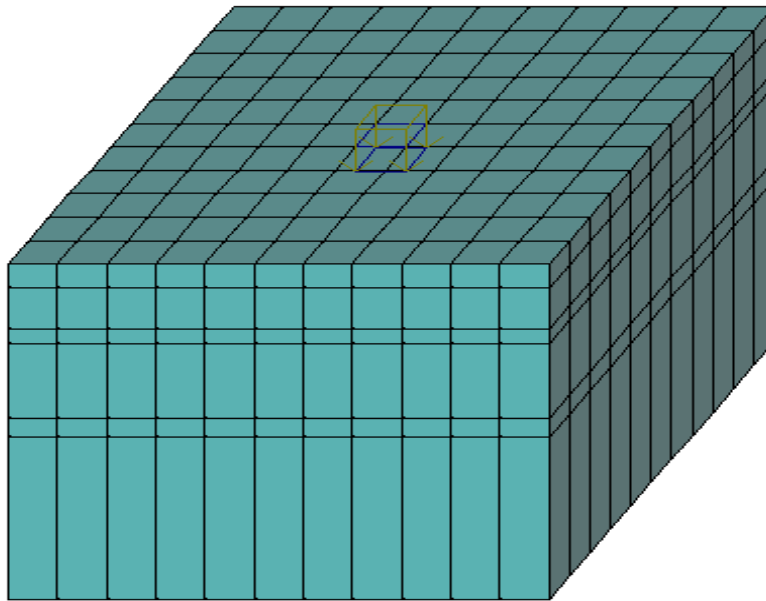


Рис. 4.2.2. Розрахункова область основи. Кінцево - елементна апроксимація.  
Навантаження

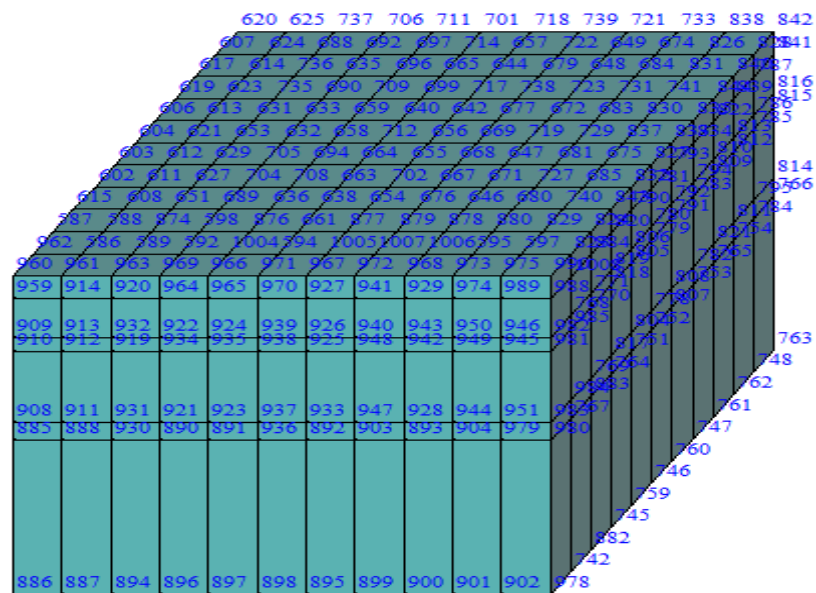


Рис. 4.2.3. Розрахункова область основи. Нумерація вузлів просторових кінцевих елементів

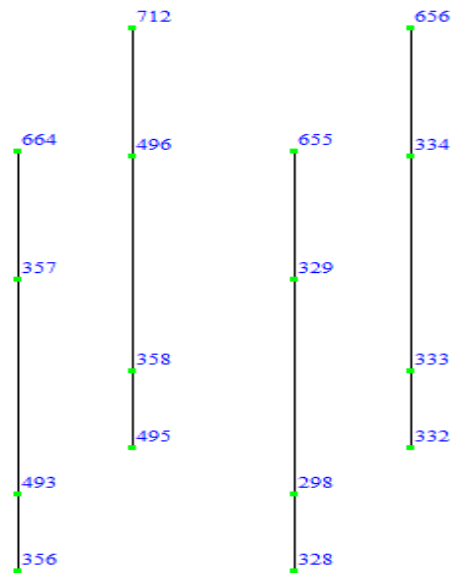


Рис. 4.2.4. Нумерація вузлів двоточкових кінцевих елементів (грунтоцементу)

На рисунках 4.2.5 і 4.2.6 представлена нумерація жорсткостей просторових (грунту) і лінійних (грунтоцементу) елементів відповідно.

Жорсткість грунтоцементу (тобто його модуль загальної деформації) розраховувався за формулою (4.1.7). Значення модуля загальної деформації  $E(28)$  приймалося відповідно до (2.3.1).

Виявилось що:

- модуль загальної деформації грунтоцементу на 5 - у добу після його виготовлення  $E(5) = 157$  Мпа;

- модуль загальної деформації грунтоцементу на 28 - ту добу після його виготовлення  $E(28) = 241$  Мпа;

Результати розрахунку осідань основи, відповідні середньому тиску під подошвою фундаменту, який дорівнює  $p = 383$  кПа (остання щабель навантаження) представлені на рисунках 4.2.7 (відповідає часу набору грунтоцемент міцності 5 діб) і 4.2.8 (відповідає часу набору грунтоцементом міцності 28 діб).

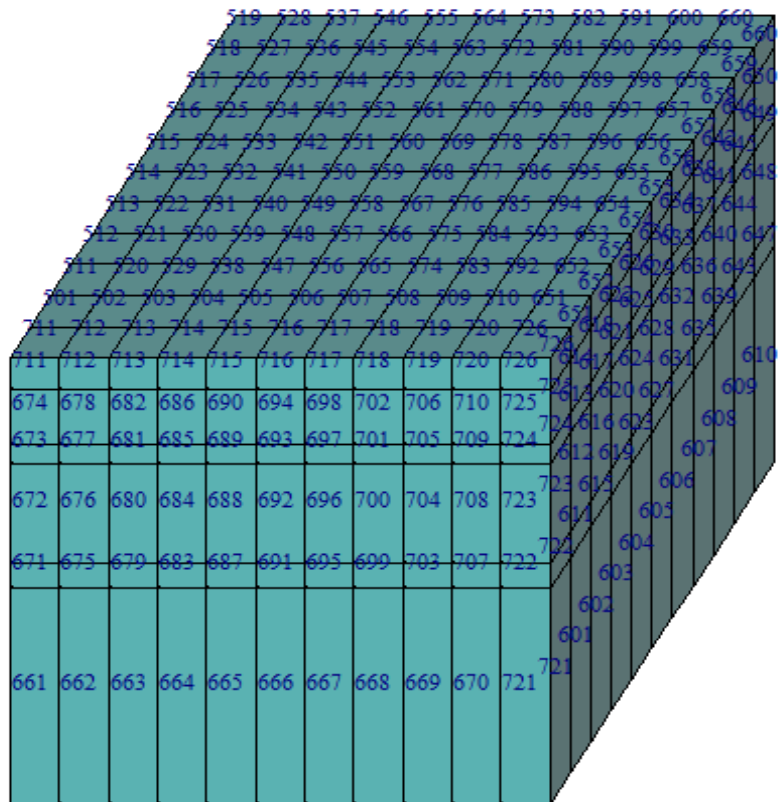


Рис. 4.2.5. Розрахункова область основи. Нумерація просторових скінченних Елементів

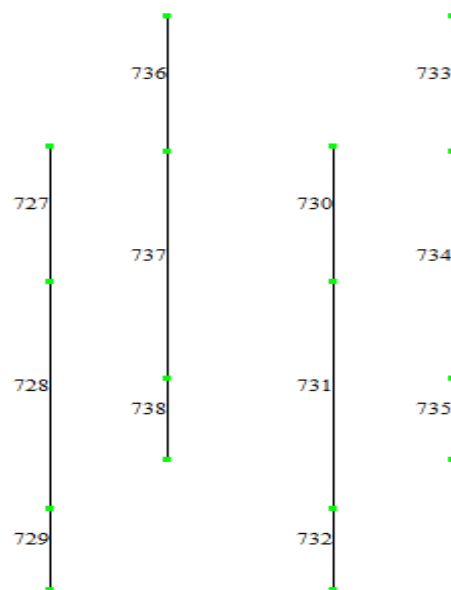


Рис. 4.2.6. Розрахункова область основи. Нумерація двоточкових кінцевих елементів (грунтоцементу)

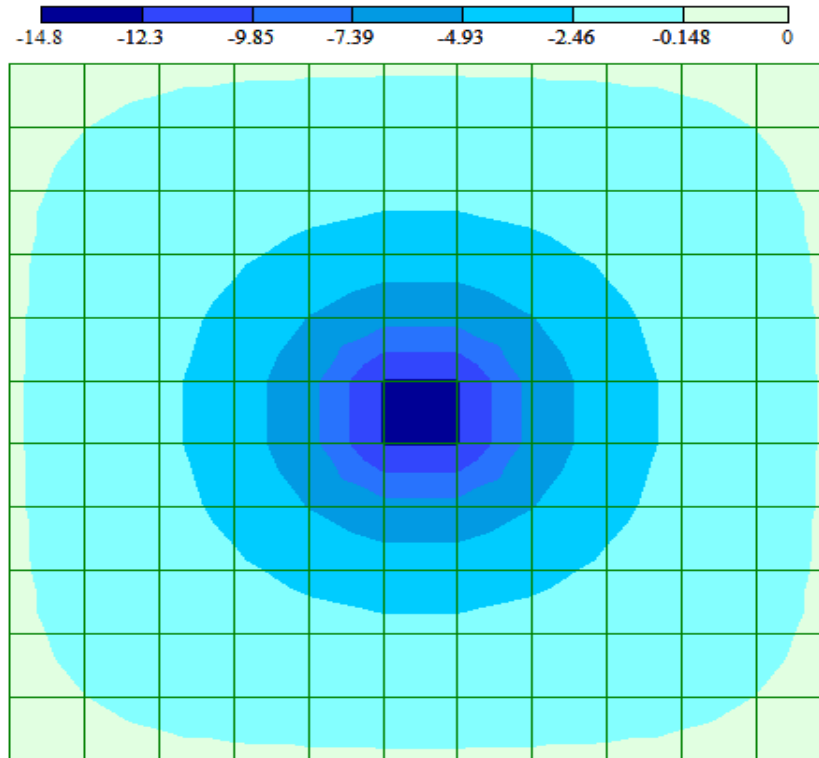


Рис. 4.2.7. Ізополі вертикальних деформацій земної поверхні. Час набору грунтоцемент міцності дорівнює 5 діб. Примітка. Осідання вказані в міліметрах

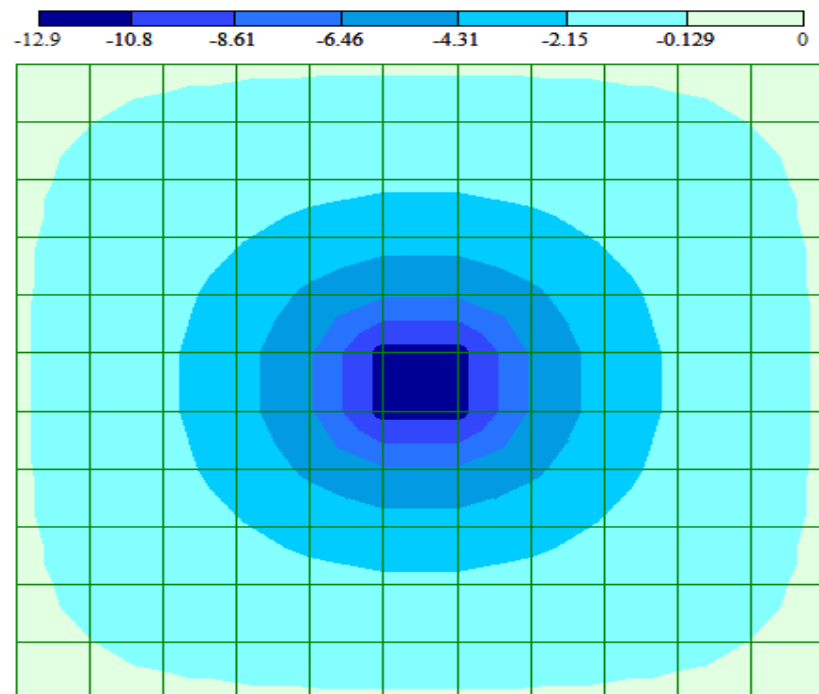


Рис. 4.2.8. Ізополі вертикальних деформацій земної поверхні. Час набору грунтоцемент міцності дорівнює 28 діб. Примітка. Осідання вказані в міліметрах

Для візуальної оцінки розбіжності між експериментальними і розрахунковими залежностями «осадка - навантаження» на рисунку 4.2.9 представлені фактична і розрахункова криві, відповідні часу твердіння ґрунтоцементу 5 діб, а на рисунку 4.2.10 - аналогічні залежності, відповідні часу твердіння ґрунтоцементу 28 діб.

Для кількісної оцінки відповідності розрахункових і фактичних залежностей «осадка - навантаження» нами визначалися відносна похибка між фактичними і розрахунковими осадками (формула (4.2.1)).

$$\Delta = \left| \frac{S_{\text{факт}} - S_{\text{расч}}}{S_{\text{факт}}} \right| \cdot 100\% , \quad (4.2.1)$$

де  $S_{\text{факт}}$  - фактичний (експериментальний), а  $S_{\text{расч}}$  - розрахункова осідання.

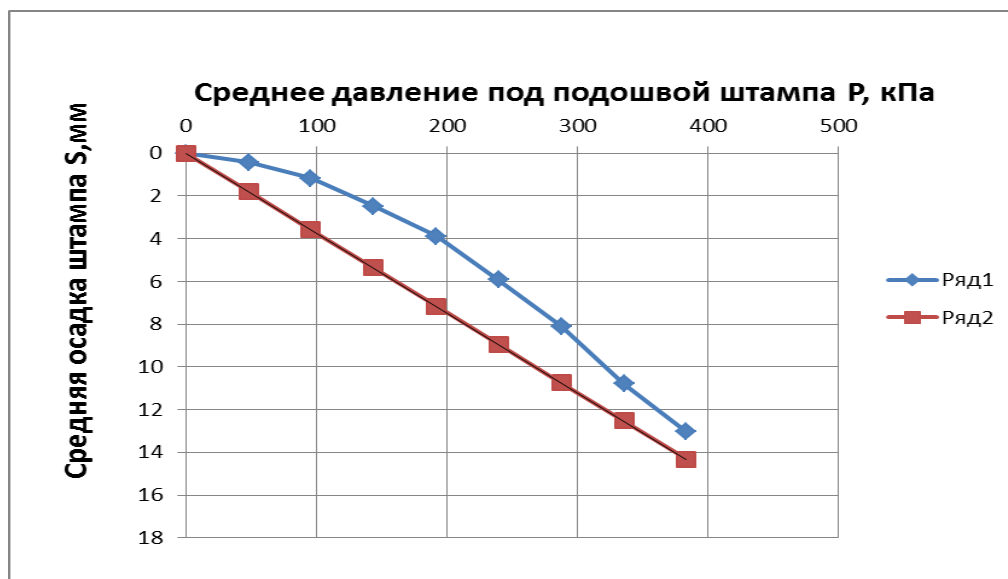


Рис. 4.2.9. Фактичні (ряд 1) і розрахункові (ряд 2) осідання посиленої з використанням струменевої цементації основи.

Примітка. Час набору ґрунтоцементом міцності дорівнює 5 діб

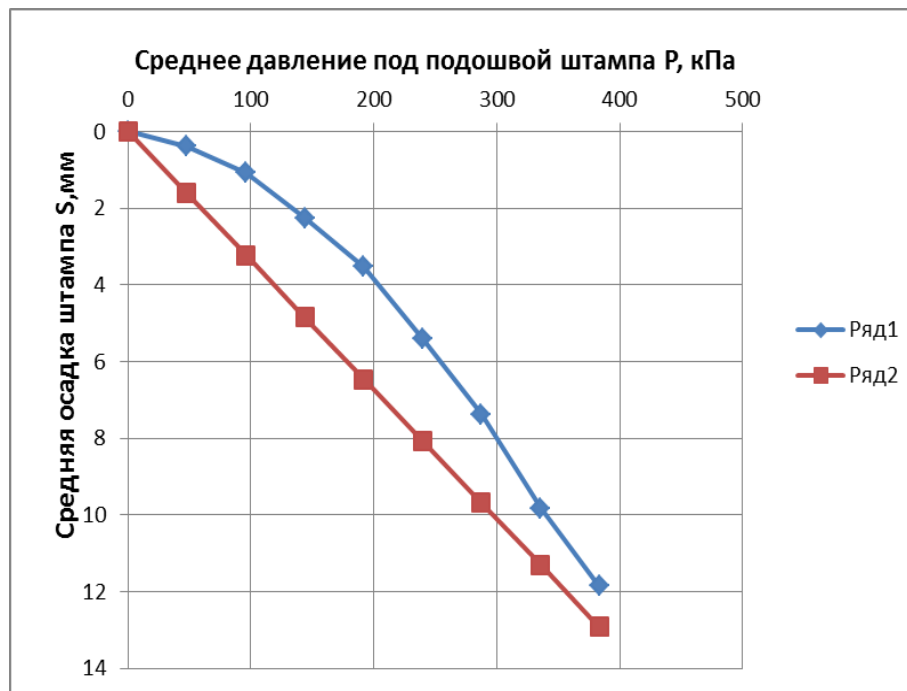


Рис. 4.2.10. Фактичні (ряд 1) і розрахункові (ряд 2) осідання посиленої з використанням струменевої цементації основи.

Примітка. Час набору грунтоцемент міцності одно 28 діб

Виявилось, що для моменту твердіння грунтоцементу = 5 діб похибка не перевищує 9%, а для часу твердіння = 28 діб похибка не перевищує 10%.

Крім того, для кількісної оцінки відмінності між осадками, відповідними часу твердіння грунтоцементу 5 діб і 28 діб нами визначалися абсолютна величина відносної похибки між ними (формула (4.2.2)).

$$\Delta = \left| \frac{S_{28} - S_5}{S_{28}} \right| \cdot 100\%, \quad (4.2.2)$$

де  $S_{28}$  - осадка штампів, випробуваного після 28 діб твердіння бетону, а  $S_5$  - осадка штампів, випробуваного після 5 діб твердіння бетону.

Були зроблені такі висновки:

1. Розбіжність між фактичними осадками, відповідними термінам твердіння ґрунтоцементу 5 і 28 діб становить 9,1%.

2. Розбіжність між фактичними осадками, відповідними термінам твердіння ґрунтоцементу 5 і 28 діб не перевищує 10%.

В цілому було зроблено висновок про те, що застосування викладеної в розділі 4.1 методики дозволяє отримати достовірні результати і забезпечити гарну відповідність між розрахунковими і фактичними осадками посиленних з використанням струменевої цементації основ при різних термінах твердіння ґрунтоцементу.

Крім того, було встановлено, що застосування викладеної в розділі 4.1 методики дозволяє обґрунтовано скоротити час будівництва.

#### Висновки по розділу

Викладені в цьому розділі матеріали досліджень дозволили нам зробити такі висновки:

1. Вперше запропоновано методику розрахунку параметрів процесу посилення ґрунтових основ реконструйованих будівель і споруд з використанням струменевої цементації, яка дозволяє визначити такі технологічні параметри:

1.1. Безпечна відстань від існуючих фундаментів, на якому допускається виконувати струменеву цементацію.

1.2. Мінімальний час після влаштування ґрунтоцементних елементів, починаючи з якого до основи може бути додана проектне навантаження.

2. Виконано перевірку розробленої нами методики на адекватність експерименту. Зроблено висновок про хорошу відповідність натурних і експериментальних даних (розбіжність не перевищує 10%).

## ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

Виконані нами і викладені в даній роботі матеріали досліджень дозволили нам зробити такі висновки:

1. Аналіз досвіду виготовлення ґрунтоцементних елементів (ГЦЕ) з використанням високонапірної цементації при реконструкції будівель і споруд показав, що подальший розвиток даного напрямку фундаментобудівництва пов'язано з проблемою визначення деформацій, міцності і стійкості основ на етапах виготовлення ГЦЕ і набору ними міцності.

2. На основі аналізу результатів лабораторного експерименту було встановлено, що залежність міцності ґрунтоцементу від часу твердіння (0-28 діб) з достатньою точністю може бути описана поліномом другого ступеня, а залежність модуля загальної деформації від часу - логарифмічною функцією (відносна похибка не перевищує 10 %).

3. Запропоновано критерій розрахунку ґрунтоцементних елементів в процесі набору ними міцності.

4. Запропоновано методику посилення ґрунтових основ реконструйованих будівель і споруд з використанням високонапірної цементації, яка дозволяє визначити мінімальний час після влаштування ґрунтоцементних елементів, починаючи з якого до основи може бути додане проектне навантаження.

Позитивний ефект досягається за рахунок обліку таких додаткових факторів:

- зміни в часі міцності і деформативності ґрунтоцементних елементів;
- міцності і деформаційних властивостей складаючих основу ґрунтових шарів.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аллас Э.Э., Мещеряков А.Н. Укрепление оснований гидротехнических сооружений. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 115 с.
2. Амензаде Ю.А. Теория упругости. – Баку: Азербайджанское Государственное издательство учебно-педагогической литературы - 1968 - 250 с.
3. Банник Г.И. Техническая мелиорация грунтов. – Киев.: Вища школа, 1976. – 304 с.
4. Бездробный О. И., Булатов А. И., Барановский В. Д. Справочное руководство по цементировочному оборудованию. –М.: Недра, 1979. – 285 с.
5. Бондаренко В. И., Власов С. Ф., Захаров В. В. Электрохимическое закрепление пород в горном деле. –Днепропетровск: Из-во ДГУ, 1993. – 212 с.
6. Бойко И.Л., Раед М. Абдулхуссейн, А.В. Шаповал, Нестерова Е.В., Шаповал В. Г. Закономерности изменения во времени порового давления при устройстве буровых свай с использованием джет-технологии. Одесса
7. И.Л.Бойко, Р.М. Аль–Хаснави. Высоконапорная струйная цементация при реконструкции зданий и сооружений в грунтовых условиях Беларуси
8. Бройд, И.И. Струйная геотехнология: учебное пособие / И.И. Бройд. – М.: Издательство ассоциации строительных вузов, 2004. – 448 с.
9. Власов С.Ф. Теоретические и прикладные основы струйного закрепления слабых дисперсных пород при ведении горных работ. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. - Днепропетровск, 1999. - 359 с
10. Власов С.Ф. Теория и технология струйного закрепления слабых пород.//Металлургическая и горная промышленность. – 1997. №1 – с. 4-5.
11. Власов С.Ф.Установка для струйного закрепления пород// Вибрация в технике и технологиях – 1997. №3 – с. 29-31.
12. Власов С.Ф. Определение условий устойчивости рабочей колонны в процессе работы струйного монитора// Вибрация в технике и технологиях – 1997. №3 – с. 31-32.

13. Власов С.Ф., Ткачук С.В. Влияние скорости вращения и поднятия монитора на основные технологические параметры струйных технологий закрепления слабых пород// Проблемы и перспективы освоения подземного пространства крупных городов. Днепропетровск: НГА Украины – 1998 – с. 131-137.

14. Власов С.Ф., Ткачук С.В., Владыко А.Б. Экспериментальные исследования и теоретический расчет процесса насыщения дисперсных пород закрепляющим раствором при струйной технологии// Проблемы и перспективы освоения подземного пространства крупных городов. Днепропетровск: НГА Украины – 1998 – с. 137-142.

15. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. - М.: Высш. шк., 1978. - 447 с.

16. Байков В. Н., Сигалов Э. Е. "Железобетонные конструкции. Общий курс." Учебник для вузов.-5-е изд., перераб. и доп.-М.: Стройиздат, 1991.-767 с.: ил.

17. Ганичев И.А. Устройство искусственных оснований и фундаментов. – М.: Стройиздат, 1981.–543 с.

18. Головки С.И. Физическая и математическая формализация процесса инъецирования грунтовых оснований. Сб.науч.тр.: Строительство, Материаловедение, Машиностроение; Вып. №21.–Дн-ск: ПГАСиА, 2002, –С.92-96.

19. Головки С.И. Напряженно-деформированное состояние грунтовых оснований при их усилении методом инъецирования. Закономерности распределения порового давления. Сб.науч.тр.: Дн-ск – Варшава. ПГАСиА и Варшавский технический университет. – С. 75-80.

20. Головки С.И., Шаповал В.Г., Швец В.Б. Теоретические основы и практика укрепления грунтовых оснований высоконапорными инъецициями. /THEORETICAL FOUNDATIONS AND APPLICATION OF SOIL FOOTINGS STRENGTHENING BY HIGH PRESSURE INJECTIONS/. XIII Европейская конференция по механике грунтов и геотехническому строительству. “Геотех-

нические проблемы насыпных и загрязненных массивов грунтов”, 25-28 августа, 2003г. –Прага, Чешская Республика.– С.691-694.

21. Головки С.И. Напряженно-деформированное состояние грунтовых оснований при инъекционном закреплении. Сб. научн. трудов “Теоретические основы строительства”, ПГАСиА и Варшавского технического университета. Вып. 12. том 2. –Warsawa – Дн-вск, 2004. –С.637-642.

22. Головки С.И. Напряженно-деформированное состояние грунтового основания в процессе высоконапорного инъецирования . В сб. научных трудов. Строительные конструкции. Вып.61, т. 1. –Киев: НИИСК, 2004. –С.42-47.

23. Головки С.И. Напряженно-деформированное состояние грунтовых оснований при высоконапорной инъециции. В сб: Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб.науч.трудов. Вып.27. –Дн-вск, ПГАСиА, 2004. – С.224-231.

24. Головки С.И. Опыт диагностики и усиления оснований зданий методом высоконапорной инъециции в сложных геологических условиях. Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб.науч.трудов. Вып.35, ч.1. – Дн-вск: ПГАСиА, 2005. –С.148-155.

25. Головки С.И. Досвід цементації основ та діагностики закріплених масивів на спорудах Чорнобильської АЕС. Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб.науч.трудов. Вып.43, ч.1. –Дн-вск, ПГАСиА, 2007. –С.123-132.

26. Головки С.И. Напряженно-деформированное состояние грунтовых оснований при их усилении методом инъецирования. Закономерности распределения порового давления. В сб. научн. трудов “Теоретические основы строительства”, ПГАСиА и Варшавского технического университета. Вып. 11. –Дн-вск-Warsawa, 2003. – С.75-80.

27. Головки С.И. Теория и практика усиления грунтовых оснований методом высоконапорной цементации. Днепропетровск.Пороги.2010-248 с.

28. Гольдштейн М.Н., Царьков А.А., Черкасов И.И. “Механика грунтов, основания и фундаменты.”: Учебник для вузов ж.-д. трансп. – М.: Транспорт, 1981. – 320 с.
29. ГОСТ 20522-75. Грунты. Методы определения физических характеристик.
30. ГОСТ 23908-79. Грунты. Методы лабораторного определения сжимаемости.
31. ГОСТ 20276-84. Грунты. Методы полевого определения характеристик деформации.
32. Горбунов-Посадов М.И., Ильичев В.А., Крутов В.И. и др. Основания, фундаменты и подземные сооружения. Справочник проектировщика. –М.: Стройиздат, 1985. – 480 с.
33. Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты. Изд. 2-е - Л.: Стройиздат, 1988. – 415 с.
34. ДБН В.3.1.-1-2002 “Ремонт и усиление несущих и ограждающих строительных конструкций и оснований промышленных зданий и сооружений”, –Киев, 2003.
35. ДБН В.1.2-5:2000. Часть 2. Будинки і споруди на просідаючих грунтах.
36. ДБН В2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування.
37. Джатимиров, Х.Ф. Опыт усиления основания сооружения с помощью струйной технологии / Х.Ф. Джатимиров, А.А. Долев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2006. – №1. – С. 16 – 19.
38. Жусуббеков А.Ж., Сапарбек Е.А., Жакулин А.С., Жакулин А.А. Закрепление грунтов основания методом цементации. В зб. Армування ґрунтового масиву будівництві, реконструкції, захисту будівель та споруд. Вип.. 55., Київ, НДІБК, 2001, с. 44-48.
39. Зарецкий Ю.К. Теория консолидации грунтов. –М.: Наука. 1967 – 270 с.

40. Зарецкий Ю.К. Лекции по современной механике грунтов. – Ростов-на-Дону, 1989. – 608 с.

41. Зеге, С.О. Особенности проектирования грунтобетонных конструкций, сооружаемых с помощью струйной геотехнологии / С.О. Зеге, И.И. Бройд // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2007. – №4. – С. 25 – 27.

42. Интернет ресурс Итальянский опыт использования струйной цементации [http://www.yurkevich.ru/pdf\\_publications/jet-grouting\\_it.pdf](http://www.yurkevich.ru/pdf_publications/jet-grouting_it.pdf) (струйные технологии в Италии)

43. Реконструкция театра «Ла скала» О.П. Юркевич [https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjz3ceo9J7KAhXGDywkHUIJaBDAQFggaMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.yurkevich.ru%2Fpdf\\_publications%2FLa-Scala.pdf&usg=AFQjCNGQnFQqbcP0yX9P6IeR0z4N3m822g](https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjz3ceo9J7KAhXGDywkHUIJaBDAQFggaMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.yurkevich.ru%2Fpdf_publications%2FLa-Scala.pdf&usg=AFQjCNGQnFQqbcP0yX9P6IeR0z4N3m822g)

44. Технологии улучшения строительных свойств оснований [https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiHo7\\_Xt5\\_KAhUEvnIKHc--BeEQFgggMAE&url=http%3A%2F%2Fraidex.ru%2Ftechnology%2F&usg=AFQjC NF6g5ZA2JWO\\_M4dFc5zzT\\_AN5C9Ug](https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiHo7_Xt5_KAhUEvnIKHc--BeEQFgggMAE&url=http%3A%2F%2Fraidex.ru%2Ftechnology%2F&usg=AFQjC NF6g5ZA2JWO_M4dFc5zzT_AN5C9Ug)

45. Струйная цементация, цементация грунтов (jet grouting) [https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiHo7\\_Xt5\\_KAhUEvnIKHc--BeEQFggmMAI&url=http%3A%2F%2Fwww.geostroyhol.ru%2Fpages%2F23&usg=AFQjCNEvpVGWqznZxSYkeMymxwNJUxc3jQ](https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiHo7_Xt5_KAhUEvnIKHc--BeEQFggmMAI&url=http%3A%2F%2Fwww.geostroyhol.ru%2Fpages%2F23&usg=AFQjCNEvpVGWqznZxSYkeMymxwNJUxc3jQ)

46. Системы струйной цементации jet-1, jet-2, jet-3, особенности и отличия

[https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiHo7\\_Xt5\\_KAhUEvnIKHc--BeEQFggsMAM&url=http%3A%2F%2Fwww.anker-pk.ru%2Fpoleznoe%2Fzakreplenie\\_gruntov%2Fsistemy\\_struinoj\\_cementacii%2F&usg=AFQjCNH4RWYEqvG4wJImqD6sSOrR5\\_sKtw](https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiHo7_Xt5_KAhUEvnIKHc--BeEQFggsMAM&url=http%3A%2F%2Fwww.anker-pk.ru%2Fpoleznoe%2Fzakreplenie_gruntov%2Fsistemy_struinoj_cementacii%2F&usg=AFQjCNH4RWYEqvG4wJImqD6sSOrR5_sKtw)

[https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiHo7\\_Xt5\\_KAhUEvnIKHc--BeEQFggaMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.new-ground.ru%2Findex.html%3Fid%3D4%26eid%3D1&usg=AFQjCNFUtbU00lvJIWmVVaIYrAp6ziF5oQ&bvm=bv.111396085,d.bGQ](https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiHo7_Xt5_KAhUEvnIKHc--BeEQFggaMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.new-ground.ru%2Findex.html%3Fid%3D4%26eid%3D1&usg=AFQjCNFUtbU00lvJIWmVVaIYrAp6ziF5oQ&bvm=bv.111396085,d.bGQ)

48. А.Камбефор. Инъекция грунтов. Принципы и методы./Перевод с фр. Р.В.Казаковой и В.Б.Хейфица/. М., «Энергия», 1971, – 333 с.

49. Камбефор Г., Пуглис Р. Подъем здания с помощью инъекции раствора: Пер. с франц., 1971. – 23 с.

50. Коновалов П.А. Основания и фундаменты реконструируемых зданий. –М.: Стройиздат, 1988. – 287с.

51. Корн Г. и Корн Т. Справочник по математике. –М.: Наука, 1974. – 840 с.

52. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела. – М.: Мир, 1987. – 328 с.

53. ЛИРА. Версия 9.0. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций. Руководство пользователя. Книги 1...3. НИИАСС. Киев. 2002.

54. Малинин А.Г. Струйная цементация грунтов: Монография/А.Г. Малинин, 2007 – 168 с.

55. 24Методические рекомендации по проектированию и ведению работ при усилении оснований, фундаментов и несущих конструкций существующих зданий и сооружений инъекционными методами. – М.: А/ОБ “Восстановление”, 1997. –29 с.

56. Мономах. Программный комплекс проектирования ж/б многоэтажных каркасных зданий. Руководство пользователя. Разделы 1...9. НИИАСС. Киев. 2004.

57. Моркляник Б.В., А.В. Шаповал, Раед М. Абдулхуссейн, Шаповал В. Г. О формальном соответствии уравнений, описывающих напряженно – де-

формированное состояние упругой среды, обусловленное влиянием температуры и пучения. Форум гірників. Матеріали міжнародної конференції. Дніпропетровськ, 2015 – с. 155 – 158.

58. Немчинов Ю.И. Метод пространственных конечных элементов. Київ: НДІБК, 1995 – 368 с.

59. Никитенко М.И., Соболевский Д.Ю. Влияние инъекции цементного раствора в скважине на свойства окружающего песчаного грунта. – Основания, фундаменты и механика грунтов. – М., 1986, №3, с. 17-18.

60. Новацкий В. Теория упругости. – М.: Мир, 1975. – 872 с.

61. Осипов В.И., Филимонов С.Д. Уплотнение и армирование слабых грунтов методом “Геокомпозит”. В журнале ОФМГ, №5, 2002 г. с. 15-21.

62. Перельмутер, А.В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А.В. Перельмутер, В.И. Сливкер. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 600 с.

63. Петрухин В.П., Шишова И.А. Использование фильтрационных расчетов при проектировании инъекционных работ. Основания, фундаменты и механика грунтов. – М., 2001, №3, с. 12-15.

64. Писанко В.П., Нуждин М.Л. Уплотнение грунтового основания методом высоконапорного инъецирования с нагнетанием смесей по заданным траекториям. Сб.науч.тр.: “Реконструкция исторических городов и геотехническое строительство”. –С.-Петербург, 2003. –С. 361-364.

65. Пособие 1-93 к СНиП 2.02.03-85. Проектирование и устройство бурильно-инъекционных анкеров и свай. ГОССТРОЙ Республики Беларусь. Минсктишпроект, 1994.- 102 с.

66. Полищук А.И. Основы проектирования и устройства фундаментов реконструируемых зданий. – Нортхэмптон: STT; Томск, STT, 2004.-476 с.

67. Пособие к СНиП 3.02.01-85. НИИОСП им. Н. М. Герсевича. –М.: Стройиздат, 1986.–567 с.

68. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. –М.: Наука, 1979. – 744 с.

69. Руководство по проектированию и устройству фундаментов из буронабивных свай и опор – колонн. НИИСП Госстроя УССР. –К., 1991. –155 с.
70. Ржаницын Б. А. Химическое закрепление грунтов в строительстве. –М.: Стройиздат, 1986. –263 с.
71. Ржаницын Б.А. Фундаменты из закрепленного грунта. – В. Кн.: закрепление и уплотнение грунтов. –М.: Стройиздат, 1987.
72. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов — М.: Мир, 1979. - 392 С.
73. ДБН В.3.2-2-2009. Київ. Житлові будинки. Реконструкція та капітальний ремонт.. Мінрегіонбуд України. 2009 – 64 с.
74. Соколевский Ю.А., Гобст Л., Клайн К. И др. Интенсивные технологии фундаментостроения и подземного строительства в Белоруссии и проблемы механики грунтов. – Строительство и архитектура Белоруссии. – Мн., 1987, №3, с. 25-35.
75. Соколович В.Е., Мотузов Я.Я., Котов А.И. (НИИОСП). Закрепление илов цементом. В сб. Строительство на слабых водонасыщенных грунтах. – Одесса: Госстрой СССР, 1975. –С. 267-276.
76. Соколович В.Е., Химическое закрепление грунтов. М.: Стройиздат, 1980 – 120 с.
77. Сорочан Е.А., Быков В.И., Егоров А.И. Усиление грунтов основания, фундаментов и несущих конструкций аварийных зданий инъекционными методами – Основания, фундаменты и механика грунтов. – М., 2001, №1, с. 20-22
78. Тимошенко С.П., Гудьир Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
79. Томаш Михальськи. Применение технологии JET GROUTING в целях обеспечения устойчивости стен глубоких котлованов / Томаш Михальськи // Будівельні конструкції: міжвід. наук.-техн. зб. – К.: НДІБК, 2007. – Вип. 66. – С. 158 – 168. 5. Cesare Melegari. Introduction to the jet grouting Methods / Cesare Melegari // Seminar on jet grouting Singapore, 1997.



80. ТКП 45-5.01-45-2006 (02250). Фундаменты и подземные сооружения, возводимые с использованием струйной технологии. Правила проектирования у устройства. – Минстройархитектуры РБ. – Минск, 2006. – 33
81. Токин А.Н. Фундаменты из цементогрунта. –Москва: Стройиздат, 1984.
82. Устройство грунтобетонных свай. Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт организации, механизации и технической помощи строительству. –М.: Издательство литературы по строительству, 1968. –34 с.
83. Ухов С.Б. и др. механика грунтов, основания и фундаменты: учебник . – М.: ИЗД. АСВ, 1994. – 527 С.
84. Уорсинг А., Гэфнер Дж. Методы обработки экспериментальных данных. - М.: Изд-во иностранной лит., 1953. - 347 с.
85. Федоров Б. С., Смородинов М. И., Корольков В.Н., Сухарев С.Г. Струйная технология устройства несущих конструкций в грунте. Основания, фундаменты и механика грунтов. –№2. –1983. –19 с.
86. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галеркина.- М.: Мир, 1988- 352 с.
87. Флорин В.А. Основы механики грунтов, т.1. – Л. -М.: Госстройиздат, 1959. – 357 с.
88. Флорин В.А. Основы механики грунтов, т. 2. – Л.-М.: Госстройиздат, 1961. – 543 с.
89. В.Г. Фокин. Метод конечных элементов в механике деформируемого твёрдого тела: Учеб. пособие /. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 131 с.: ил.
90. Хильмер Клаус. Повреждения подземных конструкций /Перевод с немецкого: Марков А.И., Запорожье: ООО «ИПО «Запорижжя», ООО «Настрой», 2009. -408 с.
91. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц:- М.: Мир, 1987.- 640 с.

92. Чжао Маоцай. Усиление грунтов основания автодорожного полотна второго кольца в г. Харбин инъекционным методом. В сб. Реконструкция исторических городов и геотехническое строительство. Том. 2. С.Петербург. изд-во АСВ, 2002 г., с.155-158. (уточнить сборник).

93. Шадунц К.Ш., Ляшенко П.А., Раменский В.В. В зб. Армування ґрунтового масиву при будівництві, реконструкції, захисту будівель та споруд. Вип.. 55., Київ, НДІБК, 2001, с. 185-189.

94. Шаповал. А.В. К вопросу определения размеров породного массива при совместной схеме расчета конструкций на грунтовом основании. Форум гірників. Матеріали міжнародної конференції. Дніпропетровськ, 2015 – с. 164 – 167.

95. Шаповал А.В., Шаповал В.Г. Теория взаимосвязанной фильтрационной консолидации: Монография.–Днепропетровск: Пороги, 2009. –311 с.

96. Шаповал А.В. Шаповал В.Г., Марченко В.І. Прогнозування осідань армованих основ зерносовищ у часі з урахуванням механічних і реологічних властивостей ґрунту//Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)/ Полтавський національний університет ім. Ю. Кондратюка. – Вип. 4 (34), т.2.-Полтава: ПолтНТУ, 2012.-С. 202-209.

97. А.В. Шаповал, Е.В. Нестерова,В.Г. Шаповал, Бойко И.Л., Раед М. Абдулхуссейн. К вопросу точности определения напряженно – деформированного состояния строительных конструкций на грунтовом основании с использованием техники конечных элементов // Основы та фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник. – Вип. 37. – Киев: КНУБА, 2015. – С.138 – 144.

98. Шаповал В.Г. Общее решение динамической задачи теории взаимосвязанной фильтрационной консолидации при осевой симметрии // II Украинская научно-техническая конференция по механике грунтов и фундаментостроению. – Полтава, 1995. – С. 14-16.

99. Шаповал В.Г. Уравнения движения водонасыщенного анизотропного грунта // Theoretical Foundations in Civil Engineering N4. Volume 1. Part 2 – Warsaw, 1996. – С. 326-331.

100. Шаповал В.Г., Седин В.Л., Шаповал А.В., Моркляник Б.В., Андреев В.С. Механика грунтов. Учебник. Днепропетровск: Пороги, 2010- 168 с.

101. Швец В.Б. и др. Справочник по механике и динамике грунтов. –К.: Будивельник, 1987. – 232 с.

102. Яценко Е.А. Ползучесть бетона и железобетонных конструкций: Конспект лекций. - Днепропетровск: ДИИТ, 1978. - 80 с.

103. Яценко Е.А., Слободянюк С. А. Теория длительной прочности и устойчивости стержневых железобетонных систем с учетом ползучести бетона. - Днепропетровск: ПДАБтаА, «Пороги», 2002. - 250 с.

104. Vermeer, P.A. & H. van Langen 1989. Soil collapse computations with finite elements. *Ingenieur-Archiv* 59:221-236. Моделирование разрушения грунта методом конечных элементов