

**РОЗРАХУНКИ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ І  
ТЕХНОЛОГІЯ ЗАКРІПЛЕННЯ  
ОСНОВ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

*НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК*

**Частина 2**

**Харків 2012**



УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

**РОЗРАХУНКИ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ І  
ТЕХНОЛОГІЯ ЗАКРІПЛЕННЯ  
ОСНОВ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

*НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК*

**Частина 2**

**За редакцією професора А.М.Плугіна**

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки, молоді та спорту  
України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних  
закладів, які навчаються за спеціальностями «Промислове та  
цивільне будівництво» та «Залізничні споруди та колійне  
господарство»*

**Харків 2012**

УДК 624.15

ББК 39.112

Р 64

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за спеціальностями «Промислове та цивільне будівництво» та «Залізничні споруди та колійне господарство»  
(№ 1/11-5170 від 17.04.12 р.).*

**Авторський колектив:**

А.М. Плугін, А.А. Плугін, Л.В. Трикоз,  
О.С. Саяпін, О.С. Герасименко, О.А. Плугін

**Рецензенти:**

професори О.Г. Вандоловський (ХДТУБА),  
А.Г. Молодченко (ХНАМГ)

Розрахунки несучої здатності і технологія закріплення  
Р 64 основ будівель і споруд залізничного транспорту:  
Навч.

посібник / А.М. Плугін, А.А. Плугін, Л.В. Трикоз та ін.; За  
ред. А.М. Плугіна. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – Ч. 2. – 274 с.  
ISBN 978-966-2033-89-2

У навчальному посібнику розглядаються теоретичні та прикладні основи механіки ґрунтів, основ та фундаментів, наведено необхідний матеріал, у т. ч. довідковий, для курсового проектування та виконання дипломного проекту з реконструкції і ремонту будівель і споруд на слабких або з високим рівнем ґрунтових вод основах з відповідними розділами зі зміцнення основ і фундаментів будівель або споруд. У посібнику містяться також приклади розрахунків основ і фундаментів у вказаних умовах, а також технології робіт з підсилення основ та фундаментів.

Посібник призначено для студентів, які навчаються за спеціальностями 7.06010101, 8.06010101 «Промислове та цивільне будівництво» і 7.07010801, 8.07010801 «Залізничні споруди та колійне господарство», а також за спеціалізаціями експлуатаційної спрямованості при цих спеціальностях.

УДК 624.15  
ББК 39.112

**Навчальний посібник**

Плугін Аркадій Миколайович,  
Плугін Андрій Аркадійович,  
Трикоз Людмила Вікторівна та ін.

**РОЗРАХУНКИ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ І  
ТЕХНОЛОГІЯ ЗАКРІПЛЕННЯ  
ОСНОВ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

Частина 2

Відповідальний за випуск Трикоз Л.В.

Редактор Ібрагімова Н.В.

---

Підписано до друку 12.04.11 р.

Формат паперу 60x84 1/16 . Папір писальний.

Умовн.-друкарк. 10,25. Тираж 300. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту  
61050, Харків - 50, майдан Фейербаха, 7  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

**ISBN 978-966-2033-89-2**

© Українська державна академія  
залізничного транспорту, 2012.

Міністерство інфраструктури України  
Українська державна академія залізничного транспорту

А.М. Пługін, А.А. Пługін, Л.В. Трикоз,  
О.С. Саяпін, О.С. Герасименко, О.А. Пługін

**РОЗРАХУНКИ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ І ТЕХНОЛОГІЯ  
ЗАКРІПЛЕННЯ ОСНОВ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

Навчальний посібник

**За редакцією професора А.М.Пługіна**

Частина 2

Харків 2011



УДК 624.15(075.8)

Розрахунки несучої здатності і технологія закріплення основ будівель і споруд залізничного транспорту [текст]: навч. посібник / А.М. Плугін, А.А. Плугін, Л.В. Трикоз та ін.; за ред. А.М. Плуґіна. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Ч. 2. – 210 с.

ISBN

У навчальному посібнику розглядаються теоретичні та прикладні основи механіки ґрунтів, основ та фундаментів, наведено необхідний матеріал, у т. ч. довідковий, для курсового проектування та виконання дипломного проекту з реконструкції і ремонту будівель і споруд на слабких або з високим рівнем ґрунтових вод основах з відповідними розділами зі зміцнення основ і фундаментів будівель або споруд. У посібнику містяться також приклади розрахунків основ і фундаментів у вказаних умовах, а також технології робіт з підсилення основ та фундаментів.

Посібник призначено для студентів, які навчаються за спеціальностями 7.06010101, 8. 06010101 «Промислове та цивільне будівництво» і 7.07010801, 8. 07010801 «Залізничні споруди та колійне господарство», а також за спеціалізаціями експлуатаційної спрямованості при цих спеціальностях.

Іл. 135, табл. 16, бібліогр.: 36 назв.

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України  
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів*

Рецензенти:

професори О.Г. Вандоловський (ХДТУБА),  
А.Г. Молодченко (ХНАМГ)

□ Українська державна академія  
залізничного транспорту, 2011  
□ А.М. Плугін, А.А. Плугін,  
Л.В. Трикоз, О.С. Саяпін, О.С.  
Герасименко, О.А. Плуґін, 2011

# ЗМІСТ

ВСТУП .....	5
1. ЗМІЦНЕННЯ ТА УЩІЛЬНЕННЯ СЛАБКИХ ҐРУНТІВ ОСНОВ .....	6
1.1. Властивості й структура слабких ґрунтів .....	6
1.1.1. Поширеність слабких ґрунтів в Україні .....	6
1.1.2. Існуючі уявлення про структуру, явища, процеси і взаємодії в слабких ґрунтах .....	6
1.1.3. Особливості слабких ґрунтів .....	9
1.1.4. Форма мінеральних зерен і уламків глинистої складової слабких ґрунтів .....	11
1.1.5. Електроповерхневі властивості глинистої складової слабких ґрунтів .....	12
1.1.6. Вода як елемент структури слабких ґрунтів і рідкого скла	14
1.2. Ущільнення і зміцнення ґрунтів .....	20
1.2.1. Конструктивні способи поліпшення властивостей ґрунтів .....	21
1.2.2. Способи ущільнення ґрунтів .....	23
1.2.3. Способи закріплення ґрунтів .....	28
1.2.4. Способи зменшення водопроникності ґрунтів .....	36
1.3. Існуючий досвід ущільнення та закріплення слабких ґрунтів хімічними способами .....	36
1.3.1. Історія розвитку способів хімічного закріплення ґрунтів .	36
1.3.2. Границі застосування хімічних способів закріплення ґрунтів .	43
1.4. Фізико-хімічні основи способів закріплення ґрунтів .....	46
1.4.1. Закріплення й ущільнення тріщинуватих скельних, гравійно-галькових ґрунтів і крупнозернистих пісків .....	46
1.4.2. Закріплення піщаних ґрунтів .	50

.....	
1.4.3. Закріплення лесових ґрунтів .....	61
1.4.4. Закріплення глинистих ґрунтів .....	
..	64
1.5. Сутність ін'єкційного процесу .....	78
...	
1.5.1. Загальні відомості .	78
.....	
1.5.2. Форма закріплення в однорідному ґрунті .....	82
.	
1.5.3. Форма закріплення в неоднорідному ґрунті .	84
.....	
1.5.4. Радіус закріплення	87
.....	
1.5.5. Параметри і технологія нагнітання	92
.....	
1.6. Підвищення ефективності зміцнення слабких ґрунтів	97
.....	
1.6.1. Рідке скло та його недоліки для закріплення слабких ґрунтів .	97
1.6.2. Теоретичні основи підвищення ефективності зміцнення слабких ґрунтів силікатними розчинами на основі рідкого скла	99
.....	
1.6.3. Модель пористої структури вологих і водонасичених слабких ґрунтів і рідкого скла	109
.....	
1.6.4. Електрокінетичні явища і механізм проникної здатності рідкого скла в дрібні і пилюваті піски .....	111
..	
1.6.5. Реологічні властивості рідкого скла .....	116
..	
1.7. Модифікований силікатний розчин оптимального складу для закріплення слабких ґрунтів	118
.....	
1.7.1. Обґрунтування можливості зміцнення рідкого скла і надання йому гідравлічних властивостей	118
.....	
1.7.2. Визначення оптимального складу модифікованого силікатного розчину з добавкою суперпластифікатора нафталінформальдегідного типу.....	119
..	
<b>2. ПРОЕКТУВАННЯ ЗАКРІПЛЕННЯ</b>	
<b>ҐРУНТІВ .....</b>	<b>126</b>
2.1. Вихідні дані для складання проекту .....	126

..	2.1.1. Інженерно-геологічні та гідрогеологічні обстеження ділянки робіт, загальні положення за проектом .....	126
.	2.1.2. Лабораторні дослідження. ....	127
...	2.2. Склад проекту. ....	139
.....	2.3. Дослідно-виробничі роботи .....	141
.....	2.4. Проект проведення робіт .....	142
.....	2.5. Контроль якості закріплення .....	147
...	2.6. Устаткування і механізація проведення робіт .....	150
.	2.6.1. Основна схема технології проведення робіт .....	150
.	2.6.2. Ін'єктори .....	151
.....	2.6.3. Регулююча мережа .....	154
.....	2.6.4. Насосне устаткування .....	154
.....	2.6.5. Забивання і видалення ін'єкторів. ....	155
..	2.6.6. Приготування розчинів .....	156
.....	3. ПРИКЛАДИ ЗАКРІПЛЕННЯ ҐРУНТІВ У БУДІВНИЦТВІ. ....	158
.....	3.1. Застосування хімічного закріплення ґрунтів у будівництві .....	158
.....	3.1.1. Закріплення ґрунтів під фундаментами .....	158
.....	3.1.2. Проходка підземних виробок і розкриття котлованів .....	200
.....	3.1.3. Улаштування водонепроникних завіс .....	211
.....	3.2. Хімічне закріплення ґрунтів за кордоном .....	218
.....	3.3. Застосування високонапірної ін'єкції .....	230
..	3.4. Застосування струминної технології зміцнення основ .....	236
.....	3.4.1. Досвід виробництва робіт .....	236

.....	
3.4.2. Сутність технології проведення робіт .....	238
..	
3.4.3. Існуючі форми ґрунтоцементних масивів.....	241
4. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДСИЛЕННЯ ФУНДАМЕНТІВ.....	243
4.1. Удосконалені традиційні способи .....	243
...	
4.2. Способи струминної технології і високонапірної ін'єкції .....	250
.....	
4.3. Способи підсилення фундаментів за допомогою буроін'єкційних паль .....	256
.....	
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	271
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК .....	274
.....	

## ВСТУП

Великий обсяг сучасної реконструкції будівель (надбудова, прибудова, зміна призначення з перебудовою), а також проведення робіт у вже забудованих територіях вимагає від спеціалістів знань та умінь враховувати вплив змінення умов експлуатації будівель, пов'язаних як із зміною природних чинників, так і з діяльністю людини. Більша частина території України знаходиться в складних для будівництва та утримання ґрунтових умовах – залягання слабких нестійких ґрунтів на великих територіях. Створення фундаментів, вертикальних стін, склепінь і протифільтраційних завіс без розкриття поверхні ґрунту забезпечує вирішення складних завдань у фундаментобудуванні, підземному, гірничому і гідротехнічному будівництві. Виходячи з викладеного метою посібника є надання спеціальних знань і практичних навичок з розрахунку і підсилення основ і фундаментів як нових, так і тих, що реконструюються або ремонтуються. Дане видання містить лекційний матеріал з дисципліни «Механіка ґрунтів, основи та фундаменти», доповнює і роз'яснює його, а також використовується при виконанні індивідуальних завдань. Студенти заочної форми навчання зможуть використовувати матеріал для самостійного виконання розділів курсового або дипломного проекту.

Значна частина посібника відводиться розгляду практичних прикладів сучасних технологій підсилення фундаментів: струминної технології, високонапірного ін'єктування, улаштування буроін'єкційних паль. Докладно розглянуто існуючі способи ущільнення та зміцнення основ, проаналізовано їх недоліки і переваги, окреслено галузь

застосування кожного з них. Розглядається досить широкий спектр будівель та споруд, які піддаються реконструкції: пам'ятники архітектури, житлові будинки, стояни моста, ліквідація обдимання земляного полотна, будівництво метрополітенів та проходка колекторів. Наведені в посібнику відомості ґрунтуються на діючих нормативах, результатах власних досліджень авторів та їх співробітників, а також містять результати глибокого аналізу наукової, довідкової і рекламної інформації про нові матеріали і технології, у тому числі інших країн. Наведено склад проекту із закріплення ґрунтів, проект виробництва робіт, розглянуто питання контролю якості, надано перелік основного устаткування й обладнання.

Наведений у навчальному посібнику матеріал може бути використаний під час курсового проектування з дисципліни «Механіка ґрунтів, основи та фундаменти», а також при проектуванні закріплення або підсилення основ і фундаментів у рамках дисциплін «Відновлення експлуатаційних властивостей та захист конструкцій і споруд», «Підсилення будівельних конструкцій» і під час дипломного проектування.

## **1. ЗМІЦНЕННЯ ТА УЩІЛЬНЕННЯ СЛАБКИХ ҐРУНТІВ ОСНОВ**

### **1.1. Властивості й структура слабких ґрунтів**

#### **1.1.1. Поширеність слабких ґрунтів в Україні**

Значна частина території України характеризується складними ґрунтовими умовами, які ускладнюють виконання одного з найважливіших завдань будівництва й утримання будівель та споруд - забезпечення їх надійності та довговічності. Складність ґрунтових умов полягає в розповсюдженості слабких нестійких ґрунтів на великих територіях. До слабких або структурно-нестійких ґрунтів відносять ґрунти, які при додаткових зовнішніх діях корінним чином змінюють свою структуру і зумовлюють розвиток значних деформацій. Порушення структури в цих ґрунтах виникає при фізичних або механічних діях. До фізичних дій відносять зволоження, вивітрювання, замерзання та відтавання. Структурно-нестійкими ґрунтами є слабкі глинисті, лесові та лесоподібні просадні сильно стисливі, набухаючі, а на значній території сусідньої Росії - ще й вічно мерзлі. Всі ці ґрунти легко деформуються, що призводить

до великих осідань будівель та споруд і викликає додаткові витрати на їх утримання і посилення.

### ***1.1.2. Існуючі уявлення про структуру, явища, процеси і взаємодії в слабких ґрунтах***

Під структурою нескельних ґрунтів розуміється наявність мінеральних частинок (структурних елементів), відносний їх розподіл у просторі і взаємодії між частинками, які називаються структурними зв'язками або силами зчеплення. Формування початкової структури ґрунту визначається протидією між гравітаційними силами (силами тяжіння) і структурними зв'язками між частинками. Гравітаційні сили визначаються розмірами частинок - вони тим більші, чим крупніші частинки. У крупних частинок гравітаційні сили перевищують сили зчеплення. У дуже дрібних частинок переважають структурні зв'язки між ними. У свою чергу вони залежать від природи взаємодій між частинками. Залежно від того, які сили переважають при формуванні породи, утворюються роздільнозернисті або агрегатні структури ґрунту.

Структурні зв'язки поділяють на первинні, які виникають одночасно з утворенням породи (наприклад, зв'язки магматичних і осадкових кристалічних порід), і вторинні, які виникають під впливом процесів діагенезу породи (ущільнення, перекристалізації, цементації). Стосовно нескельних ґрунтів, що розглядаються у даному посібнику, далі розуміються вторинні структурні зв'язки.

За механічними властивостями, що визначають поведінку ґрунтів під навантаженнями, зв'язки поділяють на в'язко-пластичні, жорсткі і жорстко-пластичні. В'язко-пластичні зв'язки властиві пухким ґрунтам з агрегатною структурою, тобто глинистим. Вони мають електрохімічну природу. Їх розглядають як водно-колоїдні системи у вигляді плівок у прошарках між контактами крупніших частинок.

Водно-колоїдний зв'язок можна уявити у вигляді коагеля, що складається з дисперсної фази (мінеральних частинок колоїдних розмірів) і дисперсійного середовища (плівок зв'язаної води) і має мікроагрегатну структуру, як це схематично наведено

на рис. 1.1, *а*. Фізичний стан і механічні властивості такого зв'язку визначаються складним комплексом взаємопов'язаних електромагнітних і фізико-хімічних чинників, міра впливу яких змінюється зі зміною товщини плівки води. Чим тонші ці плівки, тим вища їх в'язкість, тобто тим міцнішим є водно-колоїдний зв'язок.

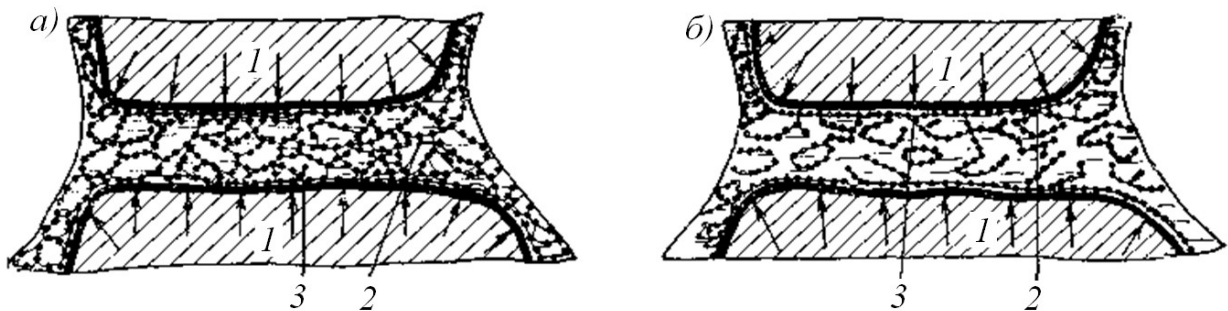


Рис. 1.1. Модель водно-колоїдного зв'язку гелю (*а*) і золю (*б*):  
1 – мінеральні частинки; 2 – мікрокаркас; 3 – зв'язана вода

В'язкі водно-колоїдні зв'язки зберігають свої типові риси в межах широкого діапазону змінення фізико-хімічного стану водно-колоїдної системи, яка створює дані зв'язки. Вони додають ґрунтам властивості зв'язності, здатності до пластичних змін форми, властивості в'язкої текучості при незмінній деформуючій силі та ін. Змінюючи склад іонів у дифузному шарі частинок у напрямі підвищення їх валентності, можна штучно зменшити товщину міжконтактних плівок і тим самим підвищити їх міцність. Цим явищем користуються в сучасній практиці фундаментобудування для електрохімічного закріплення ґрунтів.

При руйнуванні такого зв'язку руйнується мікроструктура коагелю, колоїдна система перетворюється на гідрозоль (рис. 1.1, *б*), втрачаючи при цьому частку жорсткості (міцності). Після припинення деформації руйнування водно-колоїдна система зв'язку відновлюється, переходячи знову із золю в гель, але з втратою міцності, придбаною зв'язком під впливом процесів діагенезу. Перехід колоїдної системи із золю в гель і назад називається тиксотропією.

Виниклі на початку формування структури ґрунту водно-колоїдні зв'язки у вигляді еластичних драглів під дією процесів діагенезу змінюються, підвищуючи з часом свою жорсткість (міцність). Підвищення жорсткості пов'язане зі зменшенням



товщини водно-колоїдних плівок у зонах між частинками по мірі ущільнення породи під вагою наростаючих відкладень мінерального матеріалу. З обезводненням плівок пов'язано старіння колоїдних систем, у результаті якого зв'язки втрачають будь-які властивості та набувають жорсткості. За даними академіка Ф.У. Чухрова, при вологості 94,0–97,3 % гель кремнезему має вигляд желе і тремтить при струсі, а при вологості 74,2 % вже стирається на порошок. Крім того, із зменшенням товщини плівок води підвищується концентрація колоїдів і солей, унаслідок чого виникають процеси перекристалізації аморфної і кристалічної фаз колоїдних систем. Процес старіння може супроводжуватися незалежним процесом кристалізації зв'язків у контактах між частинками різних солей, що відкладаються циркулюючими поровими водами. У результаті цих змін в'язкі зв'язки стають жорсткими і міцнішими; після руйнування такий зв'язок не відновлюється. Ці зв'язки типові для напівскельних глинистих ґрунтів, таких як аргіліти, алевроліти, мергелі. Таким чином, водно-колоїдні зв'язки залежно від фізичного стану можуть надавати ґрунту властивості в'язко-текучого, пластичного і твердого тіла.

У ґрунтах з роздільно-зернистою структурою (таких як піски, гравіюваті, галечні і тому подібні ґрунти) жорсткі зв'язки утворюються в результаті цементації контактів між частинками, які виникають при випаданні з води, циркулюючої в порах, кремнеземних, залізистих, вапняних, глинистих та інших цементів. У цьому випадку відбувається зрощення мінералів під впливом хімічних чинників, тобто виникають кристалізаційні структурні зв'язки, типові для пісковиків, брекчій, конгломератів і тому подібних ґрунтів. Міцність ґрунтів з кристалізаційними зв'язками визначається міцністю цементів. Найміцнішими з перерахованих є ґрунти з кремнеземним і залізистим цементами, а найбільш слабкими – з глинистим і вапняним. За ознаками міцності їх відносять до скельних або напівскельних ґрунтів.

Жорстко-пластичні зв'язки - це зв'язки, обумовлені тільки тертям між безпосередньо контактуючими мінеральними частинками незцементованих ґрунтів з роздільно-зернистою структурою. Як показано вище, причиною їх виникнення є гравітаційні сили. Якісно ці зв'язки не змінюються.

Внаслідок більш високої деформівності і малої міцності структурних зв'язків порівняно з деформівністю та міцністю мінеральних частинок механічні властивості несучого структурного каркаса механічної системи ґрунтів фактично повністю визначаються механічними властивостями структурних зв'язків.

### **1.1.3. Особливості слабких ґрунтів**

Зведення споруд на пісках і глинах пов'язане з неминучим порушенням їх структури, осіданням і навіть просіданням. Порушення структури слабких ґрунтів виникає при фізичних чинниках або механічних навантаженнях. Піщані слабкі ґрунти, як правило, містять і глинисті складові, які сильно послаблюють навіть закріплені ґрунти у вологих і обводнених умовах. Крім того, навіть незначний вміст глини в піску (2 %) знижує проникну здатність різних зміцнюючих речовин, у т. ч. рідкого скла. Це зумовило розгляд у даному розділі структури і властивостей глинистих ґрунтів.

Поведінка слабких ґрунтів ґрунтується на законах реології структурованих дисперсних систем. Головними характеристиками при цьому є динамічна в'язкість і міцність зсуву. Значний вплив на міцнісні властивості ґрунтів має їх сорбційна здатність. Найбільшу сорбційну здатність мають глинисті складові ґрунтів. З урахуванням цього величина сорбційної ємності піщаних ґрунтів визначається вмістом глини. Якщо кількість глини менша 2 %, явищем сорбції при оцінці його впливу на ефективність закріплення можна нехтувати. У піщаних ґрунтах із вмістом глини понад 10 %, а також за наявності глинистих плівок, у мінеральному складі яких переважає монтморилоніт, явище сорбції призводить до зменшення радіуса нагнітання з відповідним зменшенням міцності закріплення. У сухому стані зв'язні ґрунти мають значну механічну міцність, із зростанням вологості міцність зменшується, а при великому вмісті води ґрунт може перейти в текучий стан.

До глинистих належать ґрунти, в яких вміст глинистих частинок перевищує 3 %. Вони мають пластичні властивості і здібність до набухання у воді. За петрографічним складом

глинисті ґрунти поділяються на глини, суглинки і супіски. У глин вміст глинистих частинок перевищує 30 %, у суглинків становить 10 ÷ 30 %, у супісків – 3 ÷ 10 %.

Відмінність у розмірах і формі частинок піску і глини значно впливає на властивості цих ґрунтів, що пов'язано з наявністю в глинах колоїдних ( $d < 2\mu$ ) частинок, які мають відповідні колоїдні властивості. Сумарна поверхня частинок піску, як правило, набагато менша, ніж глини. Так, в 1 м<sup>3</sup> піску з діаметром частинок 1 мм площа поверхні зерен дорівнює 400 м<sup>2</sup>, а в 1 м<sup>3</sup> глини з частинками розміром 0,001 мм (1 мкм) площа поверхні досягає 400000 м<sup>2</sup>. Чим вища сумарна площа поверхні ґрунтів, тим вище їх водопотреба (вологоемність).

Визначальне значення на властивості глин і глинистих мінералів має також їх мінералогічний склад за групами мінералів: монтморилонітова, ілітова, каолінітова. Глини, що містять монтморилоніт, менш водопроникні, але набухають і легко сповзають, за що їх іноді називають зсувними глинами. Глини, що містять каолініт, набухають менше, але більш водопроникні. Глини, що містять іліт, мають проміжні властивості.

Структура глин є складною. Глинисті частинки можуть коагулювати, особливо мінерали монтморилонітової групи, утворюючи складні агрегати. Агрегати потім з'єднуються в крупніші асоціації, утворюючи глинисту породу визначеної структури. Іноді спостерігається зворотний процес – розпад агрегатів (пептизація).

Структура пісків залежить від їх пористості (межі пористості 25,95 ÷ 47,64 %), а також від наявності глинистих частинок у них. Пісок, позбавлений структурних зв'язків (за рахунок відсутності глинистих частинок), знаходиться у сипкому або текучому стані, а при зволоженні – у перехідному стані (спостерігається невелика зв'язність частинок). Глинисті частинки заповнюють тонкі пори між частинками піску, покривають тонкими плівками поверхню піщаних і пилуватих частинок або їх мікро- та макроагрегатів і цементують їх, додаючи їм більшої або меншої зв'язності. Чистої (рафінованої) поверхні частинок, не покритих плівкою глинистих або колоїдних речовин, у ґрунтах не буває. Навіть незначна кількість

глини на поверхні частинок піску додає йому колоїдних властивостей глин.

#### **1.1.4. Форма мінеральних зерен і уламків глинистої складової слабких ґрунтів**

Під формою мінеральних зерен і уламків розуміється їх зовнішній вигляд (габітус). Форма глинистих частинок визначається особливостями їх кристалохімічної будови. Глинисті частинки мають цілком певну форму. Так, частинки каолініту під електронним мікроскопом мають шестигранну форму з чіткими контурами (рис. 1.2). Частинки монтморилоніту видно не як окремі частинки, а як їх агрегати з нечіткими краями (рис. 1.3). Частинки характерної форми утворюють і решту глинистих мінералів – галуазіт (рис. 1.4), палігорскіт (рис. 1.5) і т. п.

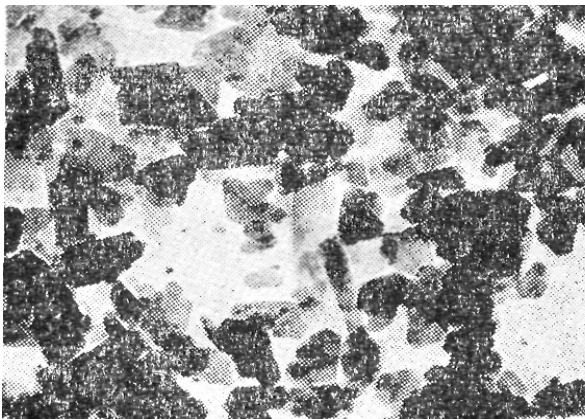


Рис. 1.2. Загальний вигляд частинок каолініту під електронним мікроскопом

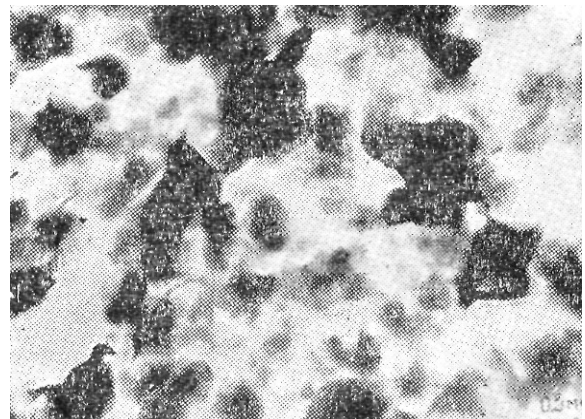


Рис. 1.3. Загальний вигляд частинок монтморилоніту під електронним мікроскопом

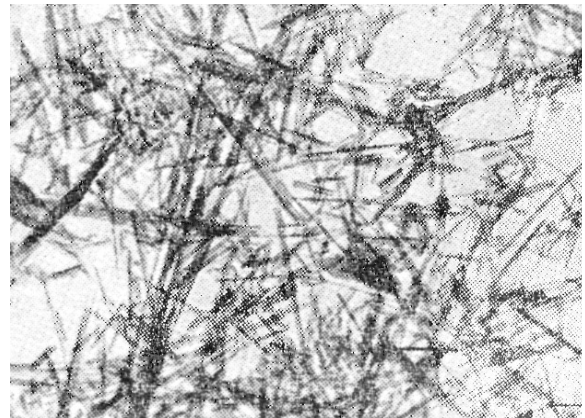


Рис. 1.4. Загальний вигляд галуазіту під електронним мікроскопом

Рис. 1.5. Загальний вигляд палігорскіту під електронним мікроскопом

### 1.1.5. Електроповерхневі властивості глинистої складової слабких ґрунтів

Глина має властивості колоїдних систем з електрично зарядженими частинками в розчинах. На рис. 1.6 схематично зображена колоїдна частинка в оточенні дисперсійного середовища, у даному випадку води, що містить іони  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $[\text{SO}_4]^{2-}$  та інші, що звичайно зустрічаються в ґрунтових водах, які містять ту або іншу кількість розчинених солей.

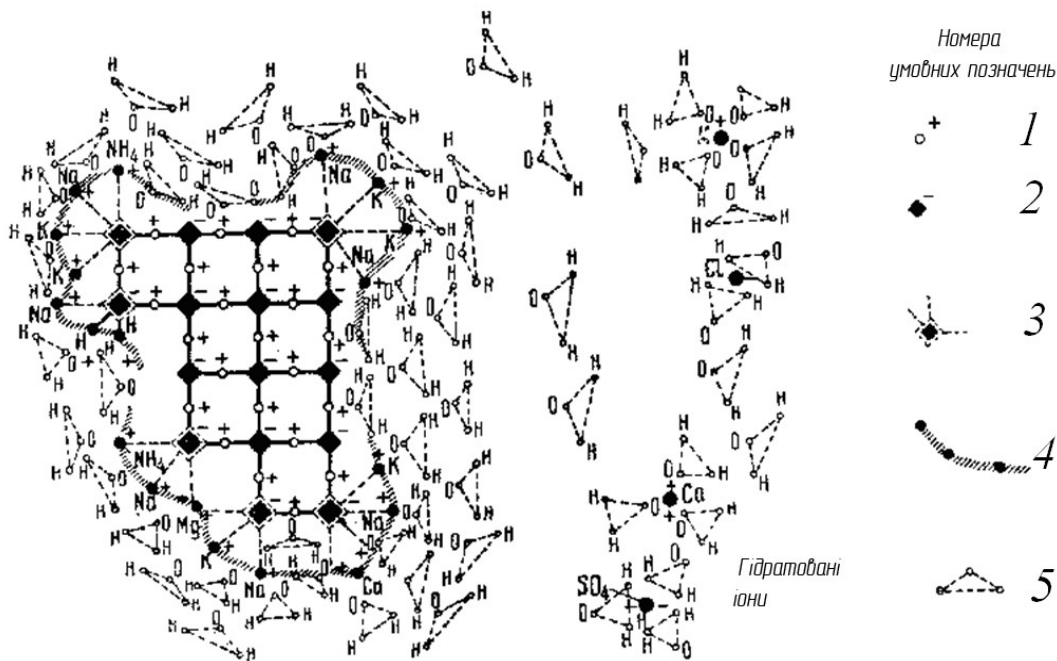


Рис. 1.6. Схема дисперсної фази у водному середовищі, що містить електроліти:

- 1, 2 – катіони та аніони у кристалічній структурі дисперсної фази;
- 3 – виступаючі на кутах аніони з ненасиченими валентностями;
- 4 – адсорбовані катіони іонного рою; 5 – диполі  $\text{H}_2\text{O}$  (частково деформовані)

Сама дисперсна частинка показана у вигляді кристалічної фази, в якій в кутових точках повинна мати місце неповна насиченість валентностями. Отже, біля цих виступів

накопичуватимуться адсорбовані іони, у нашому випадку катіони  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , що формують щільну і дифузну частини подвійного електричного шару (ПЕШ). Виступаючі аніони впливають не тільки на іони, що знаходяться в розчині, але і на дипольні молекули води, що орієнтуються у напрямку їх поля (рис. 1.6). Навколо дисперсної частинки встановлюється рій іонів і орієнтованих молекул  $\text{H}_2\text{O}$ . Товщина водної оболонки залежить від виду гідратованих катіонів у дифузній частині ПЕШ, що утримують молекули  $\text{H}_2\text{O}$ . Найсильніше гідратуються катіони лужних металів. Так, іон  $\text{Na}^+$  у водному середовищі утримує  $60 \div 70$  орієнтованих молекул  $\text{H}_2\text{O}$ , тоді як  $\text{Ca}^{2+}$  – лише до 14 молекул. Орієнтування молекул води навколо гідратованих аніонів  $\text{Cl}^-$ ,  $[\text{SO}_4]^{2-}$  та ін. протилежна тій, яка має місце для катіонів (рис. 1.6).

#### **1.1.6. Вода як елемент структури слабких ґрунтів і рідкого скла**

Властивості дисперсійного середовища (води) у високодисперсних системах, якими є слабкі, особливо глинисті, ґрунти, не є однорідними. Залежно від відстані до поверхні частинок вода може бути міцнозв'язаною (гігроскопічною), пухкозв'язаною (фізико-хімічнозв'язаною), вільною (гравітаційною і капілярною). Чим ближче шар до частинки, тим з більшою силою він утримується під дією молекулярних сил. Особливо багато такої води міститься в глинистих породах (рис. 1.7).

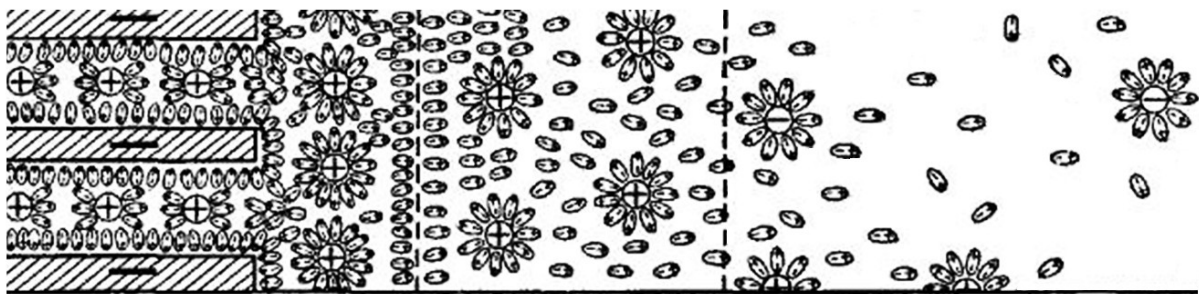


Рис. 1.7. Схема розподілу зв'язаної води біля частинки монтморилоніту

Зв'язана вода відрізняється від вільної. Її середня густина знаходиться в межах  $1,2 \div 1,4 \text{ г/см}^3$ . Зв'язану воду поділяють на

міцнозв'язану і пухкозв'язану. Це добре видно за експериментальною залежністю вологості ґрунтів, що містять тільки зв'язану воду, від тиску на ці ґрунти (рис. 1.8). Згідно з цією залежністю, зі збільшенням тиску вологість ґрунтів зменшується, але лише до значення, що дорівнює 200 ÷ 500 атмосфер, і далі змінюється потрохи аж до тиску в декілька тисяч атмосфер. Це свідчить про те, що частина зв'язаної води (до вологості 8 ÷ 13 %) є «міцнозв'язаною водою», а частина зв'язаної води, яка відносно легко видаляється із ґрунту під тиском, – «пухкозв'язаною» (фізико-хімічно зв'язаною, за термінологією фізико-хімічної механіки).

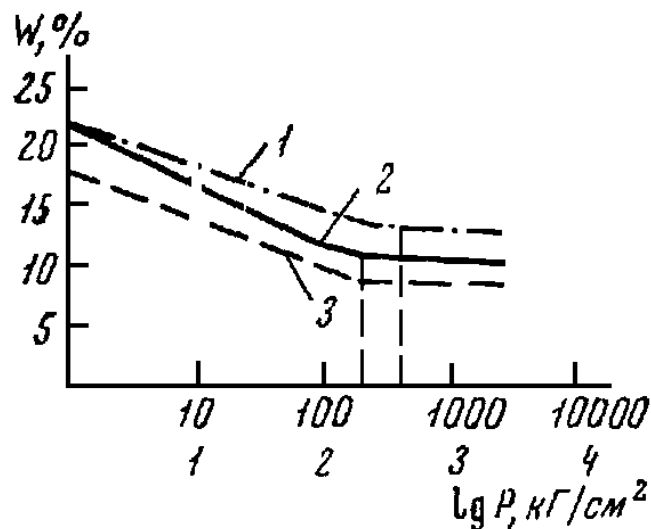


Рис. 1.8. Зміна вологості ґрунтів при збільшенні діючого на них тиску:  
 1 – глина полімінерального складу; 2 – каолінова глина;  
 3 – середній полімінеральний суглинок

**Міцнозв'язана вода.** Максимальна кількість міцнозв'язаної води в ґрунтах приблизно відповідає величині максимальної гігроскопічності ( $W_{\text{мг}}$ ), або вологості ґрунту, яка утворюється при адсорбції частинками глини пароподібної води. Тому синонімами терміну «міцнозв'язана вода» є «гігроскопічна» і «адсорбційна» вода. Щільність міцнозв'язаної води складає, за даними різних дослідників, 1,2 ÷ 2,4 г/см<sup>3</sup> (у середньому 2 г/см<sup>3</sup>). Вона характеризується значними в'язкістю, пружністю, міцністю на

зсув, низькою діелектричною проникністю ( $\varepsilon = 2 \div 2,2$ , тоді як у вільної води  $\varepsilon = 81$ ) і температурою замерзання  $T = -78$  °С.

Особливо великий вплив на вміст міцнозв'язаної води виявляє мінералогічний склад ґрунтів. Так, величина максимальної гігроскопічності частинок кварцу розміром менше 1 мкм складає 9 %. Монтморилонітові глини можуть мати гігроскопічну вологість 20 %, а гігроскопічність каолінітових глин – менше 1 %. Користуючись вказаними даними, визначимо товщину шарів міцнозв'язаної води на глинистих частинках  $\delta$  за формулою

$$\delta = \frac{M \cdot W}{S} \left( \frac{\varepsilon \cdot \frac{\text{см}^3}{\text{см}^2}}{\frac{\varepsilon}{\text{см}^2}} = \text{см} \right), \quad (1.1)$$

де  $M$  – маса ґрунту;

$W$  – вологість ґрунту;

$S$  – площа поверхні ґрунту.

Прийнявши для спрощення частинку сферичної форми, отримаємо

$$\delta = \frac{M \cdot W}{M \cdot s_{num}} = \frac{W}{s_{num}}. \quad (1.2)$$

Питому поверхню  $s_{num}$  сферичної частинки можна виразити як частку від ділення площі поверхні частинки радіусом  $r$  і густиною  $\rho$  на її масу:

$$s_{num} = \frac{4\pi r^2}{\frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \rho} \left( \frac{\text{см}^2}{\text{см}^3 \cdot \frac{\varepsilon}{\text{см}^3}} \right) = \frac{3}{r\rho} \left( \frac{\text{см}^2}{\varepsilon} \right). \quad (1.3)$$

Визначимо орієнтовно питому поверхню монтморилонітової глини (середній діаметр  $d^r = 0,5$  мкм) через відношення питомої поверхні цементу ( $s^u = 3000$  см<sup>2</sup>/г,  $d = 50$  мкм - найбільш представлена за обсягом фракція):

$$\frac{s^u}{s^r} = \frac{3 \cdot r^r \cdot \rho^r}{r^u \cdot \rho^u \cdot 3} = \frac{r^r}{r^u} \cdot \frac{\rho^r}{\rho^u}, \quad (1.4)$$

звідки



$$s^r = s^c \cdot \frac{r^c}{r^r} \cdot \frac{\rho^c}{\rho^r} = s^c \cdot \frac{d^c \cdot \rho^c}{d^r \cdot \rho^r}. \quad (1.5)$$

Підставляючи вказані значення, отримаємо

$$s^r = s^c \cdot \frac{r^c}{r^r} \cdot \frac{\rho^c}{\rho^r} = 3000 \cdot \frac{50 \cdot 3,1}{0,5 \cdot 2,65} \left( \frac{\text{см}^2}{\text{г}} \cdot \frac{\text{мкм}}{\text{мкм}} \cdot \frac{\frac{\text{г}}{\text{см}^3}}{\frac{\text{г}}{\text{см}^3}} \right) \approx 350000 \frac{\text{см}^2}{\text{г}}.$$

Для монтморилонітової глини (гігроскопічна вологість  $W_r = 0,2 \text{ см}^3/\text{г}$ ) товщина шару міцнозв'язаної води складає

$$\delta = \frac{0,2}{350000} \left( \frac{\frac{\text{см}^3}{\text{г}}}{\frac{\text{см}^2}{\text{г}}} \right) \approx 6 \cdot 10^{-7} \text{ см} = 6 \text{ nm} = 60 \text{ \AA}.$$

Оскільки вода «ближньої» гідратації іонів або зарядженої поверхні складає приблизно 7-му частину від максимальної гігроскопічної вологості ґрунтів, товщина найближчого шару міцнозв'язаної води складе  $8,5 \text{ \AA}$ . Це відповідає розміру гідратованого катіона ( $6,3 \text{ \AA}$ ) у щільній частині ПЕШ (адсорбційний шар, рис. 1.9, а), і в прошарку (рис. 1.9, б), що обмежує мінімальну відстань між пакетами частинок монтморилонітової глини (рис. 1.7, ліва частина рисунка). Подібна товщина шарів міцнозв'язаної води встановлюється і на поверхнях кварцу.

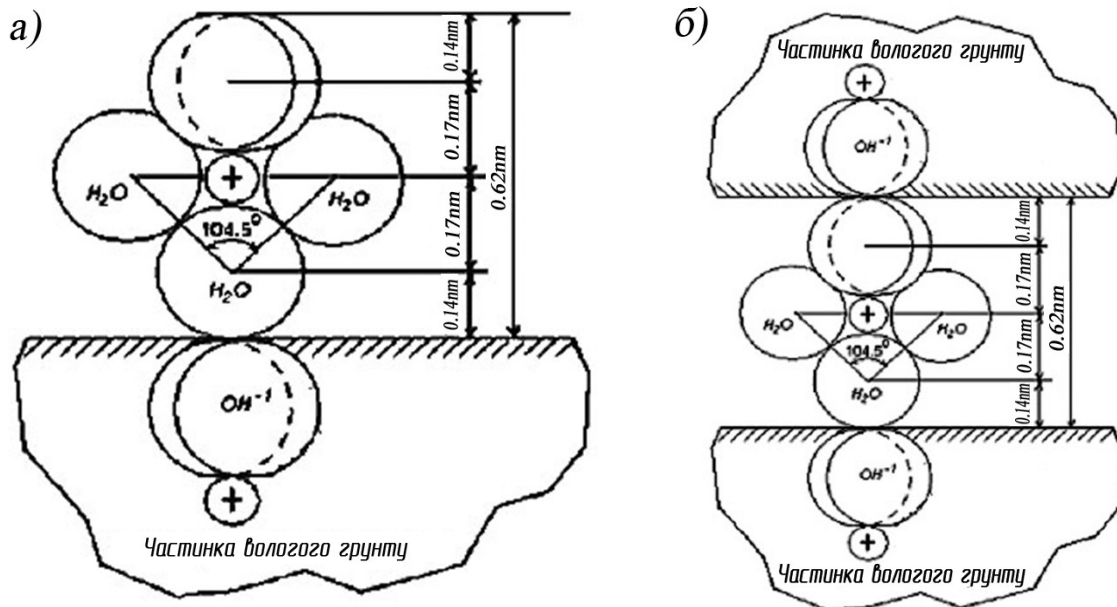


Рис. 1.9. Гідратований протіон в адсорбованому асоціаті води в щільній частині ПЕШ обводненої частинки ґрунту (а), а також у прошарку води між частинками при незначній вологості ґрунту (б)

**Пухкозв'язана вода.** Пухкозв'язана, або фізико-хімічна вода має щільність, близьку до щільності вільної води, і за властивостями мало відрізняється від останньої. Пухкозв'язана вода має менший енергетичний рівень зв'язку, ніж міцнозв'язана вода. Пухкозв'язана вода поділяється на повторно орієнтовану воду полішарів і воду, що утримується осмотичними силами. Повторно орієнтована вода полішарів, або «плівкова» вода, за О.Ф. Лебедевим, характеризується малим зв'язком з поверхнею, але за структурою і властивостям вона відрізняється від вільної води. Температура замерзання повторно орієнтованої води полішарів «мінус» 1,5 °С. Вона пересувається значно повільніше порівняно з капілярним підняттям і пересуванням гравітаційної води.

Сумарний вміст усіх видів міцнозв'язаної води і орієнтованої води полішарів складає вологість, яка була названа А.Ф. Лебедевим *максимальною молекулярною вологоємністю ґрунтів* ( $W_{\text{м.м.в}}$ ). Її величина змінюється в широких границях: у кварцевого піску  $W_{\text{м.м.в}} = 0,8 \%$ , у монтморилонітової глини (асканглини)  $W_{\text{м.м.в}} = 13,5 \%$ . Відповідно за формулою (1.2)

$$\delta = \frac{1,35}{350000} \left( \frac{\frac{\text{см}^3}{\text{г}}}{\frac{\text{г}}{\text{см}^3}} \right) = 3,8 \cdot 10^{-6} \text{ см} = 38 \text{ nm} = 380 \text{ \AA},$$

що близько до відомих даних про передачу електричного поля електричних центрів на поверхні твердих тіл (до 1 мкм). Отже, основний орієнтуючий внесок у повторно орієнтовані полішари води дає електричне поле потенціалвизначальних іонів на поверхні глинистих та інших частинок, а також водневі зв'язки між однаково орієнтованими молекулами води.

Інший вид пухкозв'язаної води – осмотична вода, утворюється внаслідок проникнення молекул води із розчину в дифузну частину ПЕШ. Вона слабо пов'язана з поверхнею, рухливість її близька до рухливості вільної води, за структурою і властивостями не відрізняється від останньої. Присутність у ґрунтах осмотичної води зумовлює їх пластичність при певному діапазоні вологості. Разом з осмотичною в ґрунтах міститься капілярна вода в капілярах малого діаметра. Пластичність глинистих і лесових ґрунтів починається при вологості вище величини максимальної молекулярної вологоємкості, коли з'являється осмотична і капілярна вода і зникає вільна вода. Вміст пухкозв'язаної осмотичної і капілярної води в ґрунті може бути дуже значним, проте при високій концентрації солей у воді вміст осмотичної води зменшується.

У свою чергу капілярна вода поділяється на три види: вода кутів пор, підвішена вода, власне капілярна вода. Вода кутів пор звичайно утворюється в місцях стикання частинок у вигляді окремих крапель, що займають звужені частини пор і обмежених менісками. Вміст цього виду води в пісках складає 3÷5 %, у супісках – 4÷7 %. М.М. Герсеванов (1937) визначає вологість ґрунту, що містить воду кутів пор, як стан затисненої води в ґрунті. При збільшенні вологості ґрунту капілярні пори без остачі заповнюються водою. У цьому випадку капілярна вода поділяється на власне капілярну і підвішену воду залежно від того, з'єднується вона з рівнем ґрунтових вод або ні.

*Вологість ґрунту, у якого всі капілярні пори заповнені водою, називають капілярною вологоємкістю. При вологості, що*

дорівнює капілярній вологоємкості, у ґрунті, крім капілярної води, буде присутня зв'язана вода, яка розташовується навколо ґрунтових частинок і тим самим значно зменшує діаметр пор, доступний для пересування самої капілярної води. Пересування капілярної води в ультрапорах взагалі відсутнє, оскільки вони повністю зайняті зв'язаною водою. Співвідношення між зв'язаною і капілярною водою в порах ґрунту показана на схемі Н.А. Качинського (1947) (рис. 1.10).

**Гравітаційна вода** поділяється на воду, що просочується, і воду ґрунтового потоку.

Таким чином, слабкі ґрунти є високодисперсними системами з субмікроскопічними частинками з негативним поверхневим зарядом, що визначає їх стійкість і слабкі міцнісні властивості. Дисперсійним середовищем є водний розчин електроліту, що складається з шарів міцнозв'язаної, пухкозв'язаної і вільної води, зокрема капілярної, гравітаційної і осмотичної. З позиції електроповерхневих властивостей міцнозв'язана і пухкозв'язана вода містяться в щільній і дифузній частинах ПЕШ і орієнтовані електричним полем потенціалвизначальних іонів ПЕШ частинок. Загальна товщина міцнозв'язаної і пухкозв'язаної води може досягати  $\approx 1$  мкм.

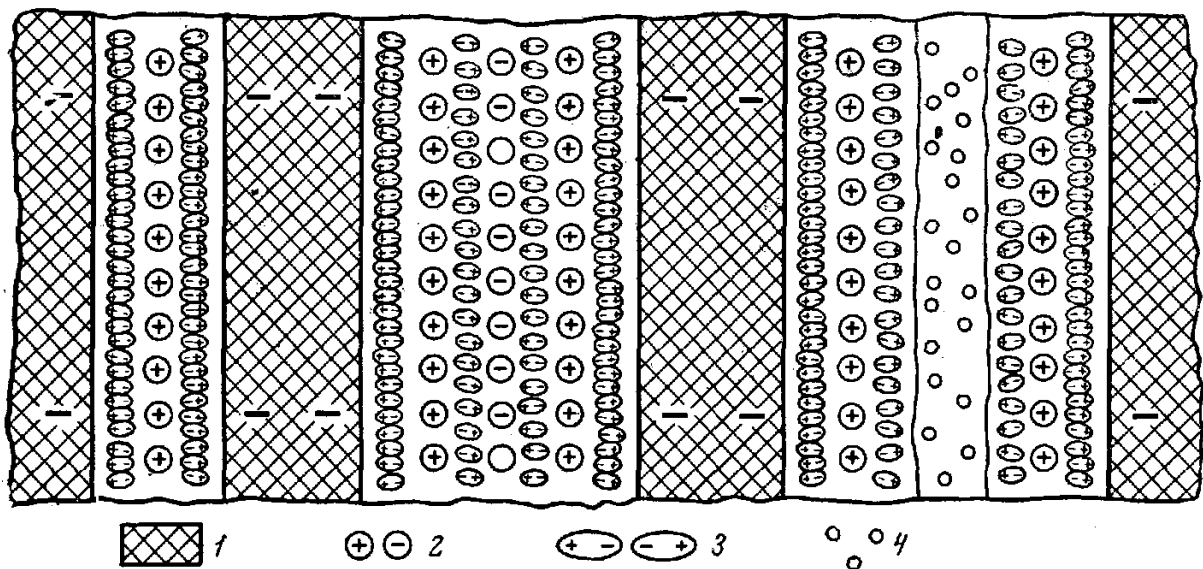


Рис. 1.10. Схема розподілу води в капілярах ґрунту  
(за Н.А. Качинським):

1 – стінки капіляра; 2 – іони; 3 – дипольні молекули води; 4 – вільна вода

## 1.2. Ущільнення і зміцнення ґрунтів

Часто слабкі ґрунти використовуються як основи будівель і споруд. До слабких відносять ґрунти, несуча здатність яких настільки мала, що збільшення розмірів подошви фундаментів неможливе або недоцільне, фізико-механічні характеристики ґрунтів основи не відповідають вимогам, що висуваються до них (особливо це стосується модуля загальної деформації ґрунту, значення якого  $E < 5,0$  МПа).

Існують такі способи штучної зміни властивостей ґрунтів основи: конструктивні; ущільнення; закріплення ґрунтів.

### 1.2.1. Конструктивні способи поліпшення властивостей ґрунтів

До основних конструктивних способів належать: улаштування ґрунтових подушок, застосування шпунтової огорожі, створення бічних привантажень.

*Ґрунтові подушки* застосовуються для часткової заміни ґрунтів, що сильно стискаються, в основі будівель і споруд і виконуються із гравію, пісків крупних і середніх, щебеню, шлаку, мінеральних відходів різних виробництв. За допомогою ґрунтових подушок є можливим найбільші нормальні напруги і зони зсувів розташувати в міцному ґрунті і тим самим компенсувати недоліки слабого ґрунту (рис. 1.11). Розміри ґрунтової подушки визначаються за результатами розрахунку. Товщина подушки визначається з таких умов: 1) осідання подушки і залягаючих нижче шарів слабого ґрунту під впливом фундаментів не повинне перевищувати граничних значень, що встановлюються ДБН В.2.1-10-2009; 2) по подошві подушки повинна виконуватися умова

$$a_{zq} + a_{zp} \leq R_z, \quad (1.6)$$

де  $a_{zq}$  – вертикальна напруга від власної ваги ґрунту;  
 $a_{zp}$  – додаткова вертикальна напруга від зовнішнього навантаження;  
 $R_z$  – розрахунковий опір слабкого шару ґрунту, який визначається за ДБН як для умовного фундаменту.

Розміри ґрунтової подушки в плані розраховуються з умови забезпечення стійкості слабкого ґрунту від дії горизонтальних сил. При цьому повинна витримуватися умова

$$E_n > E_a, \quad (1.7)$$

де  $E_n$  – пасивний тиск слабкого ґрунту;  
 $E_a$  – активний тиск ґрунту подушки, що складається з двох сил,

$$E_a = E_a' + E_a'', \quad (1.8)$$

де  $E_a'$  – розпір ґрунтової подушки з урахуванням дії рівномірно розподіленого навантаження від ґрунту, який лежить вище за подушку;  
 $E_a''$  – розпір ґрунтової подушки від навантаження, що передається фундаментом.

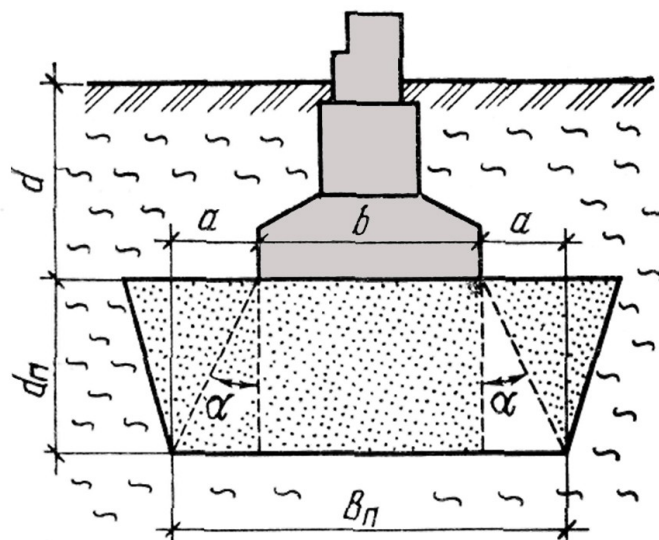


Рис. 1.11. Розрахункова схема піщаної подушки:  
 $\alpha$  – кут розподілення тиску, що дорівнює  $30 \div 40^\circ$

Для забезпечення стійкості ґрунтової подушки необхідне дотримання умови

$$\frac{E_n}{E_a} \geq 1,2 \dots 1,5. \quad (1.9)$$

Шпунтова огорожа основи застосовується у тому випадку, коли є небезпека випирання слабкого ґрунту з-під фундаменту в різні боки (рис. 1.12). Щоб уникнути цього, у щільний ґрунт забивають шпунтову огорожу із закладенням її у фундаментну плиту і з укладанням дренуючого прошарку. Слід мати на увазі, що в цьому випадку можливе велике осідання основи фундаментів. Тому таке рішення приймається для будівель, що допускають розвиток значних осідань.

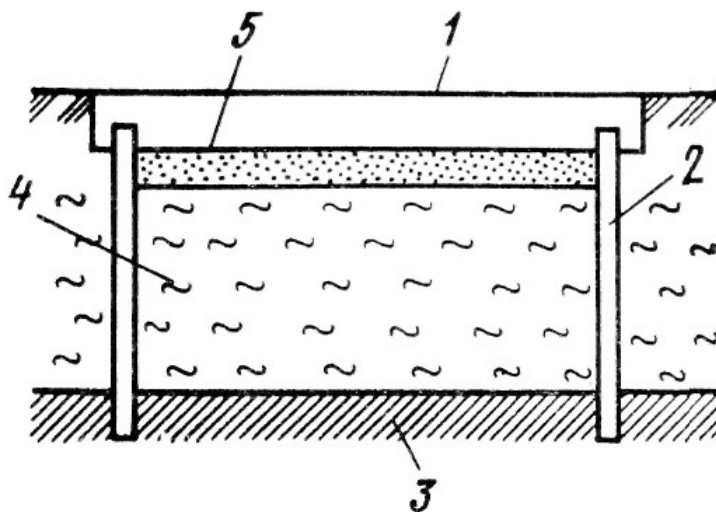


Рис. 1.12. Схема улаштування шпунтової огорожі:  
1 – фундаментна плита; 2 – шпунтова огорожа; 3 – щільний ґрунт;  
4 – слабкий ґрунт; 5 – дренуючий прошарок

Привантаження насипів у вигляді відсипання банкеток біля його бічних частин проводиться в зонах можливого випирання ґрунту і виконується для забезпечення стійкості будівель і споруд, побудованих на поверхні таких насипів. Відсипання ґрунту проводиться шарами, його висота визначається

спеціальним розрахунком. Такі привантаження дозволяють суттєво підвищити стійкість основи.

### **1.2.2. Способи ущільнення ґрунтів**

Застосовуються такі види ущільнення ґрунтів: поверхнєве, глибинне віброущільнення, за допомогою вибухів (камуфлетне), за допомогою статичного навантаження й улаштування піщаних дрен, водозниження та улаштування фундаментних паль.

*Поверхнєве ущільнення* глинистих і піщаних ґрунтів проводиться найчастіше важкими трамбівками до щільності складання, при якій вони мають необхідну міцність і деформованість. Глибина ущільнення ґрунтів важкими трамбівками залежить від щільності і вологості ущільнюваних ґрунтів, діаметра, ваги трамбівки і приблизно визначається за формулою

$$h_{\text{ущ}} = k_y \cdot d, \quad (1.10)$$

де  $d$  – діаметр трамбівки;

$k_y$  – коефіцієнт пропорційності, що приймається для пісків – 1,55, суглинків – 1,45, глин – 1,0.

Вагу трамбівки призначають з умови забезпечення тиску на ґрунт не менше 0,015÷0,20 МПа (звичайно 20÷50 кН). Відомі випадки застосування надважких трамбівок вагою 400 кН, що дозволяли при скиданні з висоти 40 м ущільнити щебенисто-кам'яний насип на глибину до 40 м.

Ущільнення глинистих ґрунтів проводиться при оптимальній вологості

$$w_{\text{opt}} = w_p - (1 \div 3 \%), \quad (1.11)$$

де  $w_p$  – вологість на межі розкочування.

Якщо вологість ґрунту менше від оптимальної, то його зволожують шляхом заливання води на дно трамбованого



котлована (особливо в просадних ґрунтах). Вага води, яка потрібна для дозволоження ґрунтів,

$$G = \gamma_d \cdot (w_{onm} - w) \cdot h_{yuz} \cdot A, \quad (1.12)$$

де  $w$  – природна вологість ґрунту;

$A$  – площа замочуваного дна котлована;

$\gamma_d$  – питома вага сухого ґрунту.

Що стосується гравелістих і піщаних ґрунтів, то їх ущільнення можна проводити незалежно від ступеня водонасичення.

Пониження трамбованої поверхні (або недобір ґрунту до проектної відмітки закладання фундаментів) визначають за формулою

$$\Delta h_1 = 2h_{yuz} \left( \frac{\gamma_d}{\gamma_{d,yuz}} \right), \quad (1.13)$$

де  $\gamma_d$  – питома вага сухого ґрунту;

$\gamma_{d,yuz}$  – середнє значення питомої ваги сухого ґрунту в межах ущільненого шару (приймається в середньому 1600 кг/м<sup>3</sup> для всіх видів ґрунтів).

Ширина ущільненої смуги за межами фундаменту повинна бути не менше 0,2 м з кожного боку і не менше діаметра трамбівки. Ущільнення ґрунтів важкими трамбівками супроводжується динамічною дією на ґрунт і може викликати струс поблизу розташованих будівель або споруд. У зв'язку з цим при ущільненні трамбівками вагою до 50 кН відстань до будівель, що знаходяться в задовільному стані, повинна бути не менше 10 м. За наявності близько розташованих будівель, що мають тріщини в стінах або взагалі знаходяться в старому стані, ця відстань збільшується до 15 м. Якщо інженерні мережі виконуються із азбестоцементних, керамічних труб, то відстань до будівель приймається більше 15 м. До початку ущільнення ґрунтів важкими трамбівками проводять дослідні роботи на ділянці котлована: уточнюється величина недобору ґрунту, відмови при трамбуванні (осідання від одного удару), кількість ударів, глибина ущільнюваної зони і т. п. Одержані дані

використовують при складанні проекту робіт з ущільнення ґрунтів важкими трамбівками.

Пухкі піщані ґрунти на глибину 0,5÷1,5 м ущільнюються різними вібраційними машинами: віброплитами, пневматичними трамбівками, віброкатками, молотами подвійної дії та ін. Ущільнення ґрунтів може бути досягнуте багаторазовою проходкою катків. Для вказаних машин товщина ущільнюваного шару складає, м:

- пневматичні трамбівки . . . . .	0,1÷0,2
- гладкі котки . . . . .	0,1÷0,25
- кулачкові котки . . . . .	0,2÷0,35
- віброкатки . . . . .	0,4÷1,2
- котки з падаючими вантажами вагою 0,8÷17 кН. . . . .	1,0÷1,5
- віброплити . . . . .	0,2÷0,6
- молот подвійної дії вагою 22 кН на металевій плиті (піддоні) . . . . .	1,2÷1,4
- важкі трамбівки вагою, кН:	
20÷30 . . . . .	1,5÷2,0
45÷50 . . . . .	2,5÷3,0
100 . . . . .	5,5÷6,0

Глибинне ущільнення піщаних ґрунтів у стані водонасичення проводиться спеціальними глибинними вібраторами двома способами: опусканням вібратора (вібробулави) в пісок або зануренням стержня разом з розташованим у його верхній частині вібратором. Віброущільнення дозволяє ущільнювати водонасичені піски на глибину 1÷10 м, рідше на глибину до 20 м. При ущільненні пісків завтовшки до 20 м застосовується віброванурювач, який кріпиться до трубчастого стержня, забезпеченого привареними поперечними планками.

Ущільнення піщаних і просадних лесових ґрунтів проводиться за допомогою *камуфлетних вибухів*. Піщаних піски ущільнюються шляхом занурення в ґрунт зарядів на розрахункову глибину з подальшим улаштуванням камуфлету. Після вибуху відбувається осідання поверхні піску, що свідчить про його ущільнення. Для ущільнення лесових ґрунтів проводиться їх замочування через фільтруючі або суміщені свердловини, в які поміщають заряди в трубках. Вибухи проводять один за одним з розривом у декілька секунд. У результаті ущільнений лесовий ґрунт втрачає свої просадні

властивості і може бути використаний для передачі значних навантажень. Верхня частина цього ґрунту ущільнюється важкими трамбівками.

Улаштування піщаних і ґрунтових палей застосовується для ущільнення водонасичених пісків, що містять органічні домішки, і лесових просадних ґрунтів на значну глибину. Роботи з улаштування піщаних палей починаються із занурення в ґрунт вібратором або молотом пустотілої металевої труби з наконечником, що саморозкривається (у лесових ґрунтах, здатних тримати вертикальну стінку, забивають інвентарний сердечник). Це призводить до ущільнення ґрунту навколо свердловин. У міру заповнення свердловини піском труба витягується з вимкненим вібратором, завдяки чому відбувається ущільнення піску. У результаті утворюється ущільнений масив ґрунту з середнім модулем загальної деформації, що значно перевищує модуль деформації неущільненого ґрунту. Піщані (ґрунтові) палі розміщують у шаховому порядку (рис. 1.13). За допомогою спеціального розрахунку визначається площа ущільнюваної основи, кількість піщаних палей, відстань між ними, об'єм піску і т. п. Застосування піщаних палей замість забивних залізобетонних дозволяє знизити вартість улаштування фундаментів у  $2 \div 2,5$  рази, при цьому економиться значна кількість металу і цементу.

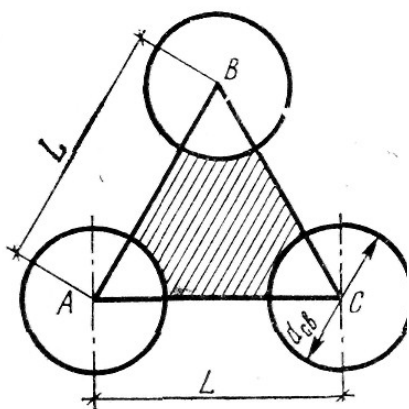


Рис. 1.13. Розміщення піщаних палей у плані

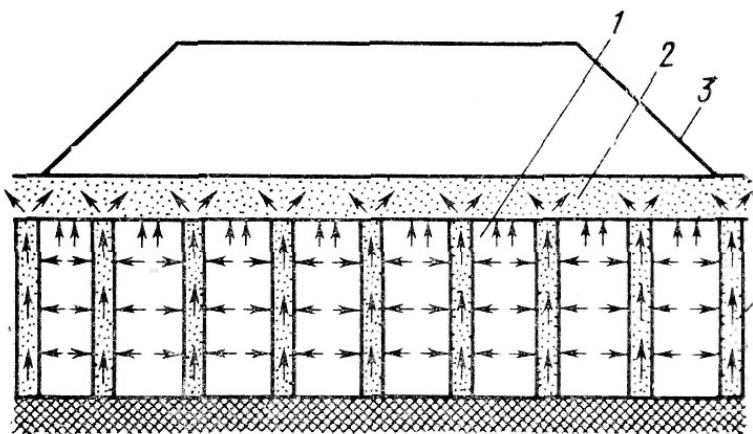


Рис. 1.14. Ущільнення слабких ґрунтів статичним навантаженням:  
1 – слабкий ґрунт; 2 – пластовий дренаж; 3 – навантаження у вигляді насипу; 4 – вертикальні дрени

*Ущільнення ґрунту статичним навантаженням* рекомендується для слабких водонасичених глинистих ґрунтів і торфів. Як статичне навантаження використовується земляний насип, а для прискорення процесу ущільнення влаштовуються вертикальні дрени (рис. 1.14). Піщані дрени виконують діаметром 30÷50 см на відстані 2÷4 м один від одного. Замість піщаних дрен влаштовують дрени зі спеціального пористого картону або пластмасової стрічки в паперовому кожусі. Насип відсипається шарами, тиск по його підшві повинен бути дещо вищий, ніж тиск від споруди.

*Ущільнення ґрунту водозниженням* засноване на зниженні рівня підземних вод. Це призводить до підвищення напруги на скелет ґрунту і викликає його ущільнення. Таким чином ущільнюються слабкі глинисті ґрунти (здатні віддавати із пор воду), заторфовані супіски, стрічкові глини, мули та ін. Віджимання води проводиться найчастіше за допомогою голкофільтрових пристроїв. Однак деякі слабофільтруючі глинисті ґрунти віддають воду дуже погано, тому для посилення відтоку води застосовують *електроосмос*. Відкачуючи воду, що збирається біля катода, проводять обезводнення ґрунту і його ущільнення. Одночасно відбувається зміцнення ґрунту в порівняно короткий час і в межах необхідної площі.

### **1.2.3. Способи закріплення ґрунтів**

Способи закріплення ґрунтів дозволяють підвищити міцність і зменшити стисливість за рахунок збільшення зчеплення між його частинками. Найбільш інтенсивному закріпленню піддаються ґрунти, які відносно добре фільтрують воду і є водопроникними. До способів закріплення ґрунтів належать цементація, силікатизація, електрохімічне закріплення, термічний випал, штучне заморожування ґрунтів.

*Цементація* (нагнітання цементного розчину під тиском 0,3÷0,6 МПа) застосовується для закріплення ґрунтів з крупними порами: тріщинуватих скельних порід, гальки, крупних і гравелистих пісків. Найчастіше застосовують чистий цементний

розчин - цементно-водну суспензію складу: цемент - 1 масова частина, вода -  $10 \div 50$  масових частин.

*Силікатизація* полягає в нагнітанні хімічних розчинів (силікатів натрію) в ґрунт. Застосовується два способи силікатизації ґрунтів – дво- і однорозчинний. Спосіб дворозчинної силікатизації здійснюється шляхом послідовного нагнітання в ґрунт розчинів силікату натрію (рідкого скла) і хлористого кальцію. У результаті взаємодії цих розчинів виділяється гель кремнієвої кислоти, що є в'язучою речовиною. Цим способом закріплюють піски крупні і середньої крупності з коефіцієнтом фільтрації від 80 до 2 м/доб. При способі однорозчинної силікатизації в ґрунт за допомогою ін'єктора нагнітається складний розчин, що складається з силікату натрію і отверджувачів – розчинів кислот, кислих солей і органічних отверджувачів. У такий спосіб закріплюють піски дрібні і пилюваті, лесові просадні ґрунти з коефіцієнтом фільтрації  $5 \div 0,3$  м/доб.

Особливістю застосування однорозчинної силікатизації для лесових ґрунтів є ін'єктування в них рідкого скла без отверджувачів. Затвердіння відбувається за рахунок наявних у хімічно активних лесових ґрунтах власних отверджувачів – солей. У зв'язку з великими витратами рідкого скла, особливо при силікатизації ґрунтів на велику глибину (до  $15 \div 20$  м), несучу здатність лесових ґрунтів можна підвищити за допомогою хімічної стабілізації шляхом введення разом із замочуваною водою дешевих лужних реагентів. Вони здатні активізувати наявні в лесових ґрунтах резерви колоїдної кремнієвої кислоти, вапна і гідроксиду алюмінію з утворенням нових цементуючих складів.

*Електрохімічне закріплення* застосовується для ґрунтів, що мають коефіцієнт фільтрації менше  $0,1 \div 0,2$  м/доб (суглинки і глини в текучопластичному стані, мули і т. п.). При цьому способі в такі ґрунти вводяться розчини силікату натрію і хлористого кальцію через перфорований анод за допомогою постійного електричного струму, що зумовлює виникнення ефектосмосу і рух води від анода до катода. Для ґрунтів, що мають коефіцієнт фільтрації менше 0,01 м/доб, закріплення проводиться за допомогою електролітів (розчин хлористого

кальцію). У цьому випадку в ґрунт вводять іони електроліту, що сприяє закріпленню ґрунту і поліпшенню будівельних властивостей. При цьому закріплення відбувається за рахунок розчинення анода з переходом у ґрунт тривалентних катіонів заліза  $Fe^{3+}$  і утвореного гідроксиду заліза  $Fe(OH)_3$ .

*Електроосмотичне осушення.* Глинисті водонасичені ґрунти зі ступенем вологості близько до 1,0 або таким, що дорівнює йому, неможливо зміцнити за допомогою розглянутих вище ін'єкційних способів, оскільки такі ґрунти мають малу проникність. Подібні ґрунти можна укріплювати за допомогою електричного струму. Якщо через глинистий ґрунт пропускати постійний струм, то вода, що міститься в ґрунті, рухатиметься у бік катода. Це явище одержало назву електроосмосу. Крім того, у глинистих ґрунтах під впливом дії постійного електричного струму частина зв'язаної води переходить у вільну, внаслідок чого збільшується ефективний переріз пор, здатних пропускати вільну воду. Внаслідок цього коефіцієнт фільтрації в суглинних ґрунтах зростає в  $10 \div 12$ , у глинистих - до 100 разів.

Разом з явищем електроосмосу в ґрунті може відбуватися явище електрофорезу – рух негативно заряджених колоїдних частинок і дрібних глинистих частинок до позитивного полюса джерела струму. Електрофорез сприяє освітленню відкачуваної із ґрунту води. Видаляючи надлишок води біля катодів при електроосмосі, можна добитися зменшення вологості глинистого ґрунту і його ущільнення. За аналогією зі способом осушення котлованів електроосмосом можна осушити глинистий незасолений ґрунт з метою його ущільнення. Для цього в ґрунт на глибину ущільнення занурюють електроди (рис. 1.15).

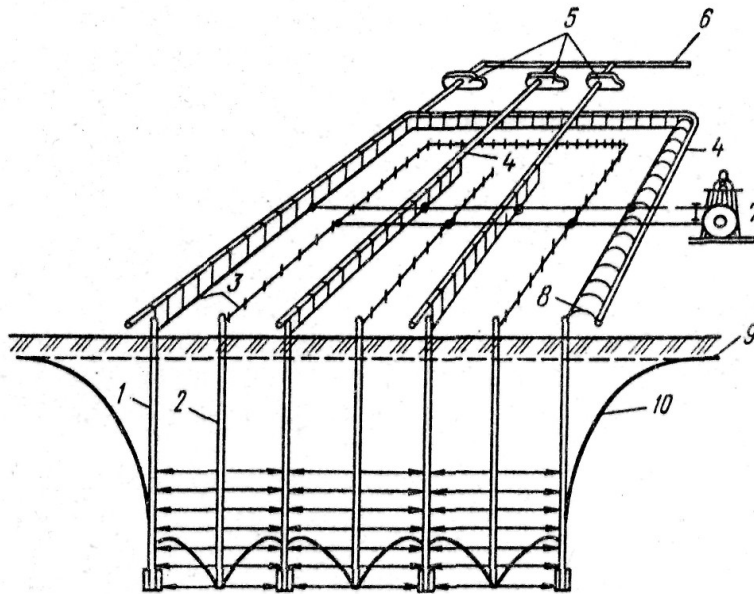


Рис. 1.15. Схема електроосушення ґрунтів:

- 1 – електроди-голкофільтри (катоди); 2 – глухі електроди (аноди);  
 3 – сполучні струмопровідники; 4 – колектор; 5 – насоси; 6 – водоскид;  
 7 – мотор-генератор; 8 – гнучкі шланги; 9 – початковий рівень ґрунтових вод; 10 – депресивна крива

При тривалій дії постійного електричного струму на глинистий ґрунт у ньому, крім електроосмосу, відбувається електроліз і виникають складні фізико-хімічні процеси, що ведуть до утворення необоротних сполук. У результаті створюється додаткове зміцнення ґрунту. У цьому випадку можна говорити про електрохімічне закріплення ґрунтів. Електрохімічний спосіб закріплення глинистих ґрунтів без уведення будь-яких хімічних добавок можна застосовувати при коефіцієнті фільтрації менше  $6 \times 10^{-6}$  см/с і числі пластичності ґрунту  $I_p > 5$ .

Спосіб електрохімічного закріплення похило залягаючих мулистих тиксотропних глин був успішно застосований на будівництві чотирипрогонового мосту в Канаді. До закріплення під дією струсів при забиванні паль шар глини прийшов у рух, поставивши під загрозу продовження робіт. Для стабілізації глин були забиті в ґрунт трубчасті анодні і катодні електроди на глибину від 13 до 42 м. З катодних електродів за допомогою глибинних насосів відкачувалася вода, що збиралася в процесі

електроосмосу. Роботи тривали три місяці. У результаті міцність ґрунту підвищилася настільки, що були успішно завершені роботи із занурення паль, а ґрунт став стійким і витримував навіть укіс 1:1, незважаючи на дію працюючих механізмів.

При коефіцієнті фільтрації ґрунту більше  $6 \times 10^{-6}$  см/с для електрохімічного закріплення необхідно вводити спеціальні хімічні речовини в ґрунт. У таких ґрунтах звичайно електроосмос поєднують із силікатизацією. Цей спосіб закріплення ґрунтів одержав назву електросилікатизація. Електроосмос сприяє кращому проникненню в ґрунт гелеутворюючих розчинів. Тому спосіб електросилікатизації можна використовувати для закріплення ґрунтів з нижчими значеннями коефіцієнта фільтрації, в яких застосовувати звичайну силікатизацію неефективно. Електросилікатизація успішно застосовувалася для закріплення ґрунтів під фундаментами існуючих споруд з метою підсилення основ і ліквідації аварійних станів споруд. Електрохімічним способом можна закріплювати ґрунти з коефіцієнтом фільтрації менше  $1 \times 10^{-5}$  см/с з використанням електролітів, що спеціально вводяться в ґрунт через аноди (наприклад, хлористого кальцію).

*Смолизація* здійснюється нагнітанням у ґрунт різних смол з отверджувачами. Найбільш дешевою і зручною є карбамідна смола з кислими отверджувачами – щавлевою, соляною кислотами та ін. Цей спосіб використовують для закріплення дрібних і пилюватих пісків з коефіцієнтом фільтрації  $0,5 \div 5,0$  м/доб, лесових просадних ґрунтів.

*Термічний спосіб* застосовується для закріплення лесових великопористих газопроникних просадних ґрунтів, при цьому збільшується їх водостійкість і міцність. Термічний спосіб закріплення ґрунтів здійснюють шляхом спалювання палива (газоподібного, рідкого або твердого) у заздалегідь пробурених свердловинах при температурі  $800$  °С (рис. 1.16). У результаті випалу збільшується міцність структурних зв'язків ґрунтів, усуваються просадні властивості. При термічній обробці ґрунту спочатку пробурюють свердловини діаметром 200 мм. Потім подають паливо і повітря так, щоб спалювання відбувалося при температурі  $800$  °С і проникаючі в ґрунт газу мали температуру не нижче  $300 \div 400$  °С. При витраті рідкого палива на 1 м



довжини свердловини в кількості  $80 \div 150$  кг діаметр закріпленого стовпа складає  $1,5 \div 3,0$  м з кубиковою міцністю  $1 \div 3$  МПа.

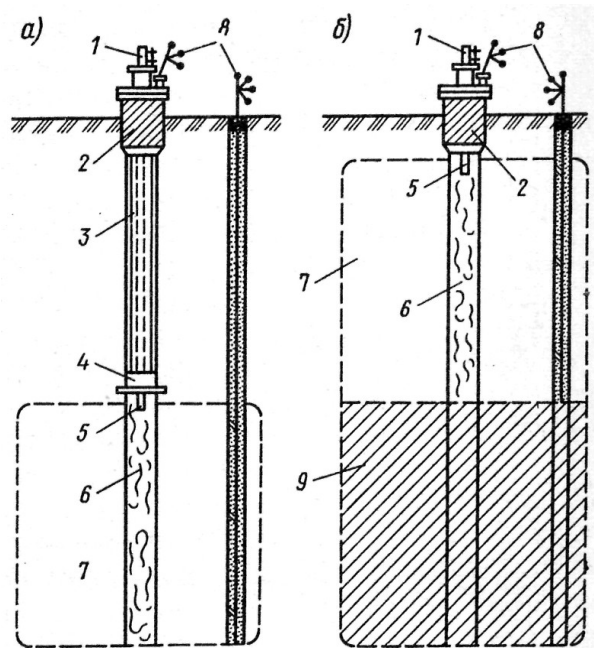


Рис. 1.16. Схема зміцнення масиву лесового ґрунту глибинним випалом:

а – випал нижньої частини масиву;  
 б – випал верхньої частини масиву:  
 1 – форсунка; 2 – затвор; 3 – труба з повітрям; 4 – відсікач; 5 – труба-подовжувач форсунки;  
 6 – свердловина; 7 – закріплюваний масив ґрунту; 8 – термопари;  
 9 – обпалений масив ґрунту

*Штучне заморожування ґрунтів.* Цей спосіб використовують для обгороджування глибоких котлованів, що відриваються у водонасичених ґрунтах. Стінка із замороженого ґрунту навколо котлована сприймає тиск води і ґрунту, а також перешкоджає надходженню води в котлован. Штучне заморожування ґрунтів застосовують при спорудженні підземних вестибюлів і похилих вводів метрополітену, при спорудженні шахт у гірничій справі, для улаштування протифільтраційних завіс у гідротехнічному будівництві, для обгороджування великих котлованів при спорудженні фундаментів мостів.

При штучному заморожуванні по периметру котлована в ґрунті на певній відстані встановлюють заморожуючі колонки внутрішнім діаметром  $100 \div 150$  мм (рис. 1.17). Усередині колонок циркулює охолоджений розчин (звичайно розчин  $\text{CaCl}_2$ ), який надходить через внутрішню трубу, а потім піднімається вгору, омиваючи стінки зовнішньої труби. Охолоджуючий розчин віднімає теплоту у навколишнього ґрунту і заморожує його. Навколо кожної колонки утворюється циліндрова область замороженого ґрунту, діаметр якої в процесі заморожування збільшується. З часом заморожені зони навколо окремих колонок зливаються між собою, утворюючи суцільну стінку

замороженого ґрунту. Охолоджують розчин за допомогою спеціальних холодильних установок. При заморожуванні ґрунту досягається зниження температури до «мінус»  $20 \div 35$  °С при середній відстані між свердловинами близько  $1 \div 1,5$  м. Спосіб заморожування застосовується як для скельних, так і для пухких ґрунтів. Цей спосіб отримав значний розвиток у СРСР у різних галузях будівельної техніки, в гірничій справі і в гідротехнічному будівництві.

Крім розглянутого основного розсольного способу заморожування в складних інженерно-геологічних умовах, при тісній забудові, а також коли треба значно скоротити термін заморожування застосовують безрозсольний спосіб, при якому теплота у ґрунту віднімається в результаті випаровування зріджених газів безпосередньо в заморожуючих свердловинах. Як холодагенти використовують рідкі азот, пропан, фреон, аміак, а також холодагенти, що з'явилися останніми роками. Цей спосіб забезпечує швидке заморожування і нижчу температуру мерзлого ґрунту порівняно з розсольним, але відрізняється високою вартістю і великою витратою рідкого газу. Метод штучного заморожування дуже ускладнений при швидкостях руху підземних вод, що перевищують  $0,025$  см/с. При заморожуванні ґрунтів, схильних до обдимання, можуть виникнути переміщення поверхонь і розташованих поблизу конструкцій споруд за рахунок обдимання таких ґрунтів при заморожуванні і об'ємних деформацій ущільнення заморожених об'ємів ґрунтів, що відтають з часом.

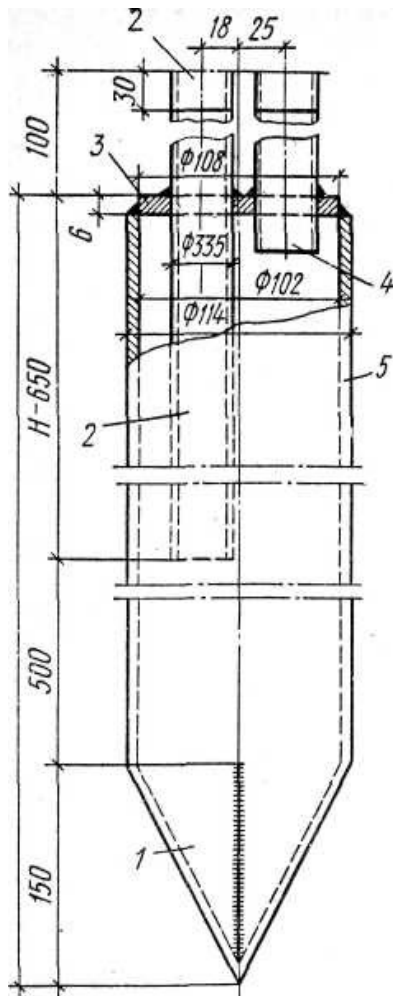


Рис. 1.17. Заморожуюча колонка:

- 1 – башмак; 2 – живильна трубка;
- 3 – діафрагма, 4 – відвідна трубка;
- 5 – заморожуюча труба

*Бурозмішувальний спосіб для створення цементогрунту.* У ряді випадків основа споруди складена чергуванням різних за водопроникністю і хімічною активністю ґрунтів, закріплення яких існуючими ін'єкційними способами виявляється нездійсненним. Наприклад, спосіб однорозчинної силікатизації лесів успішно може бути застосований тільки в просадній товщі, розташованій вище за рівень ґрунтових вод. У зв'язку з цим виникла необхідність розробити спосіб закріплення в першу чергу водонасичених просадних лесів, мулів та інших ґрунтів. Придатним виявився буро змішувальний спосіб закріплення таких ґрунтів. Аналогічні способи застосовуються в Японії, Швеції, США та інших країнах.

Сутність способу полягає в тому, що на кінці занурюваної за допомогою бурильного верстата порожнистої штанги розміщують лопатевий бурозмішувач, який розпушує ґрунт. При обертанні приладу у зворотному напрямі в ґрунт вводять цементну суспензію. При цьому відбувається змішення ґрунту з

цементом і досягається деяке його ущільнення. У результаті утворюється паля або масив з цементогрунту діаметром від 0,6 до 1,0 м, що мають значну несучу здатність. Цементогрунт має достатню щільність. При створенні верхньої частини палі для надання їй морозостійкості використовують хімічні добавки або збільшують кількість цементу. Для реалізації цього способу нині використовують спеціальні машини, що серійно випускаються. Глибина, на яку можна здійснити виготовлення таких палей, а отже, улаштувати стінки колодязів, котлованів, територій під великі навантаження, досягає десятків метрів. Спосіб є дуже економічним і може застосовуватися для закріплення ґрунтів у випадках, коли ін'єкційні способи непридатні.

У даний час бурозмішувальний спосіб застосовують у галузі сільського, промислового і морського будівництва. Закріплюють лесові просадні ґрунти вище і нижче за рівень ґрунтових вод, закріплюють мули в заплавах річок і на березі морів і океанів.

*Глинізація* застосовується для нагнітання глинистих суспензій в тріщинуваті породи або піски. Цей спосіб був розроблений і застосований в СРСР при проходці шахт на Уралі і на інших об'єктах. При нагнітанні використовуються глинисті суспензії щільністю  $1,1 \div 1,5$  г/см<sup>3</sup>. Для коагуляції колоїдної частини глинистих суспензій застосовуються в малих дозах хлористий магній, хлористий кальцій, вапно та ін. Спосіб глинізації бажано проводити під великим тиском – не менше  $1,5 \div 2,0$  МПа.

Глинізацію застосовують у випадках, коли цементация неекономічна через велике поглинання цементу в крупних тріщинах і кавернах, що взаємно сполучаються, при карсті або коли цементация ненадійна через наявність агресивних вод, здатних кородувати цемент. Недоліком способу глинізації є знижена стійкість глинізаційної завіси проти суфозії.

#### **1.2.4. Способи зменшення водопроникності ґрунтів**

Можна також виділити окремо способи зменшення водопроникності ґрунтів. Як такі способи застосовують силікатизацію з меншою щільністю рідкого скла й отверджувачів, а також бітумування і глинізацію.

*Бітумування* застосовується для тріщинуватих скельних порід шляхом нагнітання в них розплавленого бітуму або

бітумної емульсії з коагулянтном. Бітумну емульсію з коагулянтном використовують також для ущільнення і підвищення водонепроникності піщаних ґрунтів, зокрема тонкозернистих пісків, і дуже тонких тріщин скельних порід.

*Глинізація* піщаних ґрунтів проводиться шляхом нагнітання глинистої суспензії в тонкі пори пісків, що призводить до їх замулювання і зменшення коефіцієнта фільтрації.

Не всі вказані способи можуть бути застосовані при реконструкції, ремонті і відновленні експлуатованих будівель і споруд, коли посилення основи виконується в обмежених умовах, без великого устаткування, часто зсередини будівлі. Реальними, найбільш відпрацьованими і ефективними в цих умовах є способи хімічного ущільнення – цементації, силікатизації і смолизації. Способи смолизації є дорожчими через більшу вартість смол порівняно з цементацією і силікатизацією. У зв'язку з цим у даному навчальному посібнику основна увага буде приділена цементації і силікатизації та вдосконаленню їх з метою збільшення проникної здатності складів, що нагнітаються, а також міцності і водостійкості цих складів і закріпленого ними слабого ґрунту.

### **1.3. Існуючий досвід ущільнення та закріплення слабких ґрунтів хімічними способами**

#### ***1.3.1. Історія розвитку способів хімічного закріплення ґрунтів***

Ці способи полягають у нагнітанні в ґрунт одного або двох хімічних розчинів.

Метод ін'єкції вперше був застосований інженером Берінї в 1802 р. при ремонті огорожуючих щитових споруд у порту Д'есп у Франції. Застосована технологія робіт полягала в нагнітанні розчину під тиском в основу щитової огорожі, побудованої на гравійному ґрунті. Цю захисну споруду було зведено в 1779 р. із застосуванням дерев'яних кесонів, опущених безпосередньо на сильно проникні гравійні відкладення. Внаслідок сильних приливів, коливання рівнів яких досягали 12 м, основу було протягом 8 років розмито і споруда вийшла з ладу. Разом з частковою реконструкцією самої споруди була

виконана напірна ін'єкція під брущатий настил пом'ятої глини, яка видавлювалася із спеціальної дерев'яної циліндрової помпи діаметром 8 см за допомогою поршня через металеве сопло діаметром 3 см. Подальше застосування методу ін'єкції було здійснено у Франції колегами та учнями Беріні.

**Цементация.** Цей спосіб нині найбільш поширений і освоєний в гідротехнічному будівництві. Розвитку методу ін'єкції найбільше сприяла поява романцементу, а потім портландцементу.

Починаючи з 1864 р. цементация тріщинуватих порід стала проводитися при проходці стволів шахт і здійснювалася шляхом простої заливки цементного розчину в тріщини порід. З 1878 р. в шахтному будівництві стали застосовувати нагнітання розчину під тиском, і у 1895 р. з'являється перший офіційний технічний звіт, присвячений результатам використання цього способу.

У 1907 р. цементация порід уперше була застосована для великої гідротехнічної споруди з метою боротьби з фільтрацією в основі дамби Нью-Кротон (США) заввишки 72 м. Починаючи з цього часу впродовж понад 70 років спосіб цементации одержав значний розвиток. Пневматичний спосіб нагнітання цементного розчину поступається місцем гідравлічній ін'єкції, здійснюваній із застосуванням циркуляційного способу нагнітання. Виникає високонапірна цементация при широкому діапазоні консистенцій цементацийних розчинів, що нагнітаються. У зв'язку з цим удосконалюється різне устаткування для приготування і нагнітання розчинів і створюється спеціальна вимірювальна апаратура, що дозволяє контролювати тиск цементацийних розчинів у породах. Для цементации тонких тріщин розроблені спеціальні добавки і відповідна технологія робіт.

Проте, незважаючи на широкий виробничий розвиток, спосіб цементации лише в останні десятиліття став об'єктом спеціальних досліджень. Значний розвиток ці дослідження одержали в СРСР у післявоєнний період у зв'язку з широким застосуванням способу цементации на різних роботах. При відновленні споруд ДніпроГЕС спосіб цементации був застосований як один з основних відновних заходів. Цим способом було укріплено близько 200 тис. м<sup>3</sup> бетонних і залізобетонних конструкцій.

У гідротехнічному будівництві спосіб цементації нині застосовується:

- для створення протифільтраційних завіс в основі споруд і для зміцнення основ;

- надання монолітності і водонепроникності бетонним спорудам;

- ущільнення й обтискання тунельних обробок і для зміцнення оточуючої тунель породи.

У сучасному гідротехнічному будівництві немає майже жодного крупного об'єкта, який зводився б на тріщинуватих скельних породах або пористих піщаних ґрунтах без застосування цементації або іншого ін'єкційного способу. Крім гідроенергетичного та іригаційного будівництва, спосіб цементації застосовується в умовах морського гідротехнічного будівництва для ремонту бетонних і кам'яних кладок (доків, молів, набережних і т. п.). На залізничному транспорті при ремонті і відновленні мостових опор та інших споруд також широко використовується спосіб цементації. У промисловому будівництві цементацію застосовують для зміцнення головним чином галькових і гравелистих порід під фундаментами важких споруд і для зменшення водопроникності цих порід.

**Силікатизація.** До простих способів силікатизації належать найбільш старі прийоми, розроблені за кордоном Єзерським та Іостеном (Німеччина). Подальше розроблення способу силікатизації проводилося у СРСР під керівництвом Б.О. Ржаніцина.

Будівництво першої черги Московського метрополітену вимагало зміцнення ґрунтів під фундаментами будівель і споруд, розташованих на трасі або поблизу неї. Цементация піщаних ґрунтів у даному випадку виявилася неможливою, оскільки цементний розчин, що нагнітався, створював розриви, а не цементував ґрунт. У зв'язку з цим Б.О. Ржаніциним у 1931 р. був розроблений спосіб дворозчинної силікатизації, сутність якого полягала в тому, що в піщаний ґрунт будь-якої вологості через забиту металеву перфоровану трубу (ін'єктор) по черзі нагніталися розчин силікату натрію і розчин хлористого кальцію. Разом із застосуванням на об'єктах, пов'язаних із будівництвом Московського метрополітену, спосіб був успішно застосований

при зведенні ряду об'єктів: кінотеатру «Москва», сцени Великого театру у м. Москві, корпусів Горьківського автозаводу (тепер м. Нижній Новгород), Магнітогорської греблі і т. д.

Розвиток гідротехнічного будівництва вимагав розроблення нових способів, оскільки спосіб дворозчинної силікатизації, зважаючи на значну в'язкість розчину силікату натрію, виявився непридатним для закріплення таких ґрунтів, як, наприклад, доломітова мука, що залягала в основі Куйбишевського гідровузла, який намічався до будівництва. У результаті був розроблений однорозчинний спосіб силікатизації, який надав можливість просочити доломітову муку і, використовуючи її хімічну активність, перетворити її на водонепроникний камінь.

У зв'язку з будівництвом Дніпровської греблі почалося широке будівництво заводів і житлових будівель у м. Запоріжжі, розташованому на просадних ґрунтах. Товща просадних лесів у 10÷12 м характеризувалася великою пористістю і наявністю макропор, у результаті чого фундаменти промислових і цивільних будівель давали великі (до 60 см) нерівномірні осідання. Будівництво на таких просадних лесових ґрунтах вимагало усунення просідання і підвищення міцності цих ґрунтів. Запропонований спосіб глибинного ущільнення просадної товщі шляхом улаштування ґрунтових паль знижував просадні явища в лесі, але залишав можливість нерівномірних осідань. У зв'язку з цим у післявоєнні роки при будівництві на алюмінієвому заводі в м. Запоріжжі чотирьох труб висотою по 120 м, за рекомендацією М.М. Герсєванова був уперше застосований спосіб однорозчинної силікатизації лесів. За цим способом у ґрунт, що підлягає закріпленню, через систему ін'єкторів нагнітається один розчин силікату натрію з невеликою густиною ( $\rho = 1,13 \text{ г/см}^3$ ). У результаті хімічної реакції між розчином силікату натрію і солями ґрунту ґрунт міцно закріплюється, набуваючи водостійкості.

Окрім Запоріжжя, спосіб однорозчинної силікатизації лесів був також успішно застосований для припинення нерівномірних осідань фундаментів Одеського театру опери і балету. Будівля театру через нерівномірні осідання фундаменту на 4÷5 мм на рік за 80 років існування (до 1956 р.) прийшла в аварійний стан. Після застосування способу однорозчинної силікатизації осідання



припинилися. Надалі цей спосіб був застосований на декількох сотнях об'єктів промислового і житлового будівництва, побудованих раніше на ущільнених ґрунтах.

У 1983 р. цей спосіб був рекомендований для припинення нерівномірних осідань будівель і споруд на «Атоммаші» і у м. Волгодонську. Спосіб однорозчинної силікатизації лесів застосовується лише при вологості ґрунтів не більше 17 %. Однак у багатьох випадках, наприклад у м. Волгодонську і на «Атоммаші», вологість лесу перевищує 17 %. У цьому випадку іноді застосовувалася газова силікатизація. При цьому в закріплюваний лес через забиті ін'єктори або свердловини подавали під невеликим тиском вуглекислий газ, потім розчин силікату натрію і знову вуглекислий газ.

Одним із перших практичне застосування у способі однорозчинної силікатизації одержав склад на основі силікату натрію і ортофосфорної кислоти, яка дозволила добре регулювати час гелеутворення. Під час Великої Вітчизняної війни цей спосіб був застосований на промислах «Сизраньнафти», що дозволило збільшити видобуток нафти із свердловин у 2÷3 рази. Подальшого розвитку спосіб однорозчинної силікатизації отримав на роботах, пов'язаних з реставрацією пам'яток архітектури Московського Кремля. Тут сім об'єктів мали незатухаючі нерівномірні осідання фундаментів. На двох об'єктах під фундаментами залягав дрібний пісок з великим включенням органіки. Пісок, що містить гумус, не міг бути закріплений існуючими способами. Це вимагало розроблення нової рецептури, заснованої на змішуванні розчину силікату натрію з кремнефтористоводневою кислотою. Така рецептура добре закріплювала гумусовані піски, особливо після їх попередньої обробки кремнефтористоводневою кислотою. Для збільшення часу гелеутворення вихідні реагенти заздалегідь охолоджувалися і змішувалися безпосередньо перед закачуванням у ґрунт.

Нарешті, найбільшим за об'ємом застосування способом однорозчинної силікатизації з'явилося створення протифільтраційної водонепроникної завіси в основі висотної Асуанської греблі (Єгипет). Для цього об'єкта були розроблені спеціальні рецептури, засновані на взаємодії розчинів силікату натрію та алюмінату натрію, а також рецептура гелеутворюючого

розчину, що складається з глинистого розчину і малих добавок силікату натрію. Ці розчини ін'єктувалися у водонасичені піски в умовах рухомих ґрунтових вод.

**Електрохімічне закріплення ґрунтів.** Спосіб електросилікатизації вперше був застосований для закріплення ґрунтів під фундаментами будівель у Польщі. Сутність польського способу полягала у послідовному введенні в ґрунт через сталеві ін'єктори розчинів силікату натрію і хлористого кальцію. Потім на ін'єктори, які служили одночасно електродами, накладався постійний електричний струм. Дещо пізніше спосіб став застосовуватися з деякими змінами в Румунії, Китаї, Японії. Рецептúra румунського способу не відрізнялася від рецептúри польського, але для збільшення зони розповсюдження розчинів було застосовано не тільки нагнітання під тиском, але і створення в катодних електродах вакууму. У китайському способі як перший розчин застосовувалася суміш, що складається з силікату натрію, алюмінієвих квасців і хлористого кальцію, як другий – хлористий кальцій. Японський спосіб відрізнявся нижчою концентрацією розчинів силікату натрію і хлористого кальцію. При закріпленні глинистих ґрунтів у катодний електрод заливався розчин силікату натрію, в анодний – розчин хлористого кальцію; при закріпленні піщаних ґрунтів – навпаки.

У практиці каналізаційного будівництва в Москві при проходці траншей в суглинних і мулистих ґрунтах, що залягають нижче рівня ґрунтових вод, описані раніше способи, засновані на нагнітанні розчинів, виявилися непридатними через напір ґрунтових вод і поведінку ґрунтів як пливунів. Аналогічні випадки зустрічаються у шахтному, гідротехнічному і дорожньому будівництві. У зв'язку з цим виникла необхідність розроблення способів зміцнення таких ґрунтів. Досить успішним виявився спосіб електрохімічного закріплення ґрунту. У цьому способі на ґрунти впливають постійним електричним полем через електроди, відстань між якими складає 0,5÷1,0 м при напрузі струму від 50 до 100 В. Для закріплення слабких малопроникних ґрунтів, представлених дрібними пісками, суглинками і супісками, розроблено спосіб комбінованого застосування постійного електричного струму та хімічних розчинів. Цей спосіб застосовували при проходці колодязів у розрідженому

ґрунті-пливуні, для збільшення несучої здатності палъ, забитих у рідкий мулистий ґрунт, а також для боротьби із зсувами укосів і обдиманням ґрунтів.

Велике значення при використанні постійного електричного струму має явище електроосмосу. Завдяки йому можна зневоднювати значні масиви малопроникних ґрунтів при проходці траншей і розкритті котлованів. Значний ефект дає електрохімічний спосіб для закріплення вологих глинистих ґрунтів. При пропусканні струму через уведені в ґрунт металеві електроди катіони заліза, відриваючись від анода, утворюють у водному середовищі гідроксид  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Одновалентні катіони (натрій і калій) на поверхні глинистих частинок заміщаються в решті-решт тривалентними катіонами заліза, що призводить до ущільнення глини і відтискання води до катода. Спосіб застосовується лише за наявності води в ґрунті.

**Смолизація.** Розвиток у СРСР у 1960-х рр. хімії полімерів сприяв використанню для закріплення ґрунтів синтетичних смол. Сутність способу полягає в нагнітанні в ґрунт гелеутворюючого розчину, що складається з розчину смоли й отверджувача. Для цих цілей смоли повинні мати невисоку в'язкість і полімеризуватися в порах ґрунту при температурі від 4 до 10 °С. До таких смол належать: сечовино-формальдегідні (карбамідні), фенольні, фуранові, акрилові, епоксидні. У колишньому Радянському Союзі було проведено багато досліджень з використання різних смол, зокрема фуранових, акрилових, резорцинформальдегідних, хромлігнінових, фенолформальдегідних і сечовино-формальдегідних. Смоли для закріплення ґрунтів використовувалися і в США, Японії, при цьому найширше – акрилова смола та її похідні. Акрилові смоли можуть бути використані в основному при улаштуванні завіс у гідротехнічному будівництві. Однак вартість акрилових смол є високою, у зв'язку з чим їх застосування для ґрунтів обмежене.

Найприйнятнішою для закріплення ґрунтів за всіма критеріями є сечовино-формальдегідна (карбамідна) смола з різними отверджувачами. Вона легко розчиняється у воді, має малу в'язкість, отверджується при невисокій температурі, а найголовніше – випускається промисловістю у вигляді клеїв у великому масштабі, і серед смол є найбільш дешевою і

доступною для широкого використання при закріпленні ґрунтів. Першим із об'єктів, де була застосована смолизація, був завод «Карболіт» у м. Орехово-Зуєві (закріплення основи колон), другим – сцена Ленінградського театру опери і балету ім. С.М. Кірова (зміцнення фундаментів). Значним за об'ємом робіт було застосування цього способу на Ново-Липецькому металургійному комбінаті (зміцнення ґрунтів під фундаментами колон цеху, що реконструювався). Смолизація застосовувалась також для підсилення основ будівлі Московської консерваторії, пам'ятників архітектури Московського Кремля, підпірних стін при зведенні колектора і т. д.

### **1.3.2. Границі застосування хімічних способів закріплення ґрунтів**

Границі застосування різних способів закріплення ґрунтів встановлені за коефіцієнтом фільтрації ґрунтів і за властивостями, які вони надають закріпленому ґрунту (табл. 1.1, рис. 1.18).

З урахуванням цього способи поділяються на такі групи:

- 1) ті, що різко підвищують механічну міцність і водонепроникність ґрунту;
- 2) надають закріплюваному ґрунту тільки водонепроникність;
- 3) збільшують водостійкість і щільність ґрунту (зневоднюють глинисті і мулисті ґрунти).



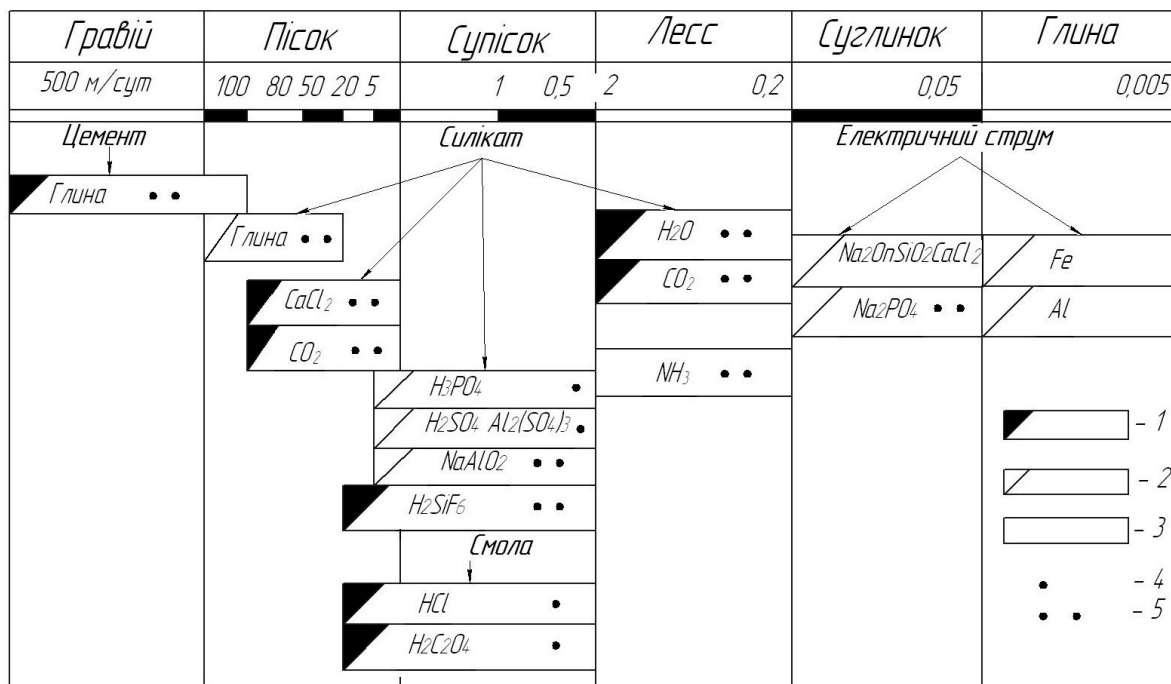


Рис. 1.18. Границі застосування різних способів закріплення ґрунтів:

1 – закріплення з міцністю до 5 МПа; 2 – ущільнення з міцністю від 0,2 до 0,5 МПа; 3 – стабілізація; 4 – кислий гель; 5 – лужний гель

Із рис. 1.18 видно, що цементацію слід застосовувати для міцного закріплення гравелистих і піщаних ґрунтів з коефіцієнтом фільтрації від 80 до 500 м/доб. Нижня границя характеризується крупними пісками, у пори яких можуть проникати частинки цементу сучасного способу помелу.

Для надання водонепроникності в основному піщаним ґрунтам, в яких застосування цементу фізично неможливе, його замінюють силікатними і глиносилікатними розчинами, які можуть надавати водонепроникності піщаним ґрунтам з коефіцієнтом фільтрації від 20 до 100 м/доб. Міцне закріплення піщаного ґрунту здійснюється шляхом застосування способу дворозчинної силікатизації. Цей спосіб доцільно застосовувати в ґрунтах з коефіцієнтом фільтрації від 2 до 80 м/доб. Міцне закріплення піщаних ґрунтів з наданням масиву водонепроникності виконується способом смолизації, якщо ґрунт має коефіцієнт фільтрації від 0,5 до 20 м/доб.

Ряд способів однорозчинної силікатизації (з фосфорною кислотою, з сірчаною кислотою і сірчаноокислим алюмінієм, з алюмінатом натрію та ін.) може застосовуватися в піщаних ґрунтах з коефіцієнтом фільтрації від 0,5 до 5 м/доб. Ці способи надають ґрунтам, головним чином, водонепроникності. Спосіб однорозчинної силікатизації із застосуванням кремнефтористоводневої кислоти надає піщаним ґрунтам значної міцності і водонепроникності і може бути застосований у ґрунтах з коефіцієнтом фільтрації від 0,5 до 20 м/доб. Спосіб однорозчинної силікатизації, при якому використовуються хімічно активні речовини самого ґрунту, призначений для закріплення лесових просадних ґрунтів. Спосіб застосовується в просадних ґрунтах з коефіцієнтом фільтрації від 0,2 до 2,0 м/доб, причому вологість його не повинна перевищувати 17 %, тобто товща лесу повинна знаходитися вище рівня ґрунтових вод. При більшій вологості, порядку 20–22 %, застосовується газова силікатизація, коли спочатку в ґрунт нагнітається вуглекислий газ, потім силікат і знову вуглекислий газ. Проведення цих робіт може здійснюватися тільки дуже досвідченими спеціалістами. У результаті застосування газової силікатизації ґрунту надається міцність і водостійкість.

Спосіб електрохімічного закріплення дозволяє надати глинистим ґрунтам водостійкості, тобто ліквідувати розмокання і набухання у воді. Галузь застосування цього способу обмежується такими значеннями коефіцієнта фільтрації: при дворозчинній електросилікатизації від 0,05 до 0,2 м/доб, при однорозчинній – від 0,005 до 0,2 м/доб. У цих межах електричний струм збільшує проникнення розчину в ґрунт у  $1,5 \div 2$  рази.

#### **1.4. Фізико-хімічні основи способів закріплення ґрунтів**

##### ***1.4.1. Закріплення й ущільнення тріщинуватих скельних, гравійно-галькових ґрунтів і крупнозернистих пісків***

*Цементация.* Залежно від характеру, умов залягання і фільтраційних властивостей ґрунту цементацияні свердловини повинні закладатися за певною системою, що гарантує створення найбільш ефективної завіси. Можливість застосування способу

цементациі залежить від швидкості фільтраційного потоку і хімічного складу ґрунтових вод. Проникнення частинок цементу в тріщини або пори ґрунту залежить від розмірів цих тріщин або пір, їх конфігурації і взаємного зв'язку, розмірів частинок цементу, складу розчину для цементациі, і, нарешті, режиму нагнітання. Ці чинники лімітують можливість застосування способу цементациі. Проте з розвитком сучасної техніки робіт і вдосконалення матеріалів, наприклад цементів, що мають спеціальні властивості, і особливих добавок, згадані обмеження поступово втрачають своє значення, і галузь застосування способу цементациі стає все більш великою.

Цементи, що випускаються нашою промисловістю, містять в основному частинки розміром від 1 до 120 мкм, причому майже половина цієї кількості припадає на частинки розміром менше 40 мкм і близько чверті – на частинки розміром менше 10 мкм. Таким чином, є досить сприятливі умови для заповнення дрібних тріщин і пір частинками цементу. Труднощі виникають при складній конфігурації тріщин і відсутності прямого зв'язку між їх окремими групами. Не завжди вдається підібрати оптимальний склад цементацийного розчину і своєчасно змінити його консистенцію, збільшуючи тиск нагнітання в процесі цементациі. При заповненні розчином крупних тріщин і каверн часто передчасно закривається доступ до дрібних тріщин, що залишаються незацементованими. Тому величезну роль відіграє правильний вибір режиму нагнітання і максимального значення тиску, яке не завжди може бути збільшено в потрібних межах. Практика цементациі показала, що при застосуванні цементів, які задовольняють за тониною помелу вимогам ДСТУ, при правильному призначенні консистенцій розчинів, що нагнітаються, і режиму тиску може бути досягнута задовільна цементация тріщин розміром приблизно 0,1 мм (100 мкм). При застосуванні цементів особливо тонкого помелу (питома поверхня більше 4000 см<sup>2</sup>/г) якість цементациі тонких тріщин істотно поліпшується. Для цементациі ще тонших тріщин, ніж вказано вище, необхідно вживати спеціальні заходи.

Тужавіння і твердіння цементацийного розчину можливе лише при такому фільтраційному режимі, при якому не відбувається вимивання цементу з розчину, що не затужавів.



Питання про допустиму швидкість фільтраційного потоку до теперішнього часу мало вивчене. Дія фільтраційного потоку на розчин може бути різною залежно від щільності одержаного осаду цементних частинок у тріщинах, від характеру і розташування самих тріщин і т. п. Лабораторні дослідження цієї задачі можуть лише приблизно моделювати умови, що існують у природі, тому найбільше значення мають спостереження, зроблені в натурних умовах. Значення критичної швидкості, небезпечної для вимивання ґрунтових частинок розміром  $0,03 \div 0,05$  мм, змінюються і складають  $0,017 \div 0,022$  м/с. Як допустиме для цементації значення дійсної швидкості ґрунтових вод встановлено 600 м/доб. При швидкостях ґрунтових вод більше вказаного значення можливість застосування цементації повинна бути встановлена дослідним шляхом. Для прискорення тужавіння і твердіння цементу застосовуються відповідні прискорювачі, завдяки чому небезпека розмиву цементаційного розчину може бути значно зменшена. При розрахунках ґрунту на стійкість проти механічної суфозії вважається достатнім співвідношення між дійсною швидкістю фільтрації і критичною швидкістю, яке дорівнює 2,0.

Довговічність цементаційної завіси визначається стійкістю застосованого виду цементу проти агресивної дії ґрунтових вод. Залежно від хімічного складу ґрунтові води мають ту або іншу агресивність відносно цементів. Можливі такі види агресивності вод: лужна, вуглекислотна, загальнокислотна, сульфатна і магнезійна. Розвиток процесів корозії цементного каменю, спричинених агресивними водами, протікає в часі по-різному: залежно від ступеня мінералізації ґрунтових вод, щільності цементного каменю, градієнта фільтраційного напору, витрати фільтрації, температури води та ін. З деякими видами агресивності вод (наприклад, лужною і сульфатною) існують дієві способи боротьби, що підвищують довговічність цементного каменю. Зараз цементною промисловістю випускаються деякі спеціальні цементації, що мають високу корозійну стійкість проти дії сульфатних вод, м'яких вод та ін. Визначення ознак і норм агресивності води і вибір відповідного виду цементу повинні проводитися відповідно до вимог діючих норм.

Головні переваги способу цементації, що сприяли широкому розповсюдженню його в будівництві, полягають у технічній простоті, зручності застосування і високій надійності результатів, що досягаються. Крім того, спосіб цементації досить економічний (він дешевше, наприклад, силікатизації і бітумізації) і не вимагає складного обладнання. Часто в склад для нагнітання, крім цементу, вводять у певних співвідношеннях глину (бентоніт), золу, мелений пісок та інші мікродобавки, головним чином для зниження вартості нагнітання.

*Цементация суперпластифікованою цементно-водною суспензією.* Недоліками звичайної цементації, зокрема з добавками-мікронаповнювачами, є низька міцність (через дуже високе В/Ц) і низька проникна здатність (через флокуляцію цементних частинок). На відміну від складів для звичайної цементації, суперпластифікована цементно-водна суспензія (СПЦВС), розроблена в УкрДАЗТі, має високу міцність (близько 50 МПа) і високу проникну здатність (за глибиною і товщиною тріщин) при нагнітанні в тріщинуваті гірські породи, гравійно-галькові та крупні піщані ґрунти. Це досягається тим, що до складу суміші вводиться добавка-суперпластифікатор, наприклад С-3 в оптимальній кількості (0,2÷0,3 % від цементу), водоцементне відношення зменшується до 0,3÷0,35, за необхідності додається NaCl у кількості 2 % від витрати цементу. Нагнітання такої суспензії проводиться так само, як і при звичайній цементації.

*Гаряче бітумування.* Спосіб гарячого бітумування служить для створення протифільтраційних завіс у тріщинуватих скельних, а також гравійно-галечних ґрунтах. Сутність способу полягає в нагнітанні розігрітого до температури близько 200 °С бітуму під тиском у свердловини, пробурені в ґрунті. Збереження високої температури бітуму в свердловині забезпечується застосуванням спеціальних пристроїв для електропрогрівання або паропрогрівання бітуму. Позитивною особливістю способу гарячого бітумування, на відміну від інших способів, є можливість його застосування в умовах високих швидкостей фільтраційного потоку. Здійснення повторних нагнітань в одну і ту саму свердловину сприяє доброму заповненню тріщин у породі. Інша важлива перевага цього способу полягає у високій

корозійній стійкості бітуму, що дозволяє застосовувати бітумування в умовах дії сильно агресивних вод. Недоліками способу гарячого бітумування є здатність бітуму до пластичних деформацій (течії) під тривалою дією гідростатичного напору і важкість заповнення дрібних тріщин. Громіздкість і складність устаткування, призначеного для розігрівання бітуму до високих температур і подальшого підігріву його в свердловинах, ускладнюють застосування цього способу для створення протифільтраційних завіс із тіла греблі (із оглядових галерей) або із гірничих виробок.

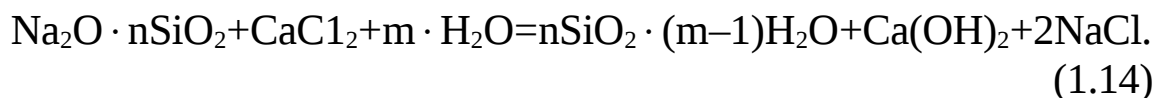
Галузь застосування способу гарячого бітумування обмежується переважно тріщинуватими породами при розмірах тріщин більше 0,2–0,3 мм; при менших розмірах тріщин заповнення їх бітумом не досягається. При нагнітанні бітуму не завжди забезпечується хороший зв'язок його зі стінками тріщин у породі. При гравієвих ґрунтах, як довели досліди, бітум не завжди задовільно зчеплюється з окатаною (гладкою) поверхнею гравію. Істотною є та обставина, що спосіб гарячого бітумування, як, втім, і холодного, не дає зміцнюючого ефекту і, отже, не може запобігти деформаціям або просіданням ґрунту під дією власної ваги споруди. У результаті процесу коагуляції, що викликається деякими електrolітами або складними ефірами жирних кислот, частинки бітуму заповнюють пори і тріщини в ґрунті, додаючи йому водонепроникності. Бітумні емульсії цілком придатні для ущільнення піщаних ґрунтів і дуже тонких тріщин скельних порід.

#### **1.4.2. Закріплення піщаних ґрунтів**

*Спосіб дворозчинної силікатизації.* Спосіб дворозчинної силікатизації ґрунтів здійснюється шляхом забивання в закріплюваний ґрунт системи металевих ін'єкторів, через які по черзі нагнітають розчин силікату натрію зі щільністю  $1,35 \div 1,44$  г/см<sup>3</sup> і розчин хлористого кальцію зі щільністю  $1,26 \div 1,28$  г/см<sup>3</sup>. У результаті фізико-хімічної реакції між цими розчинами утворюється цементуюче новоутворення – гель кремневої кислоти, що надає закріплюваному ґрунту в короткі терміни достатньо високої міцності і водонепроникності. У такому варіанті цей спосіб був запропонований у 1926 р.

Р. Юстеном, а в 1929 р. його застосували для створення протифільтраційних завіс на калійній копальні в Унтербрецбахе в Німеччині.

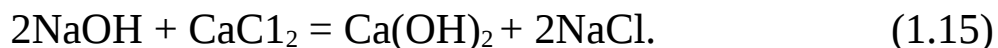
Великі дослідження за дворозчинним способом були проведені в 1931 р. Б.О. Ржаніциним, який основну реакцію взаємодії розчину силікату натрію з хлористим кальцієм уявляв за такою схемою:



Наведену схему Б.О. Ржаніцин пояснював таким чином. При взаємодії розчину хлористого кальцію з розчином рідкого скла на границі розділу утворюється плівка кремневої кислоти  $n\text{SiO}_2 \cdot (m-1)\text{H}_2\text{O}$ . Через цю плівку з розчину рідкого скла в розчин хлористого кальцію дифундує луг, який з хлористим кальцієм утворює гідрат окислу кальцію  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  і хлористий натрій  $\text{NaCl}$ . Розчин рідкого скла внаслідок збіднення лугом поступово желатинізується і, нарешті, цілком переходить у гідрогель кремневої кислоти.

В.Є. Соколович на основі проведених власних експериментів і з урахуванням уявлень Б.О. Ржаніцина пояснює реакцію взаємодії розчину силікату натрію з хлористим кальцієм таким чином:

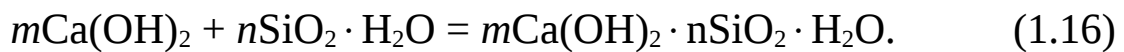
1. При взаємодії концентрованих розчинів силікату натрію, що вже знаходяться в піску, з хлористим кальцієм, що нагнітається потім, у приграничному шарі утворюється тверда, нерозчинна фаза  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , тобто



Нерозчинність  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в цих умовах обумовлена присутністю в розчині силікату натрію великої кількості їдкого натрію, що є більш сильним лугом і має набагато більш високу розчинність у воді, ніж  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

2. На твердій фазі гідрату окислу кальцію адсорбується кремнева кислота, внаслідок чого виникають цементуючі

новоутворення у вигляді достатньо міцних і нерозчинних гідросилікатів кальцію  $m\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot n\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ :



Цементуючі новоутворення у вигляді тонких плівок виникають у пристінному шарі капіляра і не перешкоджають подальшому проникненню розчину хлористого кальцію в розчин силікату натрію.

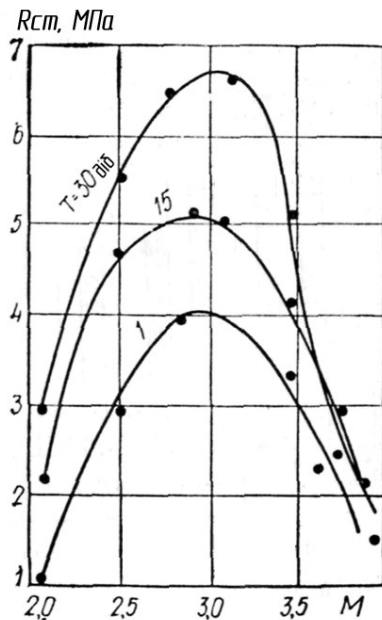
З подальшим витісненням із капіляра розчину силікату натрію розчином хлористого кальцію в приграничному шарі «силікат натрію – хлористий кальцій» відбувається зменшення концентрацій цих солей, одночасно підвищується розчинність  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , що утворюється в цій зоні вже в меншій кількості. У цих умовах у лобовій частині рухомих розчинів спостерігається утворення пластівців і агрегатів слабого гелю кремневої кислоти, що закривають капіляр по всьому його перерізу.

Спосіб дворозчинної силікатизації застосовується для закріплення маловологих і водонасичених пісків з коефіцієнтом фільтрації  $2 \div 80$  м/доб. Радіус закріплення для пісків з коефіцієнтом фільтрації  $2 \div 20$  м/доб складає  $0,3 \div 0,6$  м, а для пісків з коефіцієнтом фільтрації  $20 \div 80$  м/доб –  $0,6 \div 1$  м. Міцність закріплених пісків на одноосний стиск досягає  $2 \div 4$  МПа. На міцність закріплення суттєво впливає величина модуля силікатного розчину. Низькомодульні розчини з модулем близько 1 не забезпечують міцного закріплення пісків. Міцність закріплення пісків збільшується з підвищенням силікатного модуля і досягає свого максимального значення при модулі  $2,7 \div 3$ . Подальше підвищення величини модуля розчину силікату натрію знижує міцність закріплення пісків, що обумовлено значним підвищенням в'язкості розчину, яка обмежує радіус закріплення (рис. 1.19, а). Міцність закріпленого дворозчинною силікатизацією ґрунту значною мірою залежить також від щільності рідкого скла (рис. 1.19, б).

На підставі сказаного рекомендованими для закріплення ґрунтів дворозчинним способом є робочі склади, до яких входить розчин силікату натрію з модулем  $2,75 \div 3,0$  і щільністю від 1,33 до 1,45 г/см<sup>3</sup>. Міцність при цьому досягає  $5,0 \div 6,0$  МПа.

Окрім високої міцності, ґрунт після закріплення набуває водонепроникності і стійкості в агресивних середовищах.

а)



б)

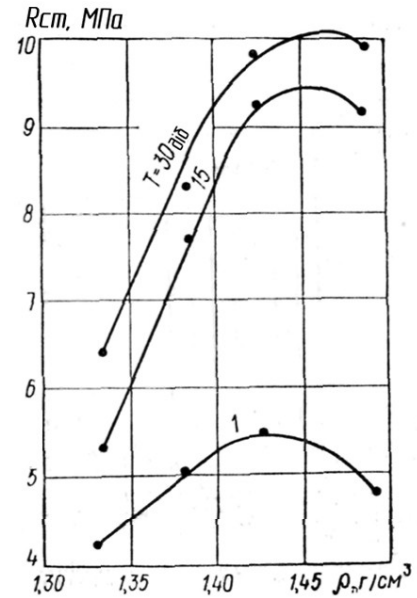


Рис. 1.19. Залежність міцності на стиск  $R_{CT}$  закріпленого ґрунту від модуля  $M$  (а) і густини  $\rho$  (б) силікатного розчину

Спосіб однорозчинної силікатизації було запропоновано у 1939 р. у зв'язку з вирішенням проблеми хімічного закріплення слабкофільтруючих, нестійких у часі прошарків і лінз доломітової муки, що залягають у скельній основі Куйбишевської греблі у створі «Червона Глинка». Існуючий тоді єдиний спосіб дворозчинної силікатизації виявився непридатним для закріплення слабкофільтруючої доломітової муки, що має коефіцієнт фільтрації менше 2 м/доб.

Сутність способу однорозчинної силікатизації полягає в нагнітанні в закріплюваний ґрунт розчину силікату натрію з попередньо введеною в нього хімічною добавкою, що призводить у строго певний час до утворення гелю кремневої кислоти, що цементує ґрунт. Закріплений ґрунт набуває водостійкого закріплення і водонепроникності. Назва способу не від ображає його сутності, оскільки в закріплюваний ґрунт нагнітається одночасно не один розчин, а суміш розчинів, тобто розчин

силікату натрію з добавкою отверджуючого реагенту. Останній у свою чергу може складатися також з декількох реагентів. Як коагулюючі (отверджуючі) хімічні реагенти для затвердіння розчину силікату натрію застосовуються розчини кислот, кислих солей і органічних отверджувачів. Найбільш поширеними з числа вказаних отверджувачів для однорозчинної силікатизації є кремнефтористоводнева кислота  $H_2SiF_6$  і кремнефтористий натрій  $Na_2SiF_6$ . Менш поширеними – алюмінат натрію  $NaAlO_2$  і органічні отверджувачі – етилацетатні і формамідні. Відповідні рецептури одержали назви силікатно-кремнефтористоводнева, силікатно-кремнефтористонатрієва, алюмосилікатна, силікатно-органічна. До однорозчинної належать також достатньо широко поширені рецептура для вуглекислотної (газової) силікатизації і глино-силікатна рецептура. Багато інших отверджувачів і відповідні рецептури (силікатно-фосфорнокисла, силікатно-алюмосернокисла, амонійно-силікатна, силікатно-фтористосернокисла, силікатно-органічна і газова силікатизація) розповсюдження не отримали через дефіцитність, високу вартість, а також через складності технологічного процесу.

Усі способи однорозчинної силікатизації засновані на створенні гелеутворюючих розчинів з малою в'язкістю, яка повинна зберігатися протягом всього часу нагнітання розчину в ґрунт. Тривалість нагнітання залежить від проникності ґрунту в даній зоні розповсюдження розчину. Отже, закріплюючі розчини повинні мати регульований час гелеутворення. За час гелеутворення приймається період між моментом закінчення введення отверджувача в основний розчин і моментом переходу приготованої суміші із рідкого стану в желеподібний. Усі рецептури способу однорозчинної силікатизації поділяються на дві категорії: перша – для міцного закріплення ґрунтів, друга – для ущільнення водопроникних порід з метою створення протифільтраційних завіс або як тимчасовий захід, що забезпечує розкриття котлованів або зменшення притоку ґрунтових вод.

До першої категорії належить рецептура, створена на основі силікату натрію і кремнефтористоводневої кислоти. Вона дозволяє закріплювати ґрунти з широким діапазоном міцності: від 0,15 до 4,0 МПа. Міцне закріплення забезпечується розчинами підвищеної щільності:  $1,3 \text{ г/см}^3$  для силікату і  $1,13 \text{ г/см}^3$  для

кремнефтористоводневої кислоти (рис. 1.20). Протягом 24 год міцність досягає 1,5 МПа, а через 28 діб – 4,0 МПа за умови попереднього охолодження робочих розчинів. Використання цієї рецептури без охолодження вихідних розчинів різко скорочує час гелеутворення, що скорочує період нагнітання розчинів у ґрунт, але не знижує міцності. Рецептури другої групи з розчинами зниженої щільності ( $1,04 \text{ г/см}^3$  для силікату натрію і  $1,037 \text{ г/см}^3$  для  $\text{H}_2\text{SiF}_6$ ), час гелеутворення яких добре регулюється при звичайній температурі, дає невисоку міцність близько 0,25 МПа і використовується для ущільнення ґрунту. Як і при всіх способах закріплення, гранулометричний склад ґрунту і його водопроникність впливають на міцність закріплення. На рис. 1.21 показано наростання з часом міцності ґрунтів з різним коефіцієнтом фільтрації.

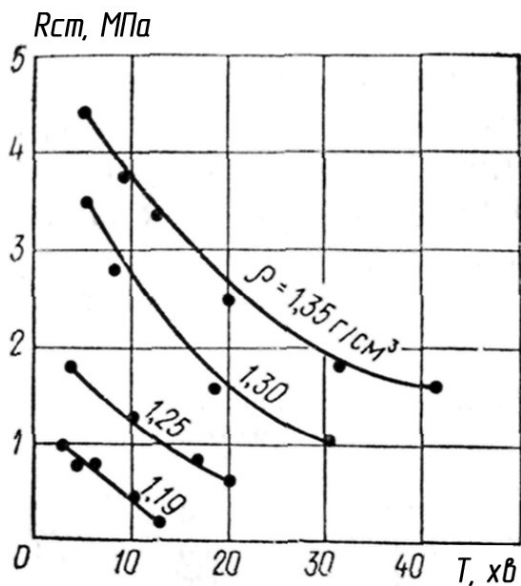


Рис. 1.20. Вплив часу гелеутворення  $T$  силікату натрію з різною щільністю  $\rho$  при отвердженні його  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  зі щільністю  $1,13 \text{ г/см}^3$  на міцність  $R_{ct}$  ґрунту на стиск

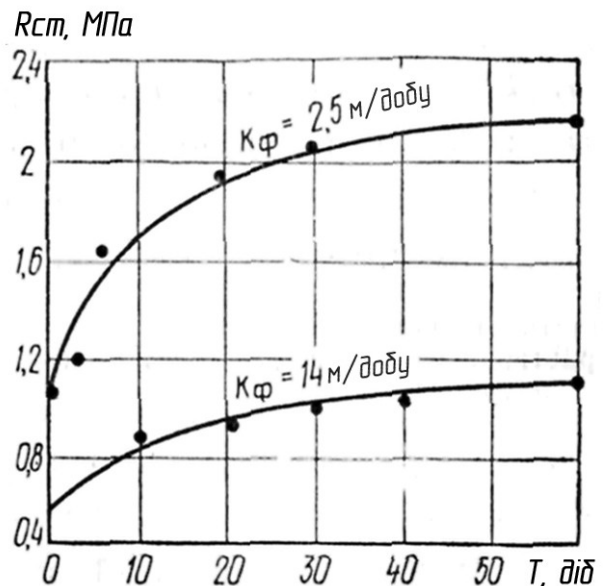


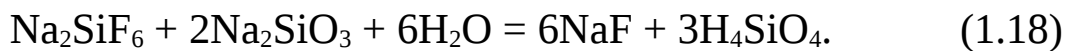
Рис. 1.21. Вплив коефіцієнта фільтрації ґрунту  $K_f$  на міцність його закріплення розбавленими розчинами силікату натрію і  $\text{H}_2\text{SiF}_6$

При закріпленні піщаних ґрунтів способом газової силікатизації, коли ґрунт додатково активізується  $\text{CO}_2$  до і після нагнітання розчину силікату натрію, на міцність закріплення впливають, як і при дворозчинному способі, щільність і модуль силікату натрію, а крім того, карбонатність ґрунту. Нижче



наведені фізико-хімічні основи кожної із згаданих рецептур, які застосовуються для закріплення дрібних пісків з коефіцієнтом фільтрації від 0,5 до 2,0 м/доб.

**Силікатно-кремнефтористоводнева рецептура.** Як отверджувач силікатного розчину в цій рецептурі використовується кремнефтористоводнева кислота  $\text{H}_2\text{SiF}_6$ . Взаємодія  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  з розчином силікату натрію відбувається в дві стадії:



Друга реакція носить уповільнений характер і обумовлена поступовим розкладанням аніона  $\text{SiF}_6^{2-}$ . Великою перевагою рецептури з використанням кремнефтористоводневої кислоти є великий вихід гелю кремнієвої кислоти, обумовлений додатковою кремнієвою кислотою, яка виділяється в результаті розкладання  $\text{H}_2\text{SiF}_6$ , що зміцнює гель кремнієвої кислоти. З цими компонентами були розроблені три види рецептур:

1) та, що забезпечує підвищену міцність закріплення при використанні концентрованого розчину силікату натрію з  $\rho = 1,3 \text{ г/см}^3$  і розчину  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  з  $\rho = 1,1 \div 1,13 \text{ г/см}^3$ ;

2) забезпечує отримання слабких гелів для створення в основному водонепроникних завіс при використанні розбавлених розчинів силікату натрію з  $\rho = 1,04 \text{ г/см}^3$  і  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  з  $\rho = 1,037 \text{ г/см}^3$ ;

3) забезпечує закріплення піщаного ґрунту при використанні тих самих розчинів, що і для першого виду, але з попередньою обробкою ґрунту кремнефтористоводневою кислотою в об'ємі гелеутворюючого розчину.

Останній варіант рецептури дозволяє міцно закріплювати піщані ґрунти, що містять значну кількість карбонатів, глинистих фракцій і гумусованих включень.

Зниження щільності  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  для збільшення часу гелеутворення в першому варіанті рецептури не дало відчутних результатів. Як видно із графіка на рис. 1.22, зниження густини  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  до  $1,05 \text{ г/см}^3$  дещо збільшило час гелеутворення – на 25 хв, але цього недостатньо для проведення робіт. До того ж унаслідок

зниження щільності використаної  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  різко знижується якість гелю. Усе це призвело до використання оптимальної рецептури, тобто силікату натрію з  $\rho = 1,30 \text{ г/см}^3$  і  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  з  $\rho = 1,13 \text{ г/см}^3$  із застосуванням охолодження вихідних розчинів перед нагнітанням. На рис. 1.23 надано графік, що показує збільшення часу гелеутворення при охолодженні розчинів до  $8^\circ\text{C}$ .

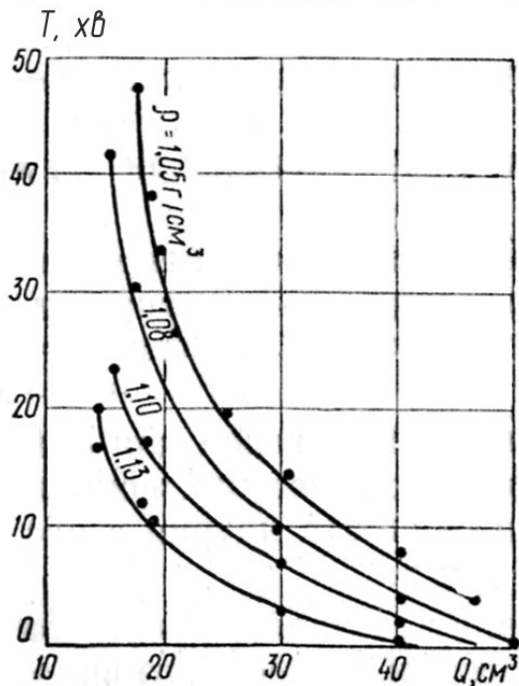


Рис. 1.22. Залежність часу гелеутворення  $T$  від об'єму  $Q$  і щільності  $\rho$  кремнефтористоводневої кислоти  $\text{H}_2\text{SiF}_6$

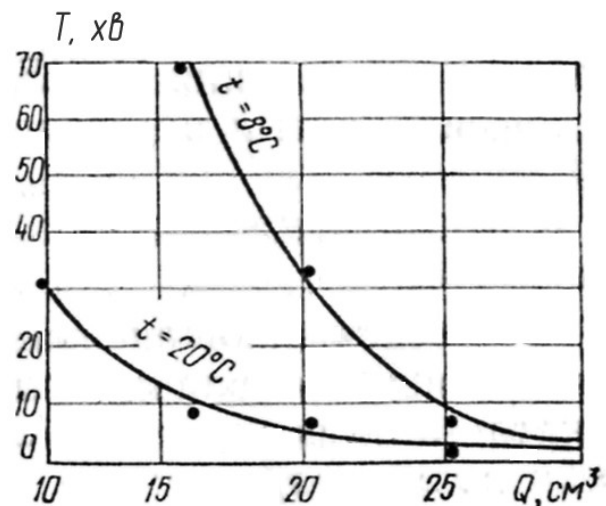


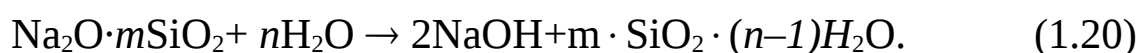
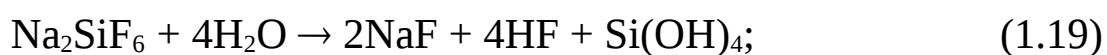
Рис. 1.23. Залежність часу гелеутворення  $T$  від об'єму  $Q$  кремнефтористоводневої кислоти  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  з  $\rho = 1,13 \text{ г/см}^3$  і температури  $t$  розчинів

Установлено, що на практиці можна ін'єктувати золь і неохолодженим, оскільки в ґрунті, температура якого, як правило, не перевищує  $10\text{--}12^\circ\text{C}$ , час гелеутворення подовжується, але при цьому розчин необхідно готувати малими порціями, щоб встигнути закачати його в період, поки його в'язкість різко не збільшиться (близько  $15\text{--}20$  хв). Це також ускладнює виробництво робіт. В'язкість золів цього варіанта рецептури не перевищує  $4\div 6 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ .

Рецептура третього варіанта заснована на попередній обробці ґрунту кремнефтористоводневою кислотою і за своїми властивостями не відрізняється від рецептури першого варіанта,

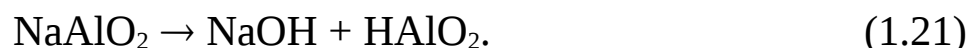
оскільки гелеутворюючий розчин складається з тих самих компонентів. Однак попередня обробка ґрунту додає йому підвищену міцність в межах 2,3÷3,0 МПа через 1 добу з подальшим зростанням до 5,0 МПа. І, нарешті, найважливіше те, що рецептура цього варіанта може бути застосована в будь-яких за карбонатністю і вмістом гумусових прошарків ґрунтах.

**Силікатно-кремнефтористонатрієва рецептура.** При використанні як отверджувача кремнефтористого натрію думки різних авторів про протікаючі реакції розходяться. Серед декількох запропонованих різними авторами реакцій хімічної взаємодії рідкого скла з кремнефтористим натрієм найбільш обґрунтованою вважається реакція, що протікає в дві стадії:



Сам процес твердіння розглядається більшістю дослідників як колоїдно-хімічний процес, в якому  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  є коагулюючим агентом. При цьому утворюється гель кремнієвої кислоти, який відкладається на поверхні наповнювача і цементує частинки матеріалу. При твердінні із силікатної маси видаляється не тільки вода, що міститься в рідкому склі, але і вода, адсорбована гелем  $\text{Si}(\text{OH})_4$ .

**Алюмосилікатна рецептура.** Алюмосилікатна рецептура була розроблена в 1961–1965 рр. Вона заснована на коагуляції розчину силікату натрію розчином алюмінату натрію  $\text{NaAlO}_2$ . Коагулюючу дію розчину алюмінату натрію обумовлено особливим хімізмом цієї сполуки у водних розчинах. У воді алюмінат натрію розкладається на кислоту і основу:



В алюмосилікатній рецептурі для закріплення дрібних пісків використовувався розчин силікату натрію зі щільністю 1,15 г/см<sup>3</sup> і силікатним модулем 2,8÷3,0, а також розчин алюмінату натрію з каустичним модулем ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ), що дорівнює 1,5÷1,7, який розчинявся у воді в кількості 70 г/л, що відповідало щільності

розчину  $1,05 \text{ г/см}^3$ . Час гелеутворення алюмосилікатного золю встановлювався введенням у певний об'єм розчину силікату натрію розчину алюмінату натрію. Час гелеутворення золю також залежить від температури змішуваних розчинів (рис. 1.24).

Алюмосилікатні золі мають невелику в'язкість, близьку до в'язкості води, що є дуже важливим чинником при проведенні ін'єктування в піски з малою проникністю. Ця рецептура у великих обсягах була використана при улаштуванні протифільтраційної завіси Висотної Асуанської греблі для закріплення дрібних пісків, що залягають в її основі. Роботи в Асуані вимагали створення декількох тампонажних розчинів, оскільки ґрунти, що залягають в основі греблі, дуже різноманітні за проникністю.

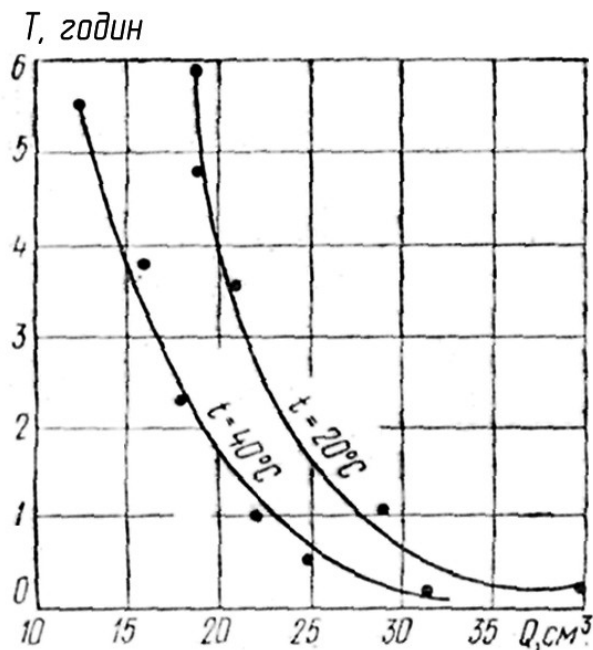


Рис. 1.24. Залежність часу гелеутворення  $T$  від об'єму  $Q$  коагулянта  $\text{NaAlO}_2$  і температури  $t$  розчинів

**Силікатно-органічна рецептура.** Висока міцність закріплення забезпечується також при застосуванні силікатно-органічної рецептури. Міцність ґрунту з коефіцієнтом фільтрації від 0,5 до 25 м/доб, закріпленого силікатно-етилацетатними гелями, досягає 2,0 МПа. Міцність у цьому випадку залежить від силікатного модуля, кількості і концентрації контакту Петрова. Як і для всіх силікатних рецептур, велике значення має також час гелеутворення. Найбільша міцність досягається при модулі силікату натрію, що дорівнює 3,3. Ґрунти, що мають домішку

органічних речовин, також добре закріплюються цим складом. Міцність при цьому дещо знижується (1,0 ÷ 1,2 МПа).

У табл. 1.2 приведена границя міцності при стиску ґрунту на 28-му добу, закріпленого силікатно-формамідною рецептурою з часом гелеутворення 60 хв.

Таблиця 1.2

Густина вихідного розчину силікату натрію, г/см <sup>3</sup>	Добавка H <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub> , %	Границя міцності при стиску ґрунту, МПа
1,0	2	0,9
	3	0,9
	4	1,5
	5	1,5
1,28	5	0,7
1,24	5	0,5
	7	0,7

Як видно, міцність закріпленого ґрунту можна регулювати як кількістю H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>, так і щільністю вихідного розчину силікату натрію. Використання силікатно-органічної рецептури дозволяє закріплювати ґрунти з необмеженим вмістом карбонатів. Це пояснюється тим, що гелеутворюючі розчини мають лужну реакцію і не руйнують карбонати кальцію, які знаходяться в ґрунті, що забезпечує добре закріплення.

Ґрунти, закріплені вищезгаданими розчинами, водостійкі. Закріплення довговічно. Застосування цієї рецептури рекомендується для піщаних ґрунтів з природною вологістю при проходці підземних виробок і розкритті котлованів.

*Спосіб ущільнення пісків бітумною емульсією.* Кінцевою метою ін'єктування бітумної емульсії в ґрунт є закорковування пор бітумом, що виділяється із емульсії, і надання ґрунту водонепроникності. Ущільнення бітумною емульсією ґрунту у визначеному місці можна провести, спричинивши її розпад шляхом введення різних коагулюючих речовин. Для визначення ступеня ущільнення піщаних ґрунтів бітумною емульсією були виконані дослідження, при яких коагулянт вводився або в ґрунт після ін'єктування (хлористий кальцій), або безпосередньо в

емульсію (етилацетат). Випробування на водопроникність проводили через 1 добу. Досліди показали, що після ущільнення піску бітумною емульсією його коефіцієнт фільтрації в більшості випадків різко знижується (табл. 1.3).

Таблиця 1.3

Пісок	Концентрація бітумної емульсії, %	Коагулянт		Коефіцієнт фільтрації, м/доб	
		Вид	% по відношенню до бітуму	до ущільнення	після ущільнення
Дрібний	35	CaCl <sub>2</sub>	0,1	14,0	0,0–0,5
		Етилацетат	4,0		2,5
			10,0		1,0
Середньої крупності	40	CaCl <sub>2</sub>	0,1	18,6	1,5
		Етилацетат	4,0		3,5
			10,0		1,5
Крупний	50	CaCl <sub>2</sub>	0,2	50,0	5,0

Разом з водонепроникністю ґрунт набуває зв'язності, але внаслідок пластичності бітуму не кам'яніє. Ступінь заповнення пор ґрунту бітумом може коливатися в межах 40 ÷ 75 %, причому нижня межа стосується дрібних пісків, верхня – крупних. Радіус закріплення для дрібних пісків становить 0,5 ÷ 1,0 м, для пісків середньої крупності - 0,75 ÷ 1,5 м і для крупних – 1,25 ÷ 2,0 м. Маса бітуму, потрібного для закріплення 1 м<sup>3</sup> ґрунту, коливається від 100 до 200 кг.

### **1.4.3. Закріплення лесових ґрунтів**

*Спосіб однорозчинної силікатизації.* Особливість однорозчинного способу силікатизації полягає в тому, що, на відміну від піщаних ґрунтів (хімічно інертних), лесові просадні ґрунти є хімічно активними. Мінеральний склад лесу дозволяє використовувати його як другий реагент, який коагулює силікатний розчин, тому однорозчинна силікатизація лесу за своєю суттю є способом дворозчинного закріплення ґрунтів.

Лесові ґрунти дуже поширені в Україні, Середній Азії, на Кавказі і в Сибіру. Леси залягають з поверхні на глибину іноді до 40÷50 м. Вони характеризуються високою пористістю (до 55 %), наявністю макропор діаметром від 0,2 до 2,0 мм (від 5 до 30 %), великим вмістом пилюватих частинок і малим вмістом глинистих частинок. Лес містить до 15 % сольових утворень у вигляді вуглекислого і сірчано-кислого кальцію, магнію та ін. Коефіцієнт фільтрації лесу порівняно малий (0,1÷2,0 м/доб). При визначенні коефіцієнта фільтрації лесу водою він швидко розмокає і втрачає структуру, тому для цілей хімічного закріплення його слід визначати не водою, а слабким розчином силікату ( $\rho = 1,10 \text{ г/см}^3$ ).

Сутність способу силікатизації лесу полягає в тому, що в ґрунт, як і при інших способах, через систему забитих ін'єкторів або пробурених свердловин нагнітається один розчин силікату натрію з модулем 2,75÷3,0 і щільністю  $\rho = 1,13 \div 1,30 \text{ г/см}^3$ . Фізико-хімічний процес закріплення лесу заснований на доброму проникненні силікатного розчину, що має невелику в'язкість (2÷3 мПа·с), в ґрунт і на швидкому виділенні цементуючої ґрунт плівки гелю кремнієвої кислоти завдяки реакції розчину силікату натрію з солями ґрунту. Таким чином, роль другого розчину (коагулянта силікатного розчину) в даному випадку виконує сам ґрунт.

При взаємодії розчину з ґрунтом у результаті хімічної реакції на частинках ґрунту і стінках капілярів вмиє утворюється плівка гелю кремнієвої кислоти. Ця плівка спочатку має товщину в декілька мікрометрів і тому не перешкоджає проходженню розчину, що нагнітається, і лише через декілька годин завдяки інтенсивнішому процесу гелеутворення внаслідок дифузії відбувається закупорка капілярів гелем кремнієвої кислоти, і проникність ґрунту різко зменшується. Незважаючи на малу товщину плівки гелю кремнієвої кислоти, вона все ж таки достатньо міцна, щоб зберегти ґрунт вже в перший період насичення розчином в його природному непорушеному стані. Цьому сприяє також незначна величина набухання лесового ґрунту. Потім, приблизно через 1÷3 доби, увесь розчин, що знаходиться в ґрунті, переходить у гелеподібний стан. Надалі йдуть безперервне збільшення товщини плівки і зростання міцності закріпленого ґрунту. Перехід ін'єктованого в ґрунт

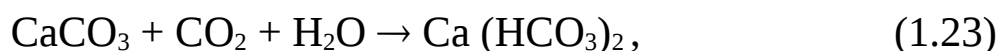
розчину в гель в основному відбувається в перші 3 доби. Зміцнення ж плівки гелю дуже інтенсивно відбувається протягом 15 діб і повністю закінчується через 28 діб.

На підставі досліджень, проведених при розробленні способу дворозчинної силікатизації, враховуючи тотожність їх реагентів, вважається, що при взаємодії силікатного розчину з солями гіпсу, які знаходяться в лесі, відбувається така часткова хімічна реакція:



Як бачимо, у результаті утворюються гель кремнієвої кислоти і кристалічні гідроокис кальцію  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  і сірчано-кислий натрій  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

*Спосіб газової силікатизації.* Крім способу закріплення лесу силікатним розчином, створені способи, що інтенсифікують процеси силікатизації. До цих способів належить обробка лесу як до, так і після нагнітання розчину силікату натрію вуглекислим газом. При цьому відбувається повніша реалізація невикористаного силікатного розчину шляхом переміщення його в зони слабкого закріплення. Сутність цього способу полягає в тому, що в ґрунт через забиті ін'єктори подається під невеликим тиском (0,05 ÷ 0,20 МПа) вуглекислий газ. Для остаточного затвердіння силікатного розчину в ґрунті вуглекислий газ нагнітається повторно. У результаті попередньої обробки карбонатних ґрунтів на поверні їх частинок утворюється шар бікарбонату кальцію за реакцією (як і для піщаних ґрунтів)



який, активно взаємодіючи з силікатом натрію, що нагнітається в ґрунт, частково отверджує його з утворенням на поверхні частинок вапнисто-кремнеземної сполуки





Крім того, попередня обробка ґрунту вуглекислим газом сприяє більш рівномірному розподілу розчину силікату натрію в результаті самовакумування, що виникає внаслідок активного поглинання силікатним розчином вуглекислого газу. При повторному нагнітанні вуглекислого газу відбувається остаточне затвердіння силікатного розчину, що знаходиться в поровому просторі закріплюваного ґрунту. При цьому відбувається нейтралізація луку вуглекислим газом, внаслідок чого збільшується модуль силікату натрію, що сприяє міцнішому закріпленню лесу. Способом газової силікатизації лесів можна закріплювати малоактивні ґрунти. Для закріплення цим способом необхідно спочатку обробити лес вуглекислим газом у кількості  $2 \div 3 \text{ кг/м}^3$ , потім силікатом натрію з густиною  $\rho = 1,10 \div 1,19 \text{ г/см}^3$  і, нарешті, вуглекислим газом у кількості  $3 \div 4,5 \text{ кг/м}^3$ .

Згідно з дослідженнями застосування цього способу у вологих ґрунтах, як правило, призводить у період нагнітання газу до утворення в ґрунті розривів, якими в подальшому розповсюджується головним чином силікат натрію. Для зменшення розривів ґрунту застосовується технологія, що полягає в нагнітанні після вуглекислого газу повітря. Проте і при цій технології, як було встановлено на восьми дослідно-виробничих ділянках розкриттям шурфів, замість однорідного закріплення ґрунту по радіусу утворюються тріщини, заповнені розчином силікату натрію, навколо яких спостерігається закріплення на  $10 \div 12 \text{ см}$ . Це вказує на необхідність подальшого удосконалення існуючої технології газової силікатизації.

#### **1.4.4. Закріплення глинистих ґрунтів**

Закріплення й ущільнення глинистих ґрунтів постійним електричним струмом розроблялося у трьох напрямках: електроосмотичне зневоднення – осушення, електрохімічне закріплення та електросилікатизація.

Перший спосіб дає можливість розкривати «досуха» котловани у водонасичених глинистих ґрунтах шляхом спільного застосування постійного електричного струму і голкофільтрового водопониження. Другий спосіб електрозакріплення заснований на використанні хімічних процесів, що протікають у ґрунті при

тривалій дії на нього постійного електричного струму, зокрема заміни в поглинаючому комплексі ґрунту кальцію і натрію на водень і алюміній, внаслідок чого ґрунт набуває необоротної механічної міцності. Третій спосіб – електросилікатизація – також використовує явище електроосмосу, але з одночасним уведенням у ґрунт під тиском розчинів силікату натрію і хлористого кальцію або одного гелеутворюючого розчину на основі силікату натрію.

Властивості глинистих ґрунтів, оброблених постійним електричним струмом, відрізняються від властивостей ґрунтів, закріплених ін'єкцією розчинів. Спосіб електроосмотичного осушення застосовується як тимчасовий захід для зниження вологості глинистого ґрунту у момент накладення електричного струму. Зняття електричного струму веде за собою підвищення вологості ґрунту. Електрохімічне закріплення та електросилікатизація надають глинистим ґрунтам деякої міцності. Вони застосовуються у тих випадках, коли зміцнення ґрунту ін'єкційними способами виключається. Невисока міцність (близько 0,1÷0,2 МПа) дає можливість зняти обдимання або укріпити ґрунт при різкому його зволоженні.

Нижче наведені фізико-хімічні основи цих способів.

*Електроосмотичне зневоднення.* У результаті фізико-хімічних процесів, що протікають у ґрунті при проходженні через нього постійного електричного струму, у ньому відбувається електроосмос, внаслідок якого ґрунт зневоднюється. Явище електроосмосу, тобто рух води через пористу діафрагму під впливом електричного поля, було відкрито професором Московського університету Ф. Рейсом ще в 1807 р. Наочне уявлення про електроосмос дає схема на рис. 1.25. Згідно з цією схемою вода в трубці з глиняною діафрагмою, стінки капілярів якої заряджені негативно, піднімається в правому коліні трубки в результаті переміщення протиіонів подвійного електричного шару (ПЕШ) частинок глини від позитивного полюса батареї до негативного, які захоплюють гідратовані ними шари води. Проте теорія перенесення води в капілярі при накладенні різниці електричних потенціалів була вперше вивчена лише в 1879 р.

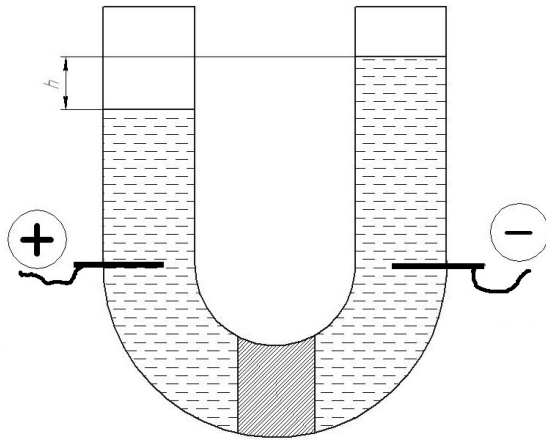


Рис. 1.25. Наочний прояв електроосмосу

Згідно з цією теорією уточнене в 1904 р. рівняння електроосмосу для діафрагми, що складається з великої кількості капілярів, має такий вигляд:

$$U = \zeta DqE / (4\pi\eta L), \quad (1.25)$$

де  $U$  – потік води,  $\text{см}^3/\text{хв}$ ;

$\zeta$  – електрокінетичний потенціал, мВ;

$D$  – діелектрична постійна води, що дорівнює 81;

$q$  – площа сумарного перерізу капілярів діафрагми,  $\text{см}^2$ ;

$E$  – напруга, В;

$\eta$  – в'язкість води,  $0,01 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;

$L$  – товщина діафрагми (довжина капілярів), см.

Після підстановки значень  $D$  і  $\eta$  рівняння (1.25) набуває простішого вигляду

$$U = \zeta qE / (kL), \quad (1.26)$$

де  $k = 2355$ .

Для ґрунту (діафрагма у вигляді ґрунтової маси, в яку введені електроди) рівняння електроосмосу має такий вид:

$$U = \zeta I\rho / k, \quad (1.27)$$

де  $\rho$  – питомий електричний опір ґрунту,  $\text{Ом} \cdot \text{м}$ .

Оскільки в процесі електроосмосу об'єм води, що залишається в ґрунтовій масі, увесь час зменшується, то можна припустити, що швидкість електроосмосу задовольняє рівняння

$$dU/dt = kQ , \quad (1.28)$$

де  $Q$  – об'єм води, яка знаходиться в ґрунті і може бути видалена із нього електроосмосом.

Наведене диференціальне рівняння легко розв'язується і дає об'єм води, яка виділилася за час  $T$ ,

$$Q = Q_{\infty}(1 - e^{-kT}), \quad (1.29)$$

де  $Q_{\infty}$  – об'єм води, яка може бути виділена електроосмосом із ґрунту за час, що дорівнює  $\infty$ ;

$k$  – деяка постійна, залежна від величини  $\zeta$ -потенціала глинистих частинок і густини струму;

$T$  – час, хв.

Як в області гідравлічної фільтрації, так і при електроосмотичній фільтрації властивості ґрунту характеризуються коефіцієнтом фільтрації. Проте якщо в області гідравлічної фільтрації коефіцієнт фільтрації піщано-гравелистих ґрунтів коливається в межах від 1 до 500 м/доб, а глинистих – від 0,005 до 0,2 м/доб, то при електроосмотичній фільтрації він виражається формулою

$$k_E = \zeta B \rho / (4\pi\eta), \quad (1.30)$$

де  $\rho$  – питомий електричний опір ґрунтового розчину, який змінюється в межах одного порядку.

Для вивчення залежності величини  $k_E$  від дисперсності ґрунту була проведена серія лабораторних досліджень із зразками ґрунту різного ступеня дисперсності. Найбільш дисперсною виявилася бентонітова глина; наступними є каолінітова, кудинівська та юрська глини. Суглинки були представлені чотирма різновидами: мулистим, лесоподібним із Верхніх Котлів

та із заплави р. Ніщенки. Крім супіску із Кургану, були досліджені порохоподібний кварц і люберецький пісок. Мули були представлені трьома різновидами. Таким чином, ґрунти, узяті для лабораторних досліджень, відрізнялися не тільки ступенем дисперсності, але і мінералогічним складом.

Коефіцієнт електроосмосу визначали в електроодометрах, в яких випробовуваний ґрунт протягом всього дослідження перебував під одним і тим самим тиском. Значення коефіцієнта електроосмосу визначали при тиску 0,05 МПа за відсутності гідростатичного напору. Зразок мав форму циліндра діаметром 10 см і висотою 5 см. Коефіцієнт  $k_E$  обчислювали як середньоарифметичну величину із трьох вимірів. Отримані значення  $k_E$  для перерахованих вище ґрунтів наведені в табл. 1.4. Для цих самих ґрунтів визначені значення коефіцієнта фільтрації.

Як видно із табл. 1.4, значення коефіцієнта фільтрації вказаних ґрунтів змінюються в десять тисяч разів, а значення коефіцієнта електроосмосу цих самих ґрунтів змінюються в чотири рази. За даними інших авторів, ці співвідношення підтверджуються. Ця обставина не суперечить законам електроосмосу. Дійсно, переносниками води при електроосмосі є позитивно заряджені іони. Із цього випливає, що швидкість електроосмотичного перенесення води залежить від швидкості пересування іона і довжини шляху цього іона в ґрунті.

Значно більша гідратація бентонітових глин призводить до збільшення площі сумарного перерізу пор і одночасно до випрямлення шляху пересування іона, що і зумовлює деяке збільшення їх коефіцієнта електроосмосу. Значення швидкостей пересування іонів при  $t = -18$  °С і напрузі поля 1 В/см досить точно визначені рядом дослідників. Досліди показали, що швидкість пересування катіонів, які зустрічаються у воді при напрузі 1 В/см, у середньому дорівнює 0,0005 см/с, за винятком швидкості пересування іонів водню, яка дорівнює 0,003 см/с. Виміряні ж швидкості при електрофільтрації дорівнюють 0,00005 см/с, тобто в 10 разів менше від швидкостей пересування іонів. Враховуючи, що в пористій діафрагмі, якою в даному випадку є ґрунт, площа загального перерізу капілярів залежить від пористості, яка становить у глинистих ґрунтах близько 50 %, доходимо висновку, що іон, рухаючись порами ґрунту, здійснює

шлях у 5 разів більший, ніж його проекція на площину. Таким чином, проведені дослідження дозволили досить детально вивчити електроосмотичні властивості ґрунтів, і як перше практичне застосування запропонувати економічно ефективний спосіб розроблення котлованів у водонасичених глинистих ґрунтах, де сучасні голкофільтрові установки не можуть забезпечити розкриття їх «досуха». Сумісне використання голкофільтрових установок і постійного електричного струму дало будівельникам надійний і економічний спосіб осушення і розкриття котлованів, застосовний майже для всіх ґрунтів.

Таблиця 1.4

Ґрунт	Коефіцієнт фільтрації, см/с	Коефіцієнт електроосмосу, см <sup>2</sup> /(с×В)
Глина:		
- бентонітова	$8 \times 10^{-10}$	$6 \times 10^{-5}$
- каолінітова	$5 \times 10^{-9}$	$3 \times 10^{-5}$
- кудиновська	$2 \times 10^{-9}$	$3 \times 10^{-5}$
- юрська	$9 \times 10^{-8}$	$2 \times 10^{-5}$
Суглинок:		
- мулистий	$6 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-5}$
- лесоподібний	$4 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-5}$
- із Верхніх Котлів	$1 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-5}$
- із заплави р. Ніщенки	$1 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-5}$
Супісок із р. Курган	$8 \times 10^{-6}$	$8 \times 10^{-5}$
Пилоподібний кварц (діаметр частинок 0,01 мм)	$7 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
Пісок люберецький	$4 \times 10^{-2}$	0
Мул:		
- херсонський	$3 \times 10^{-8}$	$2 \times 10^{-5}$
- севастопольський	$1 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-5}$
- пермський	$2 \times 10^{-10}$	$3 \times 10^{-5}$

Дуже поширеним є застосування постійного електричного струму для поліпшення будівельних властивостей глинистих ґрунтів. На основі явища електроосмосу був розроблений спосіб електроосушення глинистих ґрунтів, який дозволив «досуха» розкривати котловани в суглинних, глинистих і мулистих ґрунтах. Спосіб полягає в тому, що через ґрунт між голкофільтрами і трубами-електродами, встановленими по

периметру котлована, пропускається постійний електричний струм. Голкофільтри з'єднуються при цьому з негативним, а труби – з позитивним полюсом джерела постійного струму. При розташуванні електродів по периметру котлована згідно з розробленою дворядною схемою навколо осушуваного масиву створюється електрична завіса, що перешкоджає надходженню води в осушуваний ґрунт. При дії постійного електричного струму частина зв'язаної води на ділянці між позитивними (анодами) і негативними (катодами) електродами переходить у вільну воду, яка переміщується від анодів до катодів і відкачується через голкофільтри. Унаслідок безперервності потоку ґрунтової води переміщення її відбувається не тільки від анодів до катодів, але і в межах всього осушуваного масиву ґрунту, обмеженого контуром анодів. Вологість ґрунту при цьому зменшується. Кількість води, що відкачується при осушенні глинистих ґрунтів, на відміну від піщаних, зазвичай буває невеликою, що обумовлюється малим коефіцієнтом фільтрації глинистих ґрунтів.

Для зниження напору ґрунтових вод на 4 м в масиві ґрунту, оконтуреного електродами, необхідно по периметру котлована у вертикальній площині між електродними рядами створити густину струму в  $1 \text{ А/м}^2$ . Спосіб електроосушення застосовується в ґрунтах з коефіцієнтом фільтрації менше 0,01 м/доб, тобто в супісках, суглинках і глинах. Електроосушення продовжується протягом всього часу роботи в котловані, яке з метою економії коштів на осушення ґрунтів слід скорочувати шляхом відповідної організації будівельних робіт. Оскільки вологість глинистого ґрунту при використуваній густині струму знижується мало, питомий електричний опір ґрунту майже не змінюється. Витрати електроенергії за даними наявного виробничого досліду залежать від тривалості роботи в котловані і складають від 2 до 10 кВт·год на  $1 \text{ м}^3$  осушуваного ґрунту, оконтуреного голкофільтрами. При практичному застосуванні способу виявлено також велике значення вакууму біля голкофільтра. Вакуум створює додатковий градієнт поблизу фільтра, що полегшує надходження води із ґрунту у фільтр. На рис. 1.26 наведено приклад ефективності застосування вакууму в різних ґрунтах.

Рис. 1.26. Водовіддача, %

різних ґрунтів при дії  
вакууму (1) і постійного  
електричного струму (2)

При розробленні способу електроосушення глинистих ґрунтів було встановлено ряд важливих явищ, як, наприклад, зміна під дією постійного електричного струму коефіцієнта фільтрації, зміна коефіцієнта електроосмосу зі збільшенням дисперсності ґрунту, зміна властивостей зв'язаної води.

Суть першого явища полягає в наступному. Рух води в глинистому ґрунті під дією гідравлічного напору відбувається тільки в середній частині капіляра (рис. 1.27, а), тому що решта частини води знаходиться в зв'язаному стані. При електроосмотичному пересуванні навіть зв'язана вода приходить у рух, тому епюра швидкостей має інший характер (рис. 1.27, б).

Нарешті, при сумарній дії гідравлічного та електричного градієнтів епюра швидкостей не відповідає сумі цих епюр (рис. 1.27, в), а має значно більшу величину (рис. 1.27, г), що і було встановлено вперше в лабораторії закріплення ґрунтів. У 1953 р. на нараді інститутів, що працюють у галузі застосування електроосмосу в будівництві, було вирішено іменувати це явище «ефектом Федорова» на честь співробітника, що відкрив це явище.

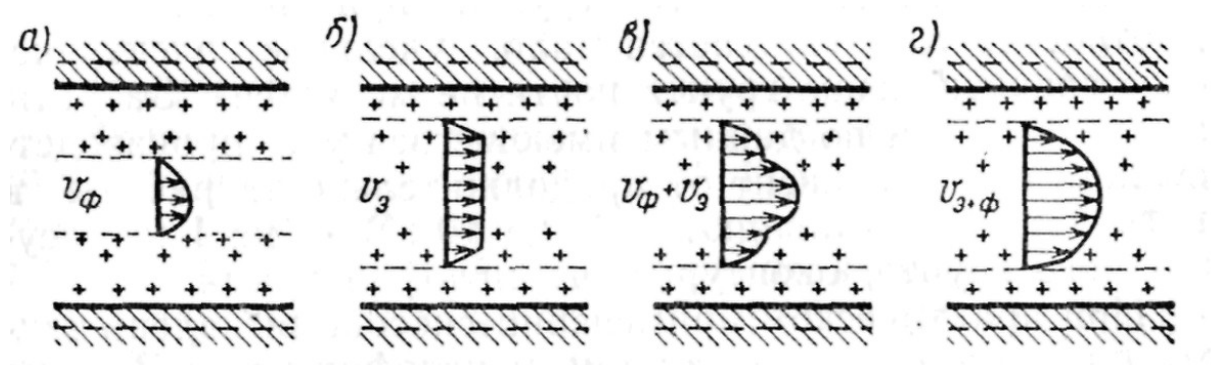


Рис. 1.27. Епюри швидкостей у капілярі

Таким чином, при накладенні постійного електричного струму на ґрунт у результаті збільшення діючого перерізу капілярів відбувається значне збільшення коефіцієнта фільтрації.



Встановлено, що в суглинних ґрунтах він збільшується в 10–20 разів, а в глинистих і мулистих – до 100 разів. Останнім часом для вивчення цього явища в лабораторії закріплення ґрунтів був застосований метод «мічених атомів». Запускаючи мічені атоми  $^{45}\text{Ca}$  в ґрунт біля анода і спостерігаючи за їх переміщенням до катода, вдалося визначити величину працюючих при фільтрації пор як при гідравлічному і електричному градієнтах нарізно, так і при їх сумарній дії. Отримані результати дозволяють скласти точнішу думку про поведінку зв'язаної води в глинистих ґрунтах.

*Електрохімічне закріплення.* Відомо, що ступінь гідратації частинок глини залежить від характеру поглиненого катіона. Так, ступінь гідратації і товщина водної оболонки у натрієвої глини завжди більше, ніж у кальцієвої, а у кальцієвої більше, ніж у алюмінієвої. Отже, застосовуючи як електроди алюмінієві стержні і викликаючи у реакції обміну заміщення поглиненого натрію і кальцію алюмінієм і воднем, тим самим сприяємо обезводненню глини, закріплюючи одержаний ефект. Факт реакції обміну в ґрунті при електрохімічному закріпленні був підтверджений рядом дослідів. Визначення поглинених основ у ґрунті до і після дії електрохімічного закріплення показало, що в результаті реакцій, що відбуваються, у ґрунті з'являються іони водню, збільшується відношення вмісту алюмінію до сумарної місткості, зменшується вміст натрію і дещо зменшується вміст кальцію. У результаті фізико-хімічних процесів, що відбуваються при електрохімічному закріпленні, незабаром після вмикання електричного струму починається помітне ущільнення ґрунту біля анода і деяке розрідження його біля катода. Надалі починається ущільнення ґрунту біля катода. Таким чином, ущільнення ґрунту відбувається біля обох електродів. Якщо пропускати електричний струм тривалий час, то буде закріплена вся маса ґрунту між електродами.

На рис. 1.28 наведена динаміка процесу закріплення ґрунту під впливом постійного електричного струму. Криві на рисунку показують ефективність закріплення ґрунту, що характеризується глибиною проникнення голки Віка (пристосованої для penetрації), на різній відстані від електродів через 25, 50, 75, 100, 150 і 200 год від початку проходження струму. Зіставленням двох

зразків ґрунту з різним гранулометричним складом (зразок № 1 містив 0 % піщаної фракції, 29,4 % пилюватої і 70,6 % глинистої, а зразок № 2 – відповідно 13,08; 79,65 і 7,27 %) встановлено, що їх закріплення відбувається по-різному. Монолітність закріплення в зразку № 1 настає через 100 год, а в зразку № 2 – через 200 год. Крім того, на ефект закріплення впливають і фізико-хімічні властивості ґрунту.

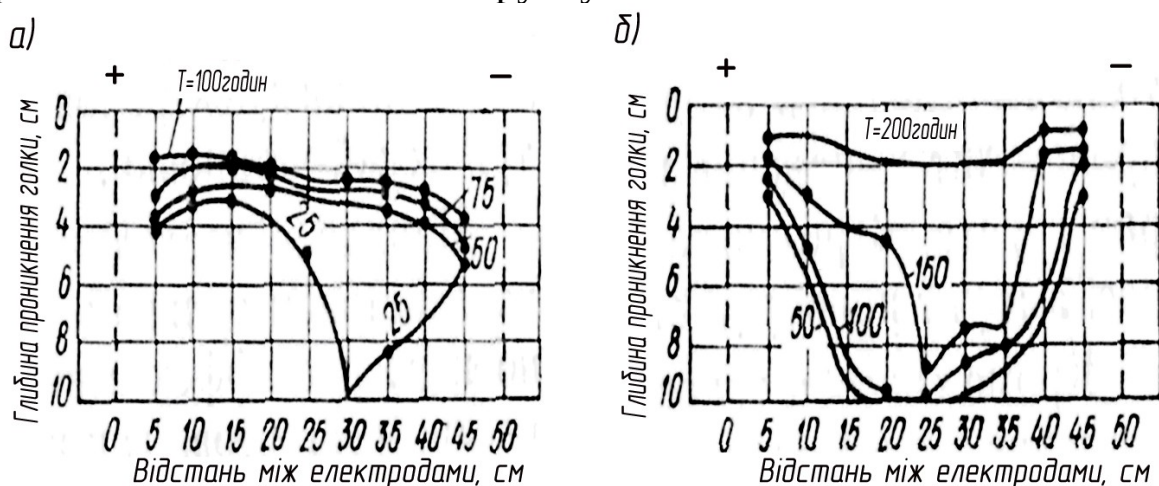


Рис. 1.28. Динаміка процесу електрохімічного закріплення в зразках ґрунту № 1 (а) і № 2 (б)

Що стосується щільності струму і витрати електроенергії, то тут спостерігається така закономірність. Чим вище щільність вживаного струму, тим швидше відбувається закріплення ґрунту. Однак згідно з дослідженнями застосування при закріпленні сильно зволоженого ґрунту густини струму більше 20 А/м<sup>2</sup> викликає його нагрів. Загальна витрата електроенергії для закріплення 1 м<sup>3</sup> ґрунту коливається від 30 до 200 кВт·год. Велика межа коливань зумовлюється відмінністю властивостей закріплюваних ґрунтів. Крім того, необхідна для отримання потрібної густини струму напруга залежить як від омичного опору ґрунту, так і від відстані між електродами. Середню величину напруги можна прийняти за таким співвідношенням: на 1 м відстані між електродами потрібно 100 ÷ 200 В. Глибина закріплення цілком залежить від глибини забивання електродів і потужності вживаної електричної установки.

Разом з дослідженням закріплення, викликаного дією лише електричного струму, було проведено вивчення ефекту введення в ґрунт різних хімічних реагентів. Оскільки під впливом

постійного електричного струму вода рухається від анода до катода, то при введенні в анодну зону хімічних розчинів відбувається випадання цементуючої речовини в порах ґрунту. У результаті закріплення відбувається швидше, а ґрунт набуває міцності. Крім способу закріплення глинистих ґрунтів шляхом введення в анодну зону хімічних розчинів, був розроблений спосіб їх закріплення продуктами електролітичної корозії металевих електродів – залізних або алюмінієвих. Введення в ґрунт у цьому випадку розчину хлористого кальцію підвищує швидкість корозії електродів і прискорює проникнення в нього заліза і алюмінію.

Якість закріплення водонасичених суглинків і глин більшою мірою залежить від концентрації водневих іонів рН. З підвищенням кислотності біля позитивного електрода швидкість корозії металу (алюмінію або заліза) сильно збільшується внаслідок утворення розчинних продуктів корозії. Одночасно підвищення концентрації іонів водню в анодній зоні затримує утворення гідроксиду заліза і сприяє просуванню іонів двовалентного заліза по ґрунту в напрямку катода. При використанні алюмінієвих електродів закріплення ґрунту відбувається в анодній і катодній зонах, залізних – в анодній (табл. 1.5).

Таблиця 1.5

Природна вологість ґрунту, %	Електроди	Вологість, %, та зчеплення, $10^5$ кПа, ґрунту в зоні			Радіус зони закріплення, см
		анодній	середній	катодній	
20	Алюмінієві	21/0,22	23/0,12	25/0,12	5
	Залізні	22/0,21	25/0,17	26/0,10	4
	Алюмінієві з $\text{CaCl}_2$	19/0,31	22/0,31	23/0,18	10
50	Алюмінієві	44/0,56	45/0,31	45/0,18	15
	Залізні з $\text{CaCl}_2$	48/0,68	-/0,24	61/-	18

Безсумнівно, спосіб електрохімічного закріплення дає можливість підвищувати міцність ґрунту під фундаментами будівель і споруд, збільшувати несучу здатність палів і укріплювати укоси, що зсуваються.

*Електросилікатизація.* Електросилікатизація є одним із способів електрохімічного закріплення ґрунтів. Вона заснована на поєднанні закріплення ґрунтів способом силікатизації та електричної обробки. Спосіб електросилікатизації полягає в тому, що через занурені в ґрунт перфоровані труби-ін'єктори, які служать одночасно електродами, нагнітаються закріплюючі силікатні розчини і пропускається постійний електричний струм. Сумарна дія силікатного розчину та електричного струму на ґрунт сприяє прискоренню просування розчину, викликає зневоднення і агрегацію ґрунту, а також утворення в ньому гелю кремнієвої кислоти. У результаті цього ґрунту надається водостійкість і міцність близько  $0,5 \div 0,8$  МПа. Застосовується цей спосіб для зміцнення перезволожених дрібних пісків і супісків.

У колишньому Радянському Союзі дослідженнями і подальшим розробленням способу електросилікатизації займався ЛІЗТ. Нижче поміщені відомості про сутність цього способу з урахуванням робіт ЛІЗТу і практичного застосування цього способу в Ленінграді. При дії на ґрунт силікату натрію та електричного струму в ньому відбуваються такі фізико-хімічні процеси:

- 1) електроосмос, що сприяє переміщенню розчину в ґрунті;
- 2) електроліз і зміна реакції середовища, що сприяє утворенню в ґрунті гідроокису кальцію і алюмінію, прискоренню утворення гелю (коагуляції силікатного розчину), структуроутворенню (агрегації частинок) і кристалізації хімічних сполук. Унаслідок цих процесів ґрунт необоротно зміцнюється і набуває водостійкості.

Електросилікатизація поділяється на дворозчинну і однорозчинну. У першому випадку в ін'єктори вводять розчини силікату натрію і хлористого кальцію, у другому – один розчин: суміш силікату натрію, сірчаної кислоти і алюмосернокислового натрію. Галузь застосування дворозчинної силікатизації залежить від фільтраційної здатності ґрунтів. При цьому застосовують розчини силікату натрію зі щільністю  $\rho = 1,14 \div 1,18$  г/см<sup>3</sup>, хлористого кальцію зі щільністю  $\rho = 1,05 \div 1,08$  г/см<sup>3</sup>. При однорозчинній силікатизації застосовують суміш розчинів силікату натрію з  $\rho = 1,18$  г/см<sup>3</sup>, сірчаної кислоти з  $\rho = 1,06$  г/см<sup>3</sup>, сірчано-

кислого алюмінію з  $\rho = 1,06 \text{ г/см}^3$ . Співвідношення між компонентами суміші підбирають залежно від необхідного часу гелеутворення. Найбільше зміцнення ґрунту досягається в анодній і середній зонах; тут  $R_{СТ}$  при використанні однорозчинної силікатизації складає  $0,5 \div 0,6 \text{ МПа}$ , дворозчинної –  $0,7 \div 0,8 \text{ МПа}$ . У катодній зоні міцність у 1,5 рази нижче через утворення тут лужного середовища.

Для якісного закріплення необхідне виконання таких умов:

1) подача частини закріплюючих розчинів у ґрунт під тиском не більше  $0,5 \text{ МПа}$  (на частку розчинів, що нагнітаються під тиском, припадає  $50 \div 60 \%$  загальної кількості розчинів, введених у ґрунт);

2) ввімкнення струму одночасно з подачею розчинів у ґрунт і пропускання його якийсь час після припинення подачі розчинів;

3) періодичне відкачування води із катодної зони, що зменшує лужність у цій зоні і прискорює процес закріплення.

Вплив постійного електричного струму на глибину проникнення розчинів у ґрунт, а також на міцність закріплення було піддано спеціальному вивченню.

На рис. 1.29 наведено графік, який відображає режим надходження розчинів у ґрунт під впливом різних чинників: дії постійного електричного струму, тиску та їх суми. З графіка видно, що надходження розчину в ґрунт під впливом електричного струму невелике і залежить головним чином від електроосмотичного руху вологи. Надходження розчину в ґрунт під впливом гідравлічного тиску відбувається інакше. Розчин спочатку надходить інтенсивно, потім надходження його зменшується і врешті-решт зовсім припиняється. Залежно від фільтраційної здатності ґрунту відмова настає через різний час, тобто відбувається просто вичавлювання вільної води із пор ґрунту розчином. При сумісній дії постійного електричного струму і тиску розчин надходить у ґрунт значно швидше. У перший період на нього впливає тиск, а надалі, коли його вплив зменшується, розчин надходить в основному під впливом електричного струму. Надходження розчину припиняється у момент утворення гелю. Велике значення при проведенні робіт з електросилікатизації має коефіцієнт фільтрації ґрунту. На рис. 1.30

наведено графік, що відображає вплив різних чинників на електрозакріплення ґрунтів з різним коефіцієнтом фільтрації.

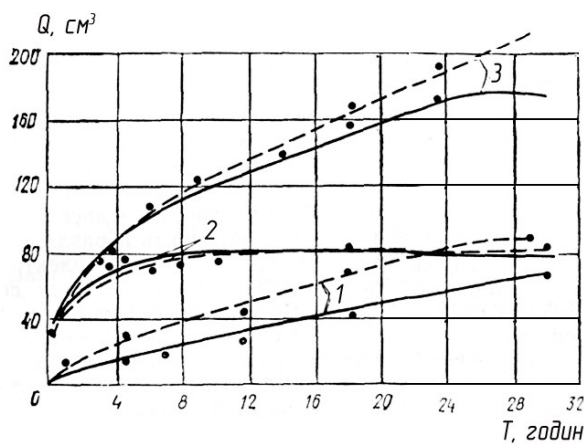


Рис. 1.29. Характер надходження розчинів у ґрунт (суцільні лінії) і виділення із нього води (штрихові лінії) при дії електричного струму (1), тиску (2), електричного струму і тиску (3)

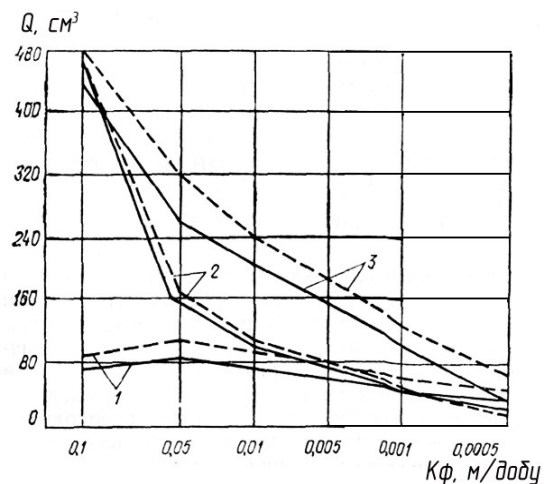


Рис. 1.30. Вплив коефіцієнта фільтрації ґрунту  $k_f$  на об'єм  $Q$  введеного розчину (суцільні лінії) і водовідділення (штрихові лінії) при дії електричного струму (1), тиску (2), електричного струму і тиску (3)

Дворозчинна електросилікатизація не відрізняється від однорозчинної. Надходження розчинів силікату натрію і хлористого кальцію відбувається за тією самою схемою. Спостереження за надходженням силікату натрію і хлористого кальцію в ґрунт показує, що в початковий період розчини проникають у ґрунт під дією головним чином тиску; з часом роль тиску помітно знижується, і розчини починають надходити в ґрунт виключно під впливом електричного струму. Найбільше впливає на введення розчинів у ґрунт електричний струм при коефіцієнті фільтрації від 0,2 до 0,01 м/доб. При цьому електричний струм збільшує ін'єкцію порівняно з тиском у 1,5 разу. Очевидно, саме ці ґрунти найдоцільніше використовувати для застосування дворозчинної електросилікатизації. При порівнянні кількості введеного гелеутворюючого розчину (однорозчинна електросилікатизація) з кількістю введеного силікату натрію (дворозчинна електросилікатизація) виявлена велика різниця. Ця різниця зростає зі збільшенням дисперсності ґрунту. Таке явище можна пояснити і відмінністю в'язкості

розчинів. Так, при однорозчинній електросилікатизації в'язкість гелеутворюючого розчину складає  $1,3 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ , а при дворозчинній (при густині силікату натрію  $1,18 \text{ г/см}^3$ ) – близько  $2,5 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ . Крім того, відділення вологи при однорозчинній електросилікатизації значно більше. Очевидно, наявність у гелеутворюючій суміші сірчаної кислоти і сірчаноокислого алюмінію збільшує інтенсивність електроосмосу. Все це свідчить про те, що ефект від накладення постійного електричного струму при однорозчинній електросилікатизації значно вищий, ніж при дворозчинній.

## **1.5. Сутність ін'єкційного процесу**

### **1.5.1. Загальні відомості**

Хімічний процес закріплення ґрунтів, як вже було сказано, полягає в нагнітанні одного або двох хімічних розчинів у ґрунт. Нагнітання розчинів у ґрунт здійснюється через систему занурених у ґрунт ін'єкторів або через пробурені свердловини. Хімічний розчин, розповсюджуючись у ґрунті, не тільки заповнює пори між його частинками, але й, стикаючись з поверхнею частинок, вступає з ними в хімічну реакцію. Особливо активна взаємодія відбувається в кварцевих пісках при закріпленні їх способами силікатизації. Завдяки округлій формі частинок при будь-якому їх взаємному розташуванні в піщаному ґрунті завжди залишається частина об'єму, не заповнена частинками. Цей об'єм прийнято називати пористістю ґрунту. Окремі порожнечі ґрунту, з'єднуючись між собою, створюють канали, якими можливий рух повітря і рідини. Таким чином, крупність і форма частинок визначають також характер «скелета» ґрунту, його пористість і проникність.

При хімічному закріпленні кожна з частинок ґрунту покривається шаром цементуючої речовини (кремнегелю). У результаті цього сусідні частинки міцно скріпляються одна з одною, утворюючи жорсткий «скелет», здатний витримувати значно більше навантаження, ніж ґрунт незакріплений. З рис. 1.31 видно, що розташування оболонок цементуючої речовини на частинках ґрунту в основному зумовлюється законом розподілу

рідини. Це пояснюється тим, що частинки ґрунту при способі дворозчинної силікатизації спочатку обволікаються розчином силікату натрію (тобто рідиною), який потім переходить у гідрогель кремнієвої кислоти. Площа поверхні, на якій розташовується цементуюча речовина, для різних ґрунтів буде також різною. Як правило, площа сумарної поверхні частинок в одиниці об'єму ґрунту буде тим більша, чим дрібніше ґрунт. У зв'язку з цим площа сумарної поверхні частинок ґрунту є однією з показових величин, що дозволяє визначати теоретично міцність закріплення даного ґрунту. Для ґрунтів, на яких у лабораторії вивчався вплив крупності частинок на міцність закріплення, разом з отриманням границі міцності обчислювали площу сумарної поверхні. Роблячи припущення, що цементуюча речовина покриває в ґрунті близько 50 % поверхні частинок, можна обчислити приблизну товщину плівки цементуючої речовини. Якщо узяти відношення площі сумарної поверхні до міцності, то ми одержимо ряд коефіцієнтів. Будуючи графік (рис. 1.32), по одній осі якого відкладається площа сумарної поверхні, а по іншій – величина одержаних коефіцієнтів, ми можемо провести через нанесені точки пряму. Це ще раз підкреслює, що для кварцевих піщаних ґрунтів можна встановити залежність між крупністю (площею сумарної поверхні) і одержуваною міцністю закріплення.

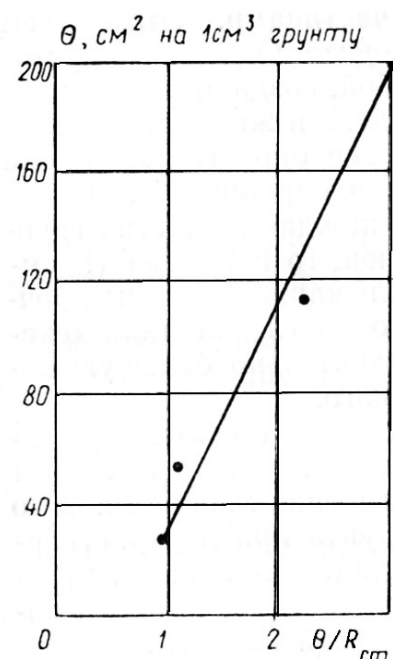




Рис. 1.31. Заповнення пор ґрунту гелем (мікрофотографія шліфа)

Рис. 1.32. Залежність між площею питомої сумарної поверхні частинок ґрунту і відношенням її до міцності

Значення форми частинок як одного з чинників, що впливають на міцність і характер закріплення, також закономірно. Не підлягає сумніву, що форма частинок визначає розмір пор (капілярів), якими повинні рухатися закріплюючі ґрунт хімічні розчини. З іншого боку, форма частинок визначає також площу змочуваної поверхні, а отже, і характер розподілу цементуючої ґрунт речовини. Однак форма частинок позначається на міцності закріплення менше, ніж крупність.

Вплив мінералогічного складу ґрунту на хімічне закріплення в даний час ще настільки мало вивчений, що вивести які-небудь закономірності важко. Поза сумнівом, значна частина мінералів, особливо кварц, бере активну участь у хімічних процесах, що відбуваються. Це впливає з однієї з умов застосування способу силікатизації, яка полягає в тому, що закріпленню можуть бути піддані тільки ті ґрунти, частинки яких адсорбують на своїй поверхні кремнієву кислоту.

Що стосується впливу домішки глини на хімічне закріплення ґрунтів способами силікатизації, то матеріали, що є нині, переконують у неправильності думки, що склалася, про її шкідливість. З точки зору хімії значна частина глини складається з водних алюмосилікатів. Завдяки великій дисперсності, а отже, і великій площі сумарної поверхні, глинисті частинки беруть більш активну участь в хімічній реакції закріплення ґрунту, ніж частинки піску. Для перевірки вказаного міркування, що знаходило підтвердження при проведенні дослідних робіт, у лабораторії закріплення ґрунтів були зроблені дослідження з вивчення впливу домішки глини в ґрунті на міцність закріплення. До піску середньої крупності з діаметром частинок  $0,5 \div 1$  мм домішували різну кількість просіяної через сито із отворами розміром 0,25 мм глини. Зразки закріплювали просочуванням розчинів з подальшим випробуванням на міцність через 1 і 12 діб. Одержані дані наведені в табл. 1.6.

Таблиця 1.6

Зразок	Пористість, %	Густина частинок ґрунту, г/см <sup>3</sup>	Гігроскопічна вологість, %	Границя міцності при стиску, МПа, через період часу	
				1 доба	12 діб
Чистий пісок	34,32	2,66	0,10	5,4	4,85
Пісок + 5 % глини	31,91	2,65	0,27	5,5	3,73
Пісок + 10 % глини	29,48	2,65	0,47	7,28	7,60
Пісок + 20 % глини	27,48	2,66	0,81	7,3	8,00

З таблиці видно, що зі збільшенням у ґрунті вмісту глини міцність закріплення збільшується. З іншого боку, порівняння значень міцності через 1 і 12 діб показує, що збільшення міцності відбувається вже з самого початку закріплення ґрунту. Одержані дані переконують у тому, що домішка глини в ґрунті при хімічному його закріпленні виконує роль не тільки фізичної маси, що ущільнює «скелет» ґрунту, але і речовини, що хімічно бере активну участь у реакції. Проте з цього не можна зробити висновок, що можна закріплювати хімічно (шляхом ін'єкції) сильноглинисті піски або додавати глину в розчини при закріпленні дрібних пісків. Як у тому, так і в іншому випадку межі домішки глини в ґрунті і в розчинах зумовлюються фізичними елементами технологічного процесу закріплення. З цих елементів основне значення мають коефіцієнт фільтрації і розмір пор ґрунту. Вказані закономірності стосуються тільки способів, що використовують розчин силікату натрію. При способі смолизації, коли закріплення відбувається внаслідок полімеризації карбамідної смоли, домішка глини більше 3 % призводить до зниження міцності закріплюваного ґрунту.

### **1.5.2. Форма закріплення в однорідному ґрунті**

При русі рідини в ґрунті основними чинниками, що визначають його закономірності, є характер поверхневого шару ґрунту, тиск, під яким нагнітається рідина, в'язкість рідини, що нагнітається, і властивості ґрунту, тобто його коефіцієнт фільтрації, водонасиченість і однорідність. В умовах, коли ґрунт

є однорідною масою, фігури, що одержуються при нагнітанні в нього закріплюючих розчинів, мають правильні геометричні форми і можуть бути встановлені теоретично. Для експериментального уточнення форми фігур заповнення в лабораторії закріплення ґрунтів були проведені дві серії дослідів. Перша полягала у вивченні результату нагнітання рідини в одній точці, а друга – результату нагнітання рідини по лінії. Як один, так і інший випадок зустрічається в практиці хімічного закріплення ґрунтів: перший – при нагнітанні розчинів через відкритий кінець ін'єктора, другий – при нагнітанні розчинів через його перфоровану частину. У всіх дослідах як рідина застосовувався розчин силікату натрію зі щільністю і в'язкістю, дуже близькими до застосованих у виробничих умовах.

При нагнітанні рідини в одній точці однорідного ґрунту під деяким тиском вона повинна розповсюджуватися у всіх напрямках однаково. Таким чином, у результаті закріплення теоретично повинна бути одержана куля. Однак внаслідок наявності сили тяжіння ця фігура змінюватиметься, причому тим більше, чим довше проводиться нагнітання і чим менше в'язкість рідини, що нагнітається. При роботах з силікатом натрію, тобто з рідиною дуже в'язкою, що нагнітається під високим тиском, вплив сили тяжіння на форму фігури заповнення майже не позначається. Для підтвердження цього був проведений цілий ряд дослідів. У дослідний посуд об'ємом близько 5 л, завантаженому сухим дрібним піском, через трубку нагніталися рідини з різною в'язкістю і різною витратою. Нагнітання проводилося в точці, розташованій у середині однієї зі скляних стінок посудини. Одержувана при цьому фігура просочення періодично замальовувалася на склі з одночасним вимірюванням витрати рідини. Після закінчення кожного з дослідів просочений масив відкопувався, і уточнювалася його форма. Як показали отримані результати, фігура проникнення сильнов'язкої рідини при нагнітанні з точки має вид кулі. Аналізуючи отримані результати, можна зробити висновок, що збільшення в'язкості рідини впливає на силу тяжіння, яка у свою чергу впливає на форму, але не сильно, тому можна вважати, що при хімічному закріпленні піщаних ґрунтів способами силікатизації і смолизації шляхом

ін'єкції хімічних розчинів під значним тиском в однорідний ґрунт через одну точку закріплований масив має форму кулі.

При нагнітанні рідини в ґрунт через перфоровану частину ін'єктора хімічний розчин розповсюджується у всіх напрямках і як кінцеву форму фігури заповнення маємо еліпсоїд. Для перевірки цього був проведений такий дослід. У тому самому дослідному посуді, що і для попередньої серії дослідів, заповненому сухим дрібним піском, було проведено нагнітання розчину силікату натрію через перфоровану по довжині металеву трубку. Трубка встановлювалася біля скляної стінки так, щоб можна було вести зарисовку зони розповсюдження розчину. У результаті цих дослідів були одержані фігури просочування у вигляді еліпса. Аналізуючи одержані фігури заповнення, можна зазначити, що розповсюдження рідини відбувається майже рівномірно у всіх напрямках від живлячої лінії. На обох кінцях лінії рідина розповсюджується по півсфері, центром якої є кінцева точка лінії. Кінцевою точкою служить крайній отвір перфорованої частини труби.

### **1.5.3. Форма закріплення в неоднорідному ґрунті**

На характер проникнення сильнов'язкої рідини (силікату) в ґрунт істотно впливає неоднорідність ґрунту. При подальшому розгляді неоднорідність ґрунту розділимо на два види: розпушування ґрунту і неоднорідність нашарування. Під розпушуванням ґрунту слід розуміти чергування в ґрунті розпушених і щільно залягаючих зон при збереженні крупності, тобто гранулометричного складу ґрунту. Під неоднорідністю нашарування слід розуміти чергування різних за гранулометричним складом шарів ґрунту.

**Розпушування ґрунту.** При русі рідини, що нагнітається в розпушений ґрунт, глибина проникнення буде, звичайно, більша в тих місцях, де залягає більш пухкий ґрунт. Навпаки, у зонах, сильно ущільнених, проникнення буде найменшим. У цьому випадку можна говорити, що глибина і швидкість проникнення залежать цілком від пухкості залягання ґрунту. Проте виявляється, що проникнення рідини в ґрунт різко змінюється, якщо, наприклад, вода замінюється силікатом або іншою

сильнов'язкою рідиною. У цьому випадку завдяки великій в'язкості рідини і наявності значного тиску, під яким ця рідина ін'єктується в ґрунт, відбувається не просочення, а розколювання ґрунту. Щонайменша неоднорідність, особливо в дрібнозернистих і слабкопроникних ґрунтах, сприяє дуже швидкому утворенню ходів і тріщин, через які і спрямовується рідина. Таким чином, можна сказати, що сильнов'язка рідина «шукає» неоднорідності в ґрунті і прагне за наявності тиску створити в ньому тріщини і ходи. Ця обставина вже була неодноразово відмічена в практиці і підтверджена численними прикладами робіт з хімічного закріплення ґрунтів.

Слід зазначити, що не тільки в'язка рідина має властивість створювати в неоднорідному ґрунті розриви. На великій кількості прикладів встановлено, що при застосуванні газової силікатизації, коли після нагнітання силікату нагнітається вуглекислий газ, у ласі відбуваються розриви. Ця обставина призвела до того, що на об'єктах «Атоммашу» і при зміцненні основ житлових будівель у Волгодонську спосіб газової силікатизації не застосовувався. При вивченні проникнення нафти в глини Р.І. Покровським і Н.В. Лолетіним були проведені досліді, які полягали в тому, що в скляний циліндр, заповнений глиною, нагніталася нафта при підвищеній температурі. У результаті виявилось, що проникнення нафти в глину відбувається не рівномірно, а окремими каналами. Нарешті, при дослідних роботах з хімічного закріплення ґрунту були відмічені аналогічні випадки. Наприклад, при закріпленні крейдяного пливуну з малим коефіцієнтом фільтрації в Підмосковному вугільному басейні в результаті нагнітання розчинів під тиском до 4 МПа ґрунт хоч і був закріплений, але при цьому, як показала проходка в ньому виробок з узяттям зразків, увесь закріплений масив був порізаний прожилками гідрогелю.

При дослідних роботах у шахті № 8 Метробуду при закріпленні забою штольні було виявлено, що хімічні розчини розповсюджувались на відстань близько 8–10 м від забою, залишаючи непросоченими розчином зони ґрунту поблизу ін'єктора. Як було встановлено, це пояснювалося сильним розпушуванням ґрунту в результаті проходки пролягаючих нижче виробок. Таким чином, сильнов'язка рідина завжди прагне

створити собі в ґрунті ходи, причому це прагнення тим легше здійснюється, чим дрібніший і сухіший ґрунт, чим більше розпушування ґрунту і, нарешті, чим більший тиск, при якому нагнітається рідина.

**Неоднорідність нашарування** є важливим чинником, що впливає на форму закріплення масиву. Вона – результат геологічної будови і тому повинна бути охарактеризована з достатнім ступенем точності до початку робіт. Звичайно цей вид неоднорідності представлений чергуванням шарів дрібних і середньої крупності пісків, суглинків, глин і т. п. Залежно від товщини шарів можливе нагнітання хімічних розчинів через перфоровану частину ін'єктора одночасно у двох суміжних шарах. Очевидно, що більш легким буде проникнення розчинів, що нагнітаються в ґрунт з великим коефіцієнтом фільтрації. При цьому кількість розчинів, що поступили в кожний з шарів, залежить від коефіцієнта фільтрації цих шарів і від співвідношення довжини перфорованої частини ін'єктора, що знаходиться в кожному шарі. Таким чином, матеріали, що є нині, дозволяють зробити такі узагальнення:

1. Із збільшенням в'язкості рідини і тиску, під яким ця рідина нагнітається в ґрунт, наявне в ґрунті розпушування позначається різкіше. Рідина прагне знайти розпушену зону, спрямовуючись у неї, і, відіграючи роль клинка, розколює ґрунт. При цьому рідина може просунутися створеними нею ходами на дуже великі відстані. Явища розколювання ґрунту рідиною і проникнення її тріщинами і ходами виражаються тим різкіше, чим дрібніший і сухіший ґрунт.

2. Неоднорідність нашарування ґрунту викликає при нагнітанні в нього рідини нерівномірність її розповсюдження в різних шарах. Ступінь нерівномірності проникнення рідини в окремі шари залежить від співвідношення коефіцієнтів фільтрації цих шарів.

3. Характер розповсюдження розчинів, що нагнітаються в ґрунт, визначає форму і однорідність одержуваного в результаті закріплення масиву.

З цих узагальнень можна зробити висновок, що ґрунт, розпушений попередніми виробленнями, не може бути хімічно закріплений. У зв'язку з цим у всіх випадках у практиці

будівництва слід прагнути, щоб роботи з закріплення ґрунту проводилися до проходки розташованих поблизу укріплюваної зони виробок.

Що стосується отримання однорідного закріплення в ґрунті з неоднорідним нашаруванням, то, як показують досвід та існуюча практика, шляхом продуманої черговості закріплення тут можна в більшості випадків досягти добрих результатів. У цих випадках можна рекомендувати схему, при якій закріплення повинно починатися з шарів з великим коефіцієнтом фільтрації і закінчуватися шарами з меншим коефіцієнтом фільтрації. Однак цю схему не можна приймати для закріплення окремих розкиданих невеликих ділянок. Принцип безперервності і послідовності введення розчинів у ґрунт з урахуванням віджимання води, що знаходиться в ґрунті, повинен бути чітко витриманий.

#### ***1.5.4. Радіус закріплення***

При дворозчинній силікатизації на радіус розповсюдження розчину силікату натрію (першого розчину) впливають коефіцієнт фільтрації ґрунту, в'язкість розчину, тиск і тривалість нагнітання. Радіус розповсюдження розчину значно збільшується зі збільшенням тривалості нагнітання і градієнта напору. Практика робіт з силікатизації показує, що закріплення ґрунту здійснюється на невеликих відстанях від ін'єктора, а на великих відстанях від ін'єктора ґрунт закріплюється слабо. Основною причиною обмеження радіуса закріплення є хімічні процеси, які по-різному протікають на різній відстані від ін'єктора при нагнітанні розчину хлористого кальцію (другого розчину).

Розчин хлористого кальцію, що ін'єкується звичайно у тій самій точці, що і силікат натрію, витісняє частину розчину силікату натрію, залишаючи навколо кожної частинки ґрунту плівку кремнегелю. У результаті хімічної реакції утворюються гідрогель кремнієвої кислоти і окисел кальцію, а хлористий натрій зміщується з новими порціями хлористого кальцію, що

надходять, і частково виноситься на периферію. У зв'язку з цим кількість хлористого натрію від центра по радіусу збільшується. Як електроліт, хлористий натрій викликає розкладання силікату натрію, але тільки при його високій концентрації. При слабких концентраціях NaCl лише розбавляє силікат натрію, що і є причиною зменшення міцності закріплення по радіусу.

Вивчення описаного явища проходження розчинів у ґрунті показало, що при виході з ін'єктора розчин хлористого кальцію, витісняючи з пор ґрунту силікат натрію, просувається в них і створює безперервну лінію потоку. Під дією напору розчин рухається найкоротшим шляхом, який не може бути прямолінійним через частинки ґрунту, що зустрічаються. У зв'язку зі спрямованістю руху хлористого кальцію залишається деяка кількість пор, куди він не потрапляє, і поверхня закріпленого масиву має закономірно розподілені опуклості (рис. 1.33).

Було висунуто припущення, що закріплення ґрунту, можливо, відбувається не рівномірно по перерізу, а по розривах. Але його було спростовано як лабораторними, так і польовими дослідженнями, причому в польових умовах закріплення виходить більш рівномірним. Причиною є те, що силікат натрію, перетворений першими порціями хлористого кальцію в кремнегель, закупорює ходи як корок, і нові порції розчину хлористого кальцію спрямовуються в сусідні, заповнені силікатом пори, якими і починається продавлювання. Крім того, між розчинами хлористого кальцію і силікату натрію, що знаходяться в порах, куди не проникнув хлористий кальцій під тиском, відбувається реакція у порядку дифузії. Із усього сказаного зрозуміло, що отримання великих радіусів закріплення лімітується шкідливим впливом хлористого натрію. Утворення хлористого натрію тим інтенсивніше, чим більша площа сумарної поверхні частинок ґрунту, тобто чим більша площа поверхні зіткнення першого і другого розчину. Для перевірки цих положень у лабораторії були проведені експериментальні роботи, що полягали в наступному.

Труба завдовжки 2 м була заповнена однорідним люберецьким піском з коефіцієнтом фільтрації 16 м/доб. Після насичення завантаженого піску водою нагнітався розчин силікату натрію, а потім розчин хлористого кальцію. Силікат натрію мав



модуль 2,6, щільність 1,33 г/см<sup>3</sup> і в'язкість близько 10 мПа·с при температурі 60 °С. Хлористий кальцій мав щільність 1,28 г/см<sup>3</sup>. Нагнітання силікату натрію почалося при тиску 0,3 МПа і закінчилося при тиску 0,7 МПа до моменту виходу силікату натрію із нижнього кінця труби. Тиск нагнітання при закачуванні хлористого кальцію протягом перших 15 хв досяг 0,8 МПа, а ще через 20 хв 1,0–1,2 МПа. Після закінчення досліду труба була розібрана на низку ланок, а незакріплена частина ґрунту піддана хімічному аналізу. Результати аналізу наведені на графіку рис. 1.34. З графіка видно, що в незакріпленій частині ґрунту можна виділити три зони, що різко відрізняються за хімічним складом:

I – зона розбавленого розчину хлористого кальцію з добавкою хлористого натрію, що займає близько 20 см по довжині труби;

II – перехідна зона (можна вважати «водяною»), що містить малі кількості розчинів, що ін'єктуються, і продуктів їх реакції, завдовжки близько 40 см;

III – зона, що містить чисте рідке скло із поступово зростаючою концентрацією.

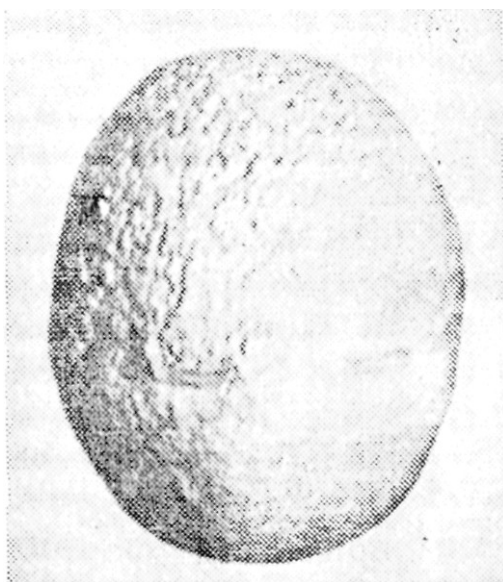


Рис. 1.33. Вигляд поверхні закріпленого ґрунту

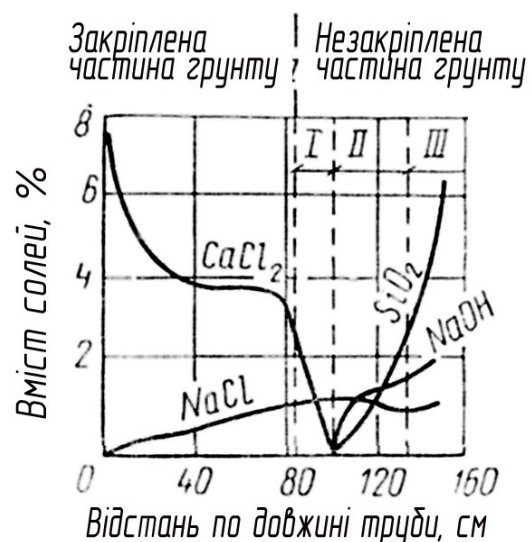


Рис. 1.34. Хімічні зміни в ін'єктованих розчинах по довжині труби

На підставі результатів цього дослідження можна зробити такі висновки:

1. Унаслідок утворення  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  відбувається безперервне зменшення концентрації хлористого кальцію, а через звільнення луку і води із плівок гелю на частинках ґрунту на значній відстані від ін'єктора (у периферійних зонах) силікат натрію розбавляється водою і лугом. Реакція ж слабого розчину хлористого кальцію з силікатом натрію закріплення не дає. Таким чином, три чинники – розбавлення силікату натрію, зниження його модуля і зменшення концентрації хлористого кальцію – обмежують радіус закріплення.

2. Зменшення концентрації хлористого кальцію і зростання кількості луку відбуваються тим інтенсивніше, чим більше площа сумарної поверхні частинок ґрунту, покритої силікатом натрію. Отже, радіус закріплення більше у крупних пісків і менше у дрібних.

У результаті дослідних робіт, проведених у виробничих умовах, був установлений мінімальний радіус закріплення для різних значень коефіцієнта фільтрації:

Коефіцієнт					
фільтрації, м/доб	2÷5	5÷10	10÷20	20÷50	50÷80
Радіус закріплення, м	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0.

За цими даними одержана емпірична формула, якою можна користуватися для обчислення радіуса закріплення  $r$ , м, при застосуванні способу дворозчинної силікатизації

$$r = 0,25\sqrt[3]{k_\phi}, \quad (1.31)$$

де  $k_\phi$  – коефіцієнт фільтрації, м/доб.

Деяко відрізняється силікатизація лесових ґрунтів, хоча за хімічними процесами, що відбуваються, вона наближається до способу дворозчинної силікатизації. Концентрований розчин силікату натрію з просуванням від точки ін'єкції вступає в хімічну реакцію з ґрунтом, і поступово його хімічна активність зменшується і, як наслідок, знижується міцність закріпленого

лесу. Для визначення радіуса закріплення лесу силікатним розчином (однорозчинний спосіб силікатизації) в лабораторії були проведені досліді на приладі В.С. Лук'янова, що дозволяють шляхом гідравлічних аналогій розв'язувати відповідні задачі. Задавшись коефіцієнтом фільтрації розчину в лесі, тривалістю нагнітання розчину, тиском, пористістю ґрунту і т. п., одержали формулу для визначення радіуса закріплення:

$$r = 0,133 \sqrt{\frac{k_0^P P}{\beta_n} (1 - e^{-k \cdot 24T})}, \quad (1.32)$$

де  $r$  – радіус закріплення, м;

$k_0^P$  – коефіцієнт фільтрації силікатного розчину у вертикальному напрямі в початковий момент, м/доб;

$p$  – тиск при нагнітанні розчину,  $10^4$  Па;

$\beta$  – коефіцієнт заповнення пор,  $\beta = 0,7 \div 0,9$ ;

$n$  – пористість у частках одиниці;

$k$  – емпіричний коефіцієнт, при визначенні фільтрації у вертикальному напрямі,  $k = 1,13$ ;

$T$  – тривалість ін'єкції розчину, доб.

Обчислені за цією формулою значення радіуса ін'єкції (закріплення) при  $T = 3$  год,  $p = 0,3$  МПа,  $n = 0,5$ ,  $\beta = 0,9$  для різних значень коефіцієнта фільтрації 10 %-го розчину силікату натрію в початковий момент наведені в табл. 1.7.

Таблиця 1.7

Коефіцієнт фільтрації, м/доб	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Радіус закріплення, м	0,10	0,15	0,21	0,26	0,30	0,34	0,47	0,67	0,81	0,9	1,1

Для випадків, коли закріплений масив створюється з дна котлована, а розчин проникає через свердловини, зроблені для його наливання, тобто без нагнітання, радіус закріплення  $r$ , м, можна обчислювати за формулою, що пов'язує його з величинами, які визначають умови закріплення за цією технологією:

$$r = \alpha^3 \sqrt{\frac{k_{\phi}^P p}{k_{\phi}^B} \frac{H r_C}{n} (1 - e^{-\beta})}, \quad (1.33)$$

де  $\alpha$  – емпіричний коефіцієнт, що приймається  $0,9 \div 1,1$ ;

$k_{\phi}^P$  і  $k_{\phi}^B$  – коефіцієнти фільтрації відповідно силікатного розчину робочої концентрації і води, м/доб;

$H$  – середнє значення гідростатичного напору, м;

$r_C$  – радіус свердловини, м;

$\beta$  – коефіцієнт заповнення пор, що приймається з урахуванням щільності та об'єму розчину силікату натрію, що подається, дорівнює  $0,3 \div 0,4$ .

У практиці фундаментобудування при великих обсягах робіт і особливо при закріпленні суцільних масивів лесу радіус закріплення від одного ін'єктора майже завжди однаковий і приймається 0,6 м, тобто відстань між ін'єкторами повинна бути 1 м. Унаслідок виняткової неоднорідності лесових просадних ґрунтів при будь-якому розташуванні ін'єкторів силікатний розчин спочатку проникає в розпушені частини масиву, а після закріплення розпушених зон починає проникати в щільніші, тобто зони з меншим коефіцієнтом фільтрації. Зрештою частина масиву залишається не просоченою розчином. При цьому об'єм закріпленого лесу, в першу чергу, залежить від вологості і активності ґрунту. При вологості лесу більше 17 % міцність різко падає навіть при застосуванні розчинів щільністю  $1,2 \div 1,3$  г/см<sup>3</sup>. У зв'язку з цим силікатизацію лесів слід застосовувати лише для нового будівництва, коли вологість ґрунту складає  $15 \div 17$  %. У цьому випадку правильність наміченого радіуса закріплення слід перевіряти на дослідних роботах. Це необхідно, тому що після підйому рівня ґрунтових вод обсяг закріплення повинен складати  $70 \div 80$  %. При однорозчинній силікатизації і смолизації проходить певний період часу, після якого настає спочатку загуснення, а потім твердіння розчину, що ін'єкується, тому радіус закріплення також залежить, у першу чергу, від коефіцієнта фільтрації, а потім від в'язкості розчину, що нагнітається, і часу його гелеутворення.

### 1.5.5. Параметри і технологія нагнітання

Для виявлення форми і монолітності закріпленого масиву в різних за однорідністю піщаних ґрунтах було проведено багато дослідів. Була встановлена залежність між об'ємами ін'єктованого розчину і закріпленого ґрунту.

Для визначення потрібного об'єму розчину  $N$ , л, для закріплення однорідного піску можна користуватися емпіричною формулою

$$N = 5Vn, \quad (1.34)$$

де  $V$  – об'єм закріплюваного ґрунту, м<sup>3</sup>;

$n$  – пористість ґрунту, %.

У неоднорідному і крупному піску потрібний об'єм розчину знижується до 60 % об'єму, що розраховується за формулою (1.34). Крім того, дослідями було встановлено, що при ін'єкції розчинів через декілька ін'єкторів, відстань між якими менше двох радіусів закріплення, утворюється монолітне закріплення, рівномірне за міцністю (рис. 1.35, а). Розподіл границі міцності при стиску зразків, узятих із точок, розташованих у плоскості, проведеної через три ін'єктори, зображено на рис. 1.35, б. Масив, закріплений від одного ін'єктора, має форму еліпсоїда обертання. Це пояснюється тим, що розчин, який нагнітається, розповсюджується від перфорованої частини ін'єктора не тільки в горизонтальному напрямі (по радіусу), але і вертикально – вгору і вниз від верхнього і нижнього її кінців (рис. 1.36). У зв'язку з цим для отримання циліндрової форми закріплення між перфорованими ланками (західками) робиться інтервал: у пісках  $0,5r$ , а в лесах – завдяки вертикальній їх структурі –  $2/3r$ .

а)



б)

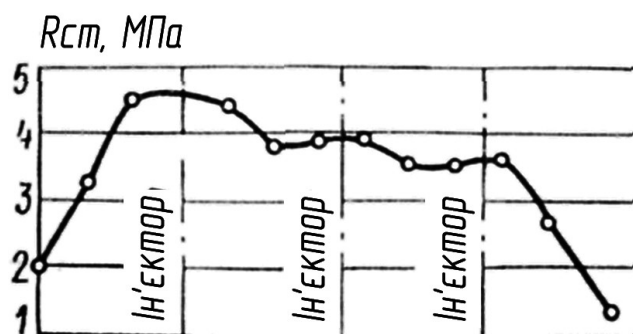


Рис. 1.35. Масив закріпленого ґрунту (а) і розподіл його міцності у трьох точках ін'єктування (б)

Надлишковий розчин вирівнює циліндрову форму (на рис. 1.36 затемнено). У плані відстань між ін'єкторами прийнята менше двох радіусів (рис. 1.37). Це дає додатково 12 % об'єму закріплення. Величину західки приймають не  $L$ , а  $L_1$ . Ін'єктори розміщують у шаховому порядку. Щоб не залишилося незакріплених зон, необхідно розташовувати ін'єктори у вершинах трикутників (рис. 1.37) на відстані  $d = 1,73r$ , де  $r$  – радіус закріплення від одного ін'єктора. Відстань між рядами ін'єкторів у цьому випадку визначається за формулою

$$L = 1,5r. \quad (1.35)$$

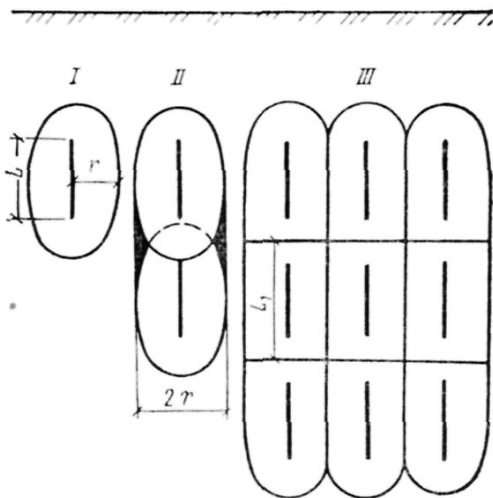


Рис. 1.36. Закріплення ґрунту по західках:  
 $I \div III$  – послідовність робіт

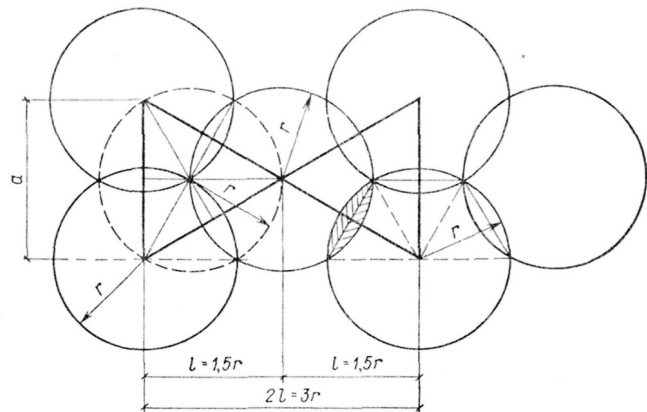


Рис. 1.37. Схема розташування ін'єкторів у плані для отримання суцільного масиву

Для отримання монолітного масиву закріпленого ґрунту розчини слід нагнітати по західках (рис. 1.36). Нагнітання розчинів в однорідні за водопроникністю ґрунти здійснюється зверху вниз або від низу до верху. У неоднорідних за водопроникністю ґрунтах у першу чергу закріплюють шар ґрунту з більшою водопроникністю. Нагнітання розчинів по глибині

залежить від способу занурення ін'єкторів, характеру і ступеня однорідності ґрунту. Нагнітання розчинів передують забивання і занурення ін'єкторів у ґрунт на задану глибину, а також приготування робочих розчинів, що ін'єктуються в ґрунт.

При закріпленні розчином силікату натрію лесів кращі результати дає одночасне нагнітання його через декілька (п'ять – сім) ін'єкторів (кущ) спочатку в першу західку, потім у другу і т. д. Порядок закріплення масиву ґрунту встановлюється проектом, але під фундаментами будівель нагнітання краще вести від зовнішнього ряду ін'єкторів до внутрішнього. Нагнітати розчини допускається при температурі ґрунту в зоні закріплення не нижче +1 °С з нагрівом розчину до 60 °С.

Нагнітання розчинів у піщані ґрунти ведеться тільки тоді, коли розчини через сусідній ін'єктор повністю закачані. При силікатизації і смолизації пісків розчини нагнітають спочатку через перший ряд ін'єкторів, потім через другий і т. д. У рядах розчини нагнітають через один ін'єктор. При дворозчинній силікатизації розчини силікату натрію і хлористого кальцію нагнітають спочатку через непарні ряди ін'єкторів, а потім через парні. Розчин хлористого кальцію необхідно нагнітати як можна швидше після нагнітання розчину силікату натрію. Перерви між нагнітанням першого і другого розчину при швидкості руху ґрунтових вод 0 м/доб не повинні перевищувати 24 год, 0,5 м/доб – 6 год, 1,5 м/доб – 2 год і 3 м/доб – 1 год. Нагнітають розчини при дворозчинній силікатизації двома насосами – кожен розчин своїм насосом. Неприпустимим є змішення розчинів у баках і шлангах. Використовувати обладнання, яким ін'єктувався один з розчинів, можна тільки після ретельного промивання його гарячою водою.

Нагнітання при газовій силікатизації ведуть у такій послідовності: вуглекислий газ, силікатний розчин і знову вуглекислий газ. Вуглекислий газ нагнітають через знижуючий редуктор. Ін'єктор після нагнітання розчину силікату натрію необхідно промити 5 л води. Перерва між нагнітанням розчину і газу не повинна перевищувати 0,5÷1 год, а перерва між нагнітанням газу і розчину повинна бути не менше 0,5 год. Нагнітання газу і розчинів можна вести одразу в декількох місцях, але за умови, що відстань між ін'єкторами (для газової силікатизації) буде не менше шести радіусів закріплення. Для

встановлення граничного тиску нагнітання проводять пробні закачування в ґрунт. Саме нагнітання ведуть при тиску, меншому від граничного, щоб уникнути розривів закріплюваного ґрунту і проривів розчинів на поверхню або за межі закріплюваного масиву.

При приготуванні гелеутворюючих розчинів рекомендується користуватися технологічною схемою, зображеною на рис. 1.38. При цій схемі технологічний процес приготування гелеутворюючого розчину на основі смоли і кислоти виглядатиме таким чином. Концентрована кислота із ємності 1 самопливом надходить в ємність 2, де здійснюється доведення розчину кислоти до робочої щільності. Із ємності 2 насосом 3 робочий розчин кислоти перекачується в ємність 4, потім за допомогою дозатора 5 кислота подається в ємність 6, де змішується з робочим розчином смоли, що надійшов із ємності 10 через дозатор 11. Приготування смоли робочої щільності проводиться в ємності 9. Насосом 12 із сховища 13 вихідний розчин смоли подається в ємність 9. За допомогою компресора 8 гелеутворюючий розчин із ємностей 6 подається до насосів 7, якими ведеться закачування гелеутворюючого розчину безпосередньо в ґрунт через ін'єктори або свердловини. Ця схема приготування гелеутворюючого розчину придатна і для будь-якої рецептури способу однорозчинної силікатизації.

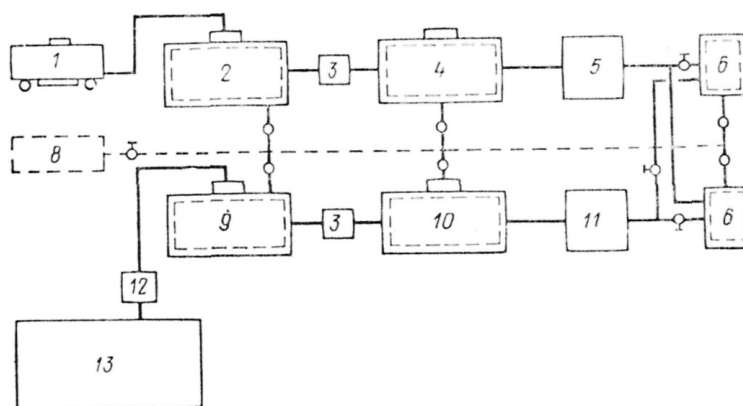


Рис. 1.38. Технологічна схема приготування гелеутворюючого розчину



Велике значення при нагнітанні розчину в ґрунт має тиск. На підставі багатьох практичних спостережень було встановлено, що воно не повинне перевищувати при дворозчинній силікатизації 1,5 МПа, при однорозчинній силікатизації і смолизації піщаних ґрунтів 1,0 МПа, просадних ґрунтів 0,5 МПа. При нагнітанні через манжетні колони граничний тиск визначається зусиллям, необхідним для відкриття манжет і руйнування обойми.

Нагнітання розчинів при способі смолизації з попередньою обробкою ґрунту кислотою ведеться в такій послідовності: спочатку розчин кислоти, потім невелика кількість води (20 ÷ 30 л на західку), а після цього гелеутворюючий розчин. Перерва між нагнітанням кислоти і гелеутворюючого розчину не повинна перевищувати 1 год. Якщо при нагнітанні в ґрунт гелеутворюючий розчин проривається на поверхню, то це пов'язано, як правило, з перевищенням граничного тиску або попаданням розчину в розпушену зону або пустоту. У цьому випадку нагнітання розчину необхідно припинити і затампонувати виявлені розпушені зони, пустоти і прориви цементними або цементно-глинистими розчинами. Тиск нагнітання необхідно знижувати повільно, щоб уникнути забивання ін'єктора ґрунтом.

При проведенні робіт з нагнітання силікатного розчину в просадні ґрунти необхідно дуже обережно нагнітати розчин у верхні зони закріплюваного ґрунту. Чим глибше ведеться нагнітання, тим вище піднімається тиск. Так, на глибині до 12 м він може складати 0,06 ÷ 0,6 МПа, а у верхніх зонах – 0,04 ÷ 0,05 МПа. Щоб розчин не виходив через вже оброблені свердловини, необхідно їх затампонувати цементним розчином і нагнітання вести через свердловини, які знаходяться одна від одної на відстані не менше чотирьох розрахункових радіусів закріплення. Довжина західки при закріпленні основи під фундаментами не повинна перевищувати п'яти радіусів, нагнітання слід вести зверху вниз. При проходці підземних виробок довжина західки і тиск нагнітання залежать від глибини, на якій виконується виробка, і передбачаються проектом.

## **1.6. Підвищення ефективності зміцнення слабких ґрунтів**

### **1.6.1. Рідке скло та його недоліки для закріплення слабких ґрунтів**

Розрізняють розчинне і рідке скло. Обидва належать до мінеральних повітряних в'язучих. Розчинне скло в твердому стані називають глибою силікату або просто силікатом. Рідке скло є водним розчином склоподібних силікатів (глиби силікату) складу  $R_2O \cdot n \cdot SiO_2$ , де  $R_2O$  це  $Na_2O$  або  $K_2O$ , а  $n \cdot SiO_2$  – це модуль рідкого скла, що відображає молекулярне відношення кремнезему до основного оксиду. Розрізняють натрієве і калієве рідке скло. Чим вище модуль, тим краще в'язучі властивості рідкого скла. У будівництві в Україні звичайно використовують натрієве рідке скло з кремнеземним модулем  $2,6 \div 2,8$  у вигляді розчину глиби силікату у воді (у побуті – силікатний клей). Розчинення проводиться насиченою парою в автоклаві. Густина розчину -  $1,3 \div 1,5$  г/см<sup>3</sup>, концентрація -  $70 \div 50$  % .

Лужні властивості і здатність виділяти кремнієву кислоту обумовлюють різноманітні галузі застосування розчинного і рідкого скла як у будівельній, так і в багатьох інших галузях народного господарства в найрізноманітніших цілях. Для закріплення слабких ґрунтів і основ рідке скло використовується як основа силікатних ін'єкційних розчинів, глиносилікатних розчинів у суміші з отверджувачами, як добавка в цементні розчини (цементно-силікатні).

Рідке скло є неводостійким повітряним в'язучим. Так, кислотостійкі бетони з надлишком рідкого скла після перебування у воді протягом 10–15 діб практично повністю втрачають свою міцність. Для підвищення водостійкості рідкого скла і матеріалів на його основі як отверджувач рідкого скла застосовують кремнефтористий натрій  $Na_2SiF_6$ , вводять до їх складу реакційно-здатний кремнезем – силікагель, опал, кремій, халцедон, діатоміт, трепел, а для підвищення кислотостійкості – мінеральний наповнювач із кислотостійких порід (кварц, андезит, діабаз) в основному із зернами розміром до 0,075 мм (75 мкм, майже як у цементу).

Рідке скло, яке застосовується при силікатизації для ущільнення і закріплення слабких ґрунтів, для боротьби з

яружною ерозією, фільтраційного захисту підземної частини будівель і споруд, тампонажу нафтових свердловин, також має недоліки. Найбільш істотним недоліком рідкого скла при його використанні для силікатизації, на наш погляд, є недостатньо висока проникна здатність навіть у дрібні піски, невисока міцність і відсутність водостійкості. Це не дозволяє застосовувати дворозчинну силікатизацію (з хлористим кальцієм  $\text{CaCl}_2$ ), яка характеризується високою міцністю закріплених ґрунтів, для дрібних і пилюватих пісків. Крім того, застосовувати рідке скло в сполученні з  $\text{CaCl}_2$  при контакті із залізобетонними або сталевими конструкціями і фундаментами не можна через небезпеку корозії арматури або сталевих конструкцій.

Для бурових розчинів (15 ÷ 30 % силікату натрію або калію з модулем 2,60 ÷ 2,70, до 26 % різних солей натрію або калію, частіше за все  $\text{NaCl}$  або  $\text{KCl}$ , глини і води) основними недоліками є трудність регулювання їх фільтраційних властивостей і стабільності в'язкісних, структурно-механічних і тиксотропних властивостей, а також водовіддачі, у зв'язку з чим застосування цих складів не завжди і не у всіх районах давало позитивні результати. Для забезпечення стабілізації розчинів розроблені рецептури силікатних розчинів з малою водовіддачею, в яких як стабілізатор використовували гліколевий ефір целюлози. Проте їх промислові випробування також дали суперечливі дані. Для регулювання в'язкісних і структурно-механічних властивостей у розчин додають луги, однак введення надмірної кількості лугу призводить до швидкого затвердіння розчину.

Викладене свідчить про відсутність готових рішень для збільшення проникної здатності, міцності, водостійкості і гідравлічності рідкого скла не тільки у галузі силікатизації ґрунтів, але і в інших галузях будівництва і промисловості будівельних матеріалів. Це зумовлює необхідність проведення глибшого аналізу структури, властивостей і взаємодій рідкого скла з різними матеріалами з інших (крім нагнітання й ін'єктування) галузей застосування рідкого скла.

### ***1.6.2. Теоретичні основи підвищення ефективності зміцнення слабких ґрунтів силікатними розчинами на основі рідкого скла***

За аналогією з теорією твердіння портландцементу П.О.Ребіндера, відповідальним за міцність та інші фізико-механічні властивості рідкого скла є процес його структуроутворення. Хімічні реакції та їх продукти призводять лише до виникнення елементів структури, а її міцність виникає за рахунок контактів різного типу між ними, що визначається характеристиками і властивостями цих елементів, у першу чергу геометричними та електроповерхневими. Виходячи з цього виконаємо аналіз процесів виникнення і властивостей структурних елементів і взаємодій між ними при твердінні рідкого скла.

### **Загальні уявлення про ПЕШ і стійкість дисперсних систем**

В основі проникної здатності і твердіння закріплюючих композицій, зокрема рідкого скла і його композицій, лежить їх колоїдно-хімічна дисперсна структура з явно вираженими електроповерхневими властивостями, явищами і взаємодіями.

Будова ПЕШ згідно з сучасними уявленнями наведена на рис. 1.39. У ньому виділяють потенціал поверхні  $\psi_0$ , щільну частину ПЕШ завтовшки  $d$ , в якій потенціал  $\psi_0$  падає до  $\psi_1$ , а також дифузну частину, що умовно визначається за величиною потенціалу, який зменшується порівняно з потенціалом щільної частини в  $e$  раз ( $\frac{\psi}{e}$ ). У щільному шарі знаходяться специфічно (без гідратної оболонки) адсорбовані на відстані  $x_1$  від поверхні іони і адсорбовані гідратовані протііони на відстані  $x_2$  від поверхні. Щільна частина ПЕШ (шар Гельмгольца) аналогічна плоскому конденсатору, у ній зосереджена лише частина протііонів, і потенціал у ній змінюється при віддаленні від поверхні лінійно (рис. 1.40). Решта частини протііонів зосереджена в дифузній частині ПЕШ. Наочніше дифузну частину ПЕШ, а також плоскість ковзання і  $\zeta$ -потенціал у ній зображене на рис. 1.41. Наявність дифузної частини ПЕШ і електрокінетичного  $\zeta$ -потенціалу пояснює причину експериментально встановлених електрокінетичних явищ.

За рис. 1.41  $\zeta$ -потенціал дорівнює потенціалу дифузного шару в плоскості електроосмотичного ковзання. На відміну від товщини щільної частини, товщина дифузної частини ПЕШ залежить від концентрації індиферентного електроліту (що не взаємодіє із поверхнею), зменшуючись із збільшенням концентрації (рис. 1.42).

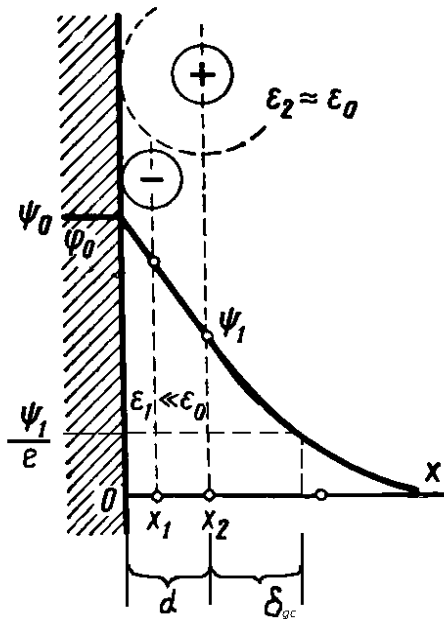


Рис. 1.39. Будова ПЕШ на границі частинка – вода

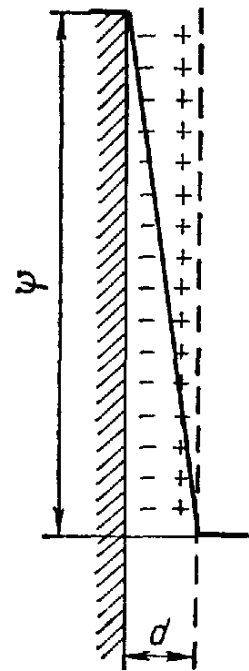


Рис. 1.40. Будова шару Гельмгольца в ПЕШ

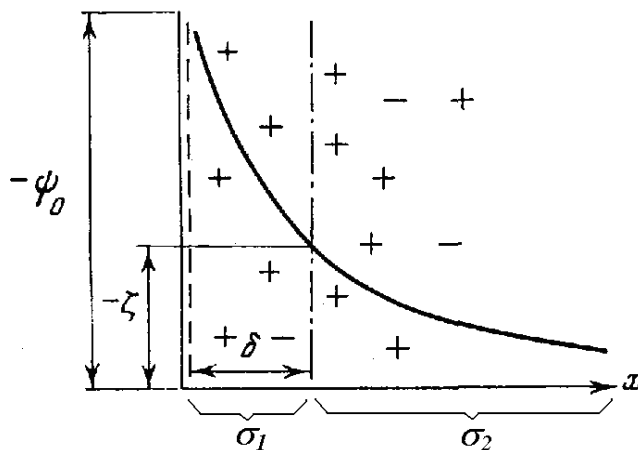


Рис. 1.41. Схематичне подання дифузної частини ПЕШ, плоскості ковзання і  $\zeta$ -потенціалу

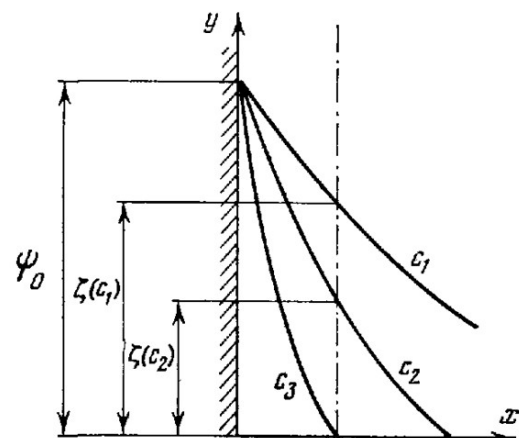


Рис. 1.42. Зміна  $\zeta$ -потенціалу від концентрації індиферентного електроліту ( $c_2 < c_2 < c_3$ )

Подвійні електричні шари ПЕШ на частинках ґрунту і рідкого скла визначають їх стійкість або коагуляцію (злипання), які, у свою чергу, визначають їх реологічні і міцнісні властивості. Стійкість при цьому залежить від розклинювального тиску між частинками  $U(h)$ :

$$U(h) = U(h)_{\text{мол}} + U(h)_{\text{ес}} + U_{\text{СТР}} = -\frac{A^*}{12\pi h^2} + \frac{64n_0 k T \gamma_0^2 e^{-\frac{h}{\delta}}}{\delta} - \frac{1}{2} \frac{U_{\Gamma}^I q}{ze}, \quad (1.36)$$

що складається з молекулярної і електростатичної складових (перша і друга в рівнянні (1.36)), які описує теорія ДЛФО (Дерягіна - Ландау - Фервея - Овербека), а також структурної складової (третья складова), а силова характеристика розклинювального тиску, відповідно дорівнює

$$P(h) = P(h)_{\text{мол}} + P(h)_{\text{ес}} + P_{\text{СТР}} = +\frac{A^*}{6\pi h^3} - 64n_0 k T \gamma_0^2 e^{-\frac{h}{\delta_{\text{диф}}}} + \frac{1}{2} \frac{U_{\Gamma}^I}{zeh}, \quad (1.37)$$

де  $\psi_0$  – поверхневий (електроповерхневий) потенціал, В;

$z$  – валентність потенціалвизначальних іонів;

$e$  – заряд електрона,  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;

$k$  – константа Больцмана,  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;

$n_0$  – концентрація протиіонів, моль/м<sup>3</sup>;

$T$  – абсолютна температура в градусах Кельвіна (293 К);

$h$  – відстань між поверхнями частинок, м;

$\delta_{\text{диф}}$  – ефективна товщина дифузної частини ПЕШ, м;

$A^*$  – константа Гамакера ( $\approx 10^{-19}$  Дж);

$U_{\Gamma}^I$  – енергія гідратації потенціалвизначального іона на поверхні частинки.

Перша складова в рівняннях (1.36)÷(1.37) виражає молекулярне притягання між поверхнями, а друга – електростатичне відштовхування між дифузними частинами ПЕШ. Нерівнозначна залежність молекулярної і електростатичної складових від відстані між поверхнями (перша – степінна, друга – експоненціальна) зумовлює існування мінімумів потенційної енергії і рівності силової характеристики нулю, при яких

встановлюється рівноважний стан дисперсної системи, що наочно відображає графік на рис. 1.43. За рахунок цього ґрунт знаходиться в текучому стані, а рідке скло не твердне. При стисненні ПЕШ під навантаженням поверхні зближуються, дифузні частини ПЕШ перекриваються, електростатична складова призводить до виникнення відштовхування поверхонь, що перешкоджає навантаженню (рис. 1.44). Структурна складова розклинювального тиску залежить від поверхневої концентрації потенціалвизначальних іонів частинок ґрунту  $q$  і енергій їх гідратації, що є постійними і довідковими для даних частинок величинами, а також залежить лінійно – від відстані між частинками  $h$ . Для однойменно заряджених поверхонь структурна складова є відштовхувальною.

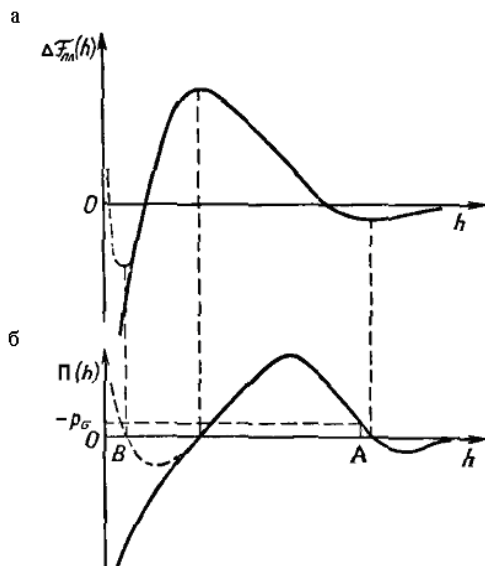


Рис. 1.43. Залежність енергетичної (а) і силової (б) складових розклинювального тиску від відстані між поверхнями частинок

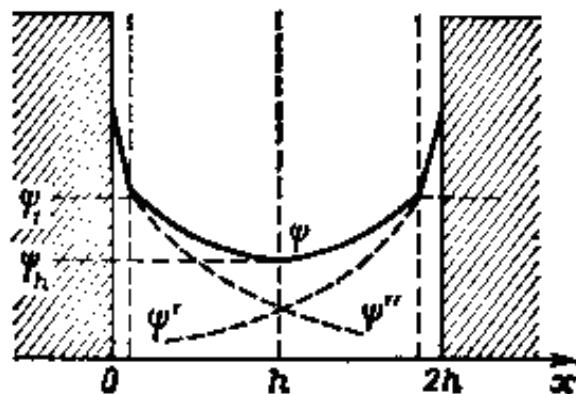


Рис. 1.44. Схема виникнення електричної складової розклинювального тиску при перекритті дифузних частин ПЕШ

Товщина шару води на поверхні частинок, а отже, товщина прошарку води між частинками, залежить від вологості ґрунту. При значній вологості дифузні шари протиіонів, а також поверхневі шари структурованої води частинок розвинені і протидіють напруженням від зовнішніх навантажень. При малій

вологості товщина прошарку води між частинками ґрунту зменшується настільки, що шари протіонів у ПЕШ об'єднуються в єдиний щільний шар (рис. 1.45). При цьому відштовхування між частинками може змінитися на притягання, яке забезпечує міцність ґрунту.

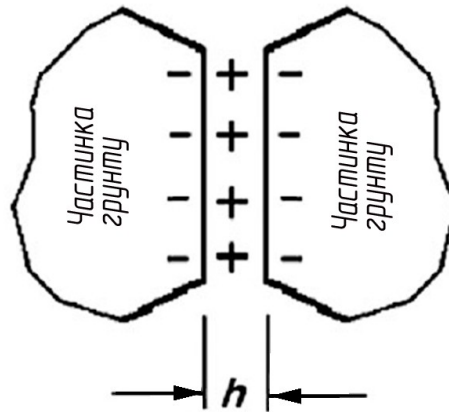


Рис. 1.45. Схема ПЕШ однойменно заряджених частинок високодисперсної фази при незначному вмісті води в ній

Будова ПЕШ, наведена на рис. 1.45, може бути забезпечена також за рахунок концентраційної коагуляції дисперсних систем, що досягається за рахунок високої концентрації електроліту в ній. Однак як при зменшенні вологості, так і при високій коагуляції електроліту міцнісні властивості не є постійними і при збільшенні кількості води, наприклад зволоженні ґрунтів або при контакті рідкого скла з водою, втрачаються.

Якщо дисперсна система складається з частинок, які мають протилежні заряди поверхонь, друга і третя (структурна) складові в рівняннях (1.36) і (1.37) перетворюються на притягальні. За теорією гетерокоагуляції Дерягіна і Ландау, у таких системах вже немає сил, які б відштовхували частинки ґрунту. Це призведе до електрогетерогенної (між протилежно зарядженими частинками) коагуляції і зміцнення ґрунту або зміцнення рідкого скла, яке стане необоротним. Рідке скло при цьому набуде властивостей водостійкого гідравлічного в'язучого.

**Електрогетерогенні взаємодії – основа міцності і водостійкості силікатних розчинів на основі рідкого скла**



Універсальність властивостей рідкого скла забезпечує його взаємодія практично із всіма видами хімічних речовин за їх хімічною класифікацією – оксидами, кислотами, лугами, солями. Для виявлення механізму цієї взаємодії проаналізуємо наявні експериментальні дані і теоретичні уявлення.

### **Взаємодія з кислотами**

**Взаємодія з кремнекислотою і вуглекислим газом.**  
Високомодульне рідке скло не кристалізується. Кристалізації немає і в композиції на рідкому склі з добавкою кремнієвої кислоти. Утворюється лише гель кремнієвої кислоти (кремнегель)  $H_2SiO_3$ . Твердіння вказаної композиції пояснюється виникненням малорозчинного силікату натрію  $Na_2SiO_3$ , який коагулює (злипання частинок) під впливом кремнекислоти. Після витримки зразків на повітрі відбувається взаємодія вільної  $NaOH$  і  $CO_2$  повітря, внаслідок чого з'являється кристалічний карбонат натрію (за даними рентгенограм (РГ)). Інших кристалічних утворень на РГ не було відмічено. На електронно-мікроскопічних знімках (платиновугільні репліки) кристали карбонату натрію  $Na_2CO_3$  мають голчасту форму. Таким чином, при твердінні рідкого скла з отверджувачем у вигляді кремнекислоти утворюється дисперсна система з гелями  $H_2SiO_3$  і кристалічними ( $Na_2SiO_3$ ,  $Na_2CO_3$ ) структурними елементами (частинками).

Композиція рідкого скла з кременевою кислотою у вигляді  $Si(OH)_4$  має такі властивості: початок тужавіння – через 23 хв, кінець – через 53 хв; міцність при стиску близько 5 МПа, яка при висушуванні зразків до постійної маси збільшувалася до 7 МПа, ймовірно за рахунок вказаної взаємодії з вуглекислим газом. Вказані міцності невисокі, що пояснюється відсутністю кристалічних силікатів натрію.

Визначимо електроповерхневі  $\psi^0$  і рівноважні (при рН=12) електроповерхневі потенціали цих структурних елементів. Для малорозчинного силікату натрію  $Na_2SiO_3$  вони дорівнюють

$$\psi_{Na_2SiO_3}^0 = - \frac{-4,02 \cdot 2 - 1,23 + 1,44 \cdot 3}{6} = 0,83B,$$

$$\psi_{Na_2SiO_3}^P = 0,83 - 0,71 = 0,12B.$$

Так само визначимо потенціали для  $\text{H}_2\text{SiO}_3$  і  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (табл. 1.8).

Таблиця 1.8

Електроповерхневий  $\psi^0$  і рівноважний електроповерхневий  $\psi^P$  потенціали структурних елементів композиції з рідкого скла і кремнієвої кислоти

Структурні елементи	Величина $\psi^0$ , В	Величина $\psi^P$ , В
Силікат натрію $\text{Na}_2\text{SiO}_3$	$\psi_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}^0 = 0,83$	$\psi_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}^P = 0,12$
Кремнекислота $\text{H}_2\text{SiO}_3$	$\psi_{\text{H}_2\text{SiO}_3}^0 = -0,115$	$\psi_{\text{H}_2\text{SiO}_3}^P = -0,89$
Карбонат натрію $\text{Na}_2\text{CO}_3$	$\psi_{\text{Na}_2\text{CO}_3}^0 = 0,8$	$\psi_{\text{Na}_2\text{CO}_3}^P = 0,09$

Як бачимо, структурні елементи, що виникають при твердінні рідкого скла з кремневою кислотою (а також з вуглекислим газом), мають різні за знаком рівноважні електроповерхневі потенціали. Утворення протилежно заряджених структурних елементів призводить до виникнення електрогетерогенних контактів (ЕГК) між ними та електрогетерогенної коагуляції композиції із забезпеченням через невисокі величини  $\psi_{\text{Na}_2\text{CO}_3}^P$ ,  $\psi_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}^P$  і  $\psi_{\text{H}_2\text{SiO}_3}^P$  її невисоких міцності і, ймовірно, гідравлічності.

**Взаємодія з кремнефтористоводневою кислотою  $\text{H}_2\text{SiF}_6$ .**  
 При твердінні рідкого скла з кремнефтористоводневою кислотою  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  між силікатом натрію і кислотою протікає реакція в дві стадії за формулами (1.17) і (1.18) з утворенням кремнефтористого натрію  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ , фтористого натрію  $\text{NaF}$  і кремнегелей  $\text{H}_2\text{SiO}_3$  і  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ , що є структурними елементами. Розраховані величини потенціалів  $\psi^0$  і  $\psi^P$  цих структурних елементів наведені в табл. 1.9.

Виникнення структурних елементів з однаковими за знаком (негативними) рівноважними потенціалами  $\psi^P$  і зв'язування води розчину кремнегелями  $\text{H}_2\text{SiO}_3$  і  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  зумовлюють швидке твердіння рідкого скла за механізмом концентраційної коагуляції. Коагуляційні контакти при такому механізмі не є водостійкими і

мають невисоку міцність, у зв'язку з чим, як відомо, кремнефтористоводнева кислота традиційно використовується лише як добавка-прискорювач для ущільнення слабких ґрунтів.

Таблиця 1.9

Електроповерхневий  $\psi^0$  і рівноважний електроповерхневий  $\psi^P$  потенціали структурних елементів композицій з рідкого скла з різними добавками

Добавка	Структурні елементи	Величина $\psi^0$ , В	Величина $\psi^P$ , В
Кремнефтористоводнева кислота $H_2SiF_6$	Кремнефтористий натрій $Na_2SiF_6$	$\psi_{Na_2SiF_6}^0 = -2,27$	$\psi_{Na_2SiF_6}^P = -2,27$
	Кремнегель $H_2SiO_3$	$\psi_{H_2SiO_3}^0 = -0,115$	$\psi_{H_2SiO_3}^P = -0,89$
	Фторид натрію $NaF$	$\psi_{NaF}^0 = -0,43$	$\psi_{NaF}^0 = -0,43$
	Кремнегель $H_4SiO_4$	$\psi_{NaF}^0 = -0,43$	$\psi_{NaF}^P = -0,43$
Соляна кислота $HCl$	Кремнегель $H_2SiO_3$	$\psi_{H_2SiO_3}^0 = -0,115$	$\psi_{H_2SiO_3}^P = -0,89$
	Хлорид натрію $NaCl$	$\psi_{NaCl}^0 = 0,34$	$\psi_{NaCl}^P = -0,37$
Сірчана кислота $Na_2SO_4$	Сульфат натрію $Na_2SO_4$	$\psi_{Na_2SO_4}^0 = 0,12$	$\psi_{Na_2SO_4}^P = -0,59$
	Сульфат натрію $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	$\psi_{Na_2SO_4 \cdot 10H_2O}^0 = 0,28$	$\psi_{Na_2SO_4 \cdot 10H_2O}^P = -0,4$
Плави́кова кислота	Фторид натрію $NaF$	$\psi_{NaF}^0 = -0,43$	$\psi_{NaF}^P = -0,43$
	Кремнегель $H_2SiO_3$	$\psi_{H_2SiO_3}^0 = -0,115$	$\psi_{H_2SiO_3}^P = -0,89$
Кремнефтористий натрій $Na_2SiF_6$	Фторид натрію $NaF$	$\psi_{NaF}^0 = -0,43$	$\psi_{NaF}^P = -0,43$
	Кремнегель $Si(OH)_4$	$\psi_{NaF}^0 = -0,43$	$\psi_{NaF}^P = -0,43$
	Гідроксид натрію $NaOH$	$\psi_{NaOH}^0 = 1,89$	$\psi_{NaOH}^P = 1,18$

**Взаємодія з іншими кислотами.** Оскільки лужні силікати – це солі дуже слабкої кремневої кислоти, остання легко витісняється із своїх солей всіма водорозчинними мінеральними і органічними кислотами. Відповідно реакція рідкого скла з соляною кислотою  $HCl$  така:



При взаємодії рідкого скла з сірчаною кислотою  $H_2SO_4$  відбувається також виділення гелю кремневої кислоти і

кристалічного сульфату натрію, які утворюють пухку структуру. Зчеплення між частинками незначне.

Рідке скло легко розкладається і плавиковою кислотою. У першу добу в гелеподібній масі утворюється велика кількість кристалічних частинок фтористого натрію NaF, що мають чітку кубічну форму. Реакція між рідким склом і плавиковою кислотою така:



згідно з якою утворюються гелеподібні (кремнегель  $\text{H}_2\text{SiO}_3$ ) і кристалічні (NaF і  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ ) структурні елементи.

Проаналізуємо електроповерхневі властивості структурних елементів і взаємодії між ними при твердінні рідкого скла з добре розчинними кислотами: HCl,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  і HF. Відповідні електроповерхневі потенціали наведені в табл. 1.9. Як бачимо, при твердінні рідкого скла з цими кислотами позитивно заряджені структурні елементи не виникають. У зв'язку з цим рідке скло з цими кислотами як отверджувачами не є водостійким.

### **Взаємодія з натрієвими солями (кремнефтористим натрієм)**

Відповідно до реакцій (формули (1.19) і (1.20)) структурними елементами композиції рідкого скла і кремнефтористого натрію при твердінні можуть бути кремнефтористий натрій  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ , фторид натрію NaF, кремнегель  $\text{Si}(\text{OH})_4$  і гідроксид натрію NaOH, величини електроповерхневих потенціалів яких наведені в табл. 1.9. Як бачимо, частинки NaOH мають позитивний рівноважний електроповерхневий потенціал, а інші – негативний, що і визначає електрогетерогенний механізм твердіння рідкого скла у присутності кремнефтористого натрію  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ .

Співвідношення величин потенціалів негативно заряджених частинок кремнефтористого натрію  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  і кремнегелю  $\text{Si}(\text{OH})_4$ , а також позитивно заряджених частинок NaF припускає можливість отримання максимальної міцності за рахунок оптимального співвідношення між цими продуктами, при якому

забезпечуватиметься взаємна коагуляція. Це підтверджується експериментально одержаним зниженням міцності рідкого скла при більшій витраті кремнефтористого натрію і низькою міцністю рідкого скла за відсутності кремнефтористого натрію як прискорювача твердіння (отверджувача). У першому випадку виникає надлишок частинок  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ , що не прореагували, з високим потенціалом, а в другому випадку – відсутність частинок  $\text{NaOH}$ , що є продуктом взаємодії рідкого скла з кремнефтористим натрієм  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ .

### 1.6.3. Модель пористої структури вологих і водонасичених слабких ґрунтів і рідкого скла

Як зазначалося, слабкі ґрунти є дисперсними системами з різним складом дисперсної фази (або дисперсійного середовища) з граничними шарами води і ПЕШ. Спрощену модель слабого ґрунту або рідкого скла наведено на рис. 1.46.

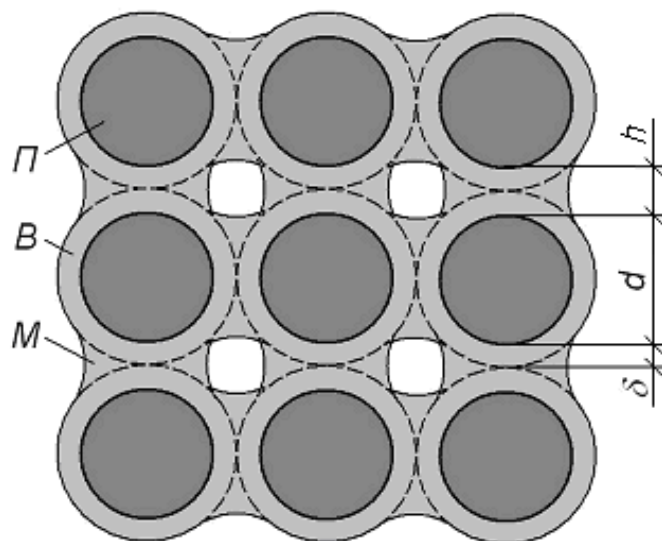


Рис. 1.46. Спрощена схема структури дисперсної системи слабого ґрунту або рідкого скла:

*П* - частинки дисперсної фази; *В* - півки води; *М* - меніски

Дисперсійне середовище на цій схемі представлене півковою на поверхні зерен (частинок) ґрунту і звичайною (вільною, або гравітаційною) водою (В) в об'ємі між частинками.

Під впливом поверхневих сил властивості плівкової води відрізняються від властивостей вільної води, зокрема в'язкістю, яка значно перевищує в'язкість вільної води. Крім того, через тонкі прошарки води між частинками ґрунту здійснюється взаємодія між частинками, де вода може як відштовхувати частинки ґрунту, так і притягувати їх залежно від електроповерхневих властивостей частинок і товщини прошарків  $h$ , яка у свою чергу залежить від кількості води в дисперсній системі (вологості ґрунту або вмісту в рідкому склі).

Товщина плівки води на частинках піску визначається рівнянням

$$W = \frac{\rho_e \cdot \delta \cdot \pi d^2}{\rho_n \cdot \pi d^3 / 6} = \frac{6\rho_e \delta}{\rho_n d}, \quad (1.41)$$

звідки

$$\delta = \frac{W\rho_n d}{6\rho_e} = \frac{2650Wd}{6 \cdot 1000} = 0,442Wd. \quad (1.42)$$

Залежність (формула (1.42)) товщини плівки води від вологості пилюватого піску наведена на рис. 1.47. Коли всі порожнини між частинками заповнені водою, а частинки розсунені, товщина  $h$  є значною, утворюється рідиноподібна система - суспензія (при однозаряджених частинках), яка характеризується високою текучістю і низькою в'язкістю. Опір зсуву такої системи наближається до нуля, а в'язкість наближається до в'язкості води  $\eta_e = 0,001 \text{ Па} \cdot \text{с}$ . При зменшенні вологості товщина прошарків води  $h$  зменшується, і в'язкість дисперсної системи збільшується. Це передбачає значну залежність реологічних характеристик слабких ґрунтів і рідкого скла від вмісту твердої фази (або води) в них.

Аналіз графіків на рис. 1.47 і розрахунки за формулою (1.42) показують, що товщина адсорбційних плівок при фактичних вологостях піску значно перевищують  $6,3 \text{ \AA}$ . Така товщина повинна бути при вологості піску, яка не перевищує  $0,1 \%$ , тобто повітряній вологості.

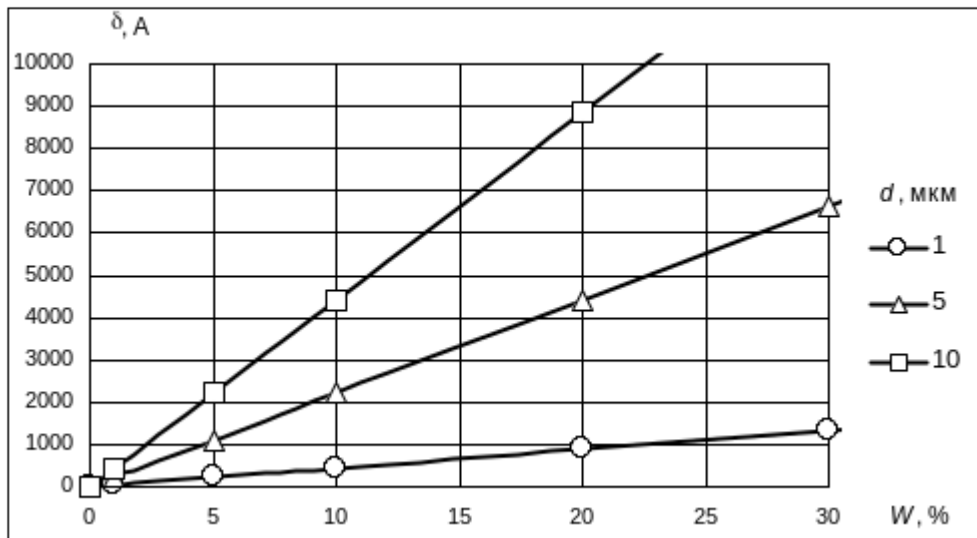


Рис. 1.47. Залежність товщини плівки води  $\delta$  від вологості  $W$  пилюватого піску з розмірами частинок  $d$  1, 5 і 10 мкм

#### 1.6.4. Електрокінетичні явища і механізм проникної здатності рідкого скла в дрібні і пилюваті піски

**Потенціал і струм течії.** При руху розчину електроліту через капіляри або пори капілярної системи під дією зовнішнього тиску  $P$  виникають потоки іонів обох знаків, що захоплюються потоком води. При цьому переважає потік протиіонів, що знаходяться в дифузійній частині ПЕШ стінок капілярів, порівняно з коіонами. Різниця потоків є конвективним поверхневим струмом  $I_s$ , який називається струмом течії (рис. 1.48).

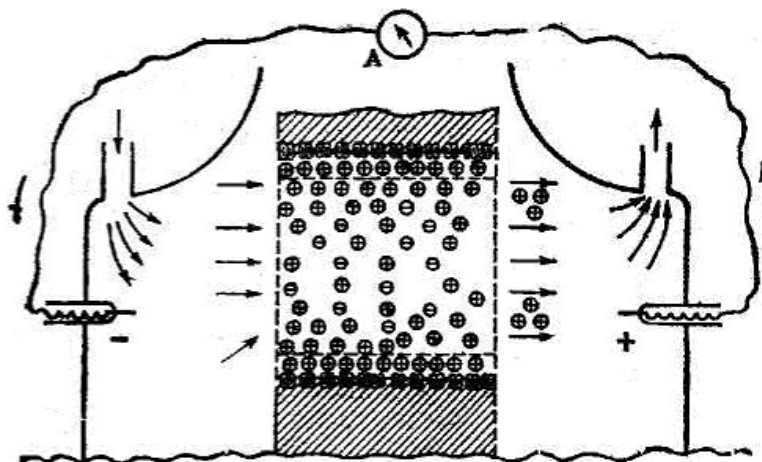


Рис. 1.48. Схема виникнення потенціалу течії через капіляри або пори капілярної системи діафрагми чи мембрани

На виході з капіляра накопичується вільний заряд протиіонів, а усередині капіляра - вільний заряд потенціалвизначальних іонів, що призводить до виникнення різниці потенціалів  $E$ , яка викликає стрічний об'ємний струм  $I_v$  за всім обсягом капіляра. Вони зростатимуть до тих пір, поки потоки іонів не стануть рівними. При цьому встановиться стаціонарний стан  $I_v = I_s$  з постійним потенціалом течії  $E_{пт}$  при  $I = 0$ . Відповідні рівняння для цих потоків

$$I_s = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 \cdot \zeta \cdot AP}{\eta \cdot l}, \quad (1.43)$$

$$I_v = \frac{Akk_{пт}}{l}, \quad (1.44)$$

де  $\varepsilon$  - відносна діелектрична проникність води в рідкому склі;  
 $\varepsilon_0$  - абсолютна діелектрична проникність;  
 $\zeta$  - дзета-потенціал (електрокінетичний потенціал) частинок рідкого скла, В;  
 $A$  - площа перерізу капіляра, м<sup>2</sup>;  
 $\eta$  - в'язкість води  $\frac{H \cdot c}{M^2}$ ;  
 $l$  - довжина капіляра, м;  
 $P$  - зовнішній тиск, Н/м<sup>2</sup>;  
 $k$  - електропровідність розчину-електроліту,  $\frac{1}{Om \cdot m}$ , або 1/с, що впливає із перетворення

$$\frac{1}{\frac{B}{A} \cdot m} = \frac{\frac{Kl}{c}}{\frac{Kl}{m} \cdot m} = \frac{1}{c}.$$

З умови стаціонарного стану ( $I_v = I_s$ ) знайдено рівняння Гельмгольца-Смолуховського для потенціалу течії

$$\zeta = \frac{\eta \cdot k \cdot E_{пт}}{\varepsilon \cdot P}. \quad (1.45)$$

Звичайно це рівняння використовується для експериментального визначення  $\zeta$ -потенціалу. Експериментальні значення  $E_{пт}$  і  $I_s$  для капілярно-пористих тіл у водних розчинах



електролітів звичайно мають порядок сотень мілівольт або одиниць вольт і відповідно  $10^{-8} \div 10^{-10}$  А на 1 атм ( $100000 \text{ Н/м}^2$ ).

**Електроосмос і електрофорез.** Накладення різниці електричних потенціалів (напруги) до пористого тіла або до дисперсної системи призводить до виникнення електроосмосу, тобто до руху протиіонів дифузної частини ПЕШ, а також захоплюваної ними води в капілярах пористого тіла або капілярах, утворених частинками дисперсної фази. Причиною такого руху протиіонів і води, як відомо, є наявність ПЕШ на границі між частинками піску і водою. Електрофорез є рухом заряджених частинок дисперсної фази в постійному електричному полі (рис. 1.49).

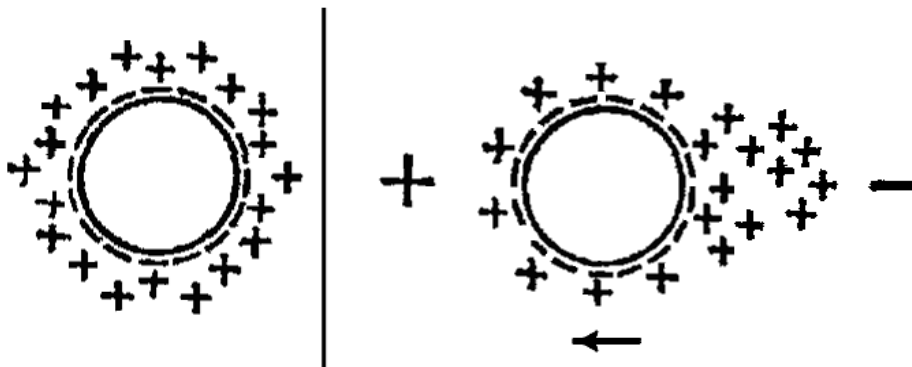


Рис. 1.49. Схема електрофорезу

Негативно заряджена частинка набуває спрямованого руху в бік позитивного полюса, а іони дифузного шару переміщуються в протилежному напрямі. Швидкість електрофорезу при цьому визначається формулою

$$u_{\text{ЕФ}} = \frac{\varepsilon \cdot X \cdot \zeta}{\pi \cdot \eta} \cdot f\left(\frac{r}{\delta}\right), \quad (1.46)$$

де  $f$  - складна функція, що приймається для  $r/\delta = 1$ , дорівнює 1,4.

**Електрокінетичні явища і механізм проникної здатності рідкого скла в дрібні і пилюваті піски.** Проникна здатність рідкого скла при однорозчинній силікатизації зі щільністю, необхідною для їх зміцнення ( $1,25 \div 1,3 \text{ г/см}^3$ ), у дрібні і пилюваті

піски є незначною, у зв'язку з чим розчини ще більшої щільності (1,33 г/см<sup>3</sup>) при дворозчинній силікатизації для вказаних пісків непридатні. Дані про таку невелику проникну здатність рідкого скла приймаються як об'єктивна реальність, тому спроби збільшення проникної здатності рідкого скла (судячи з літературних джерел) не робилися через їх, як вважається, нереальність. Проте, на наш погляд, це не так. Збільшення проникної здатності може бути досягнуте на основі аналізу сил, що породжуються електрокінетичними явищами при нагнітанні рідкого скла, шляхом зниження сил, які гальмують його потік.

Особливістю течії рідкого скла при його нагнітанні в піщаний ґрунт є те, що потенціал течії  $E_{ПТ}$  виникає в самому розчині рідкого скла за рахунок протікання води між його частинками і відповідного захоплення протиіонів ПЕШ цих частинок (рис. 1.50). Це обумовлено тим, що тиск на виході з отвору перфорованого ін'єктора передається на воду-електроліт між негативно зарядженими частинками рідкого скла (спочатку силікату натрію, а потім і кремнегелю) з відповідними ПЕШ, яка продавлюється між ними і захоплює протиіони ПЕШ і ці частинки за собою. Потік протиіонів відбувається разом з потоком води, а частинок рідкого скла – з відставанням через свої набагато більші розміри. У результаті виникає електричне поле  $E_{ПТ}$ , обернене вглиб піску позитивним полюсом (за рахунок зміщеного заряду протиіонів) і негативним (за рахунок виниклого надлишку негативного заряду потенціалвизначальних іонів частинок піску) всередину потоку рідкого скла.

Притягувальна взаємодія між однонаправленими макродиполями викликає структурування рідкого скла, що частково ущільнює його і віджимає з рідкого скла воду у напрямі руху. Результуюче електрополе (потенціал течії) втягує в себе протиіони ПЕШ всіх частинок рідкого скла, перешкоджаючи його течії під тиском. Потік припиняється при встановленні рівності сил

$$F_{НАГН} = F_{ТР} + F_{ПТ}, \quad (1.47)$$

де  $F_{НАГН}$  – сила, викликана тиском нагнітання;

$F_{ТР}$  – сила в'язкого тертя в потоці рідкого скла;

$F_{ПТ}$  – сила, обумовлена потенціалом течії.

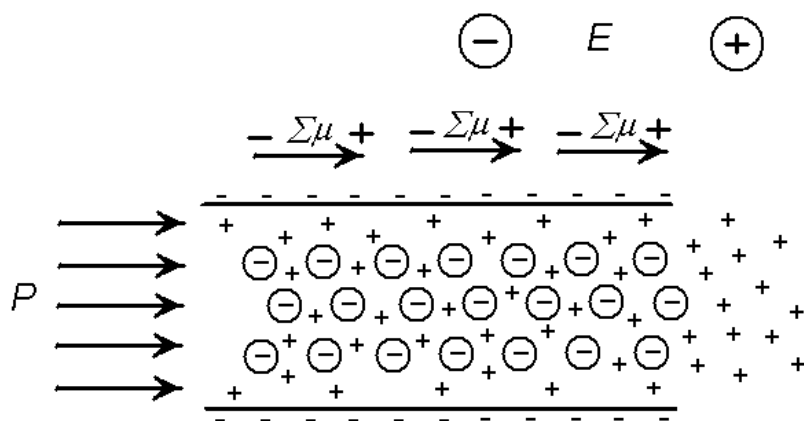


Рис. 1.50. Схема виникнення потенціалу течії  $E$ ,  $B$  у дисперсній системі при її нагнітанні в капіляр, утворений частинками піску

У даному рівнянні зліва – рушійна сила потоку, справа – сили, гальмуючі потік. Прямі на рис. 1.51 показують, що глибина нагнітання рідкого скла зменшується в три і більше разів при збільшенні потенціалу течії  $E_{ПТ}$ . При цьому вплив потенціалу течії виявляється набагато більш значущим, ніж вплив тиску.

Викладене свідчить про нестабільність глибини нагнітання і її незначну величину через гальмуючу дію потенціалу течії  $E_{ПТ}$  і необхідність його усунення або зменшення. Для досягнення цієї мети можуть бути придатними лише добавки-модифікатори, що забезпечують твердіння рідкоскляної композиції за механізмом електрогетерогенної коагуляції. З числа таких розглянутих добавок кремнекислота і вуглекислий газ неприйнятні через невелику водостійкість і міцність рідкоскляної композиції, а кремнефтористий натрій, гідроксиди і силікати кальцію неприйнятні через їх порошкоподібний стан під час нагнітання, яке погіршить проникну здатність подібно до цементу.

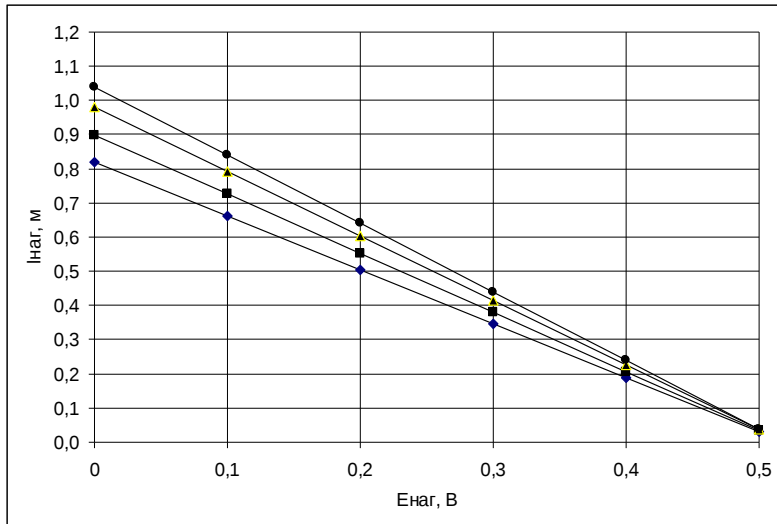


Рис. 1.51. Теоретичні прямі залежності глибини нагнітання від потенціалу течії  $E_{пт}$  і тиску нагнітання  $P$  (від 1,0 до 1,2 атм від низу до верху)

### 1.6.5. Реологічні властивості рідкого скла

Вважається, що важливим показником для проникної здатності і закріплення ґрунтів є в'язкість початкового розчину, що нагнітається. За фізичною сутністю в'язкість є силою молекулярної взаємодії між двома шарами рідини, що припадає на одиницю поверхні площі їх ковзання при градієнті швидкості  $dv/dl = 1$ . Сила  $F$  взаємодії між шарами виражається формулою

$$F = \eta (dv/dx) S, \quad (1.48)$$

де  $\eta$  – в'язкість, або коефіцієнт внутрішнього тертя, Па · с;  
 $dv/dx$  – градієнт швидкості в напрямі, перпендикулярному до поверхні  $S$ .

З формули (1.48) в'язкість визначиться рівнянням

$$\eta = \frac{F}{S \cdot \frac{dv}{dx}}. \quad (1.49)$$

В'язкість рідкого скла залежить від його щільності (рис. 1.52). Виходячи з цієї залежності рідке скло слід вважати дисперсною системою, яка при збільшенні його щільності (об'ємної частки силікату натрію) стає структурованою дисперсною системою із силою взаємодії між частинками дисперсної фази, що різко зростає при високій щільності і відповідно різко зростаючою в'язкістю. Різкий перехід на кривій в'язкості від слабо нахиленої ділянки до різко зростаючої свідчить про те, що при щільності, відповідній слабо нахиленим ділянкам, дисперсна система рідкого скла є зоєм (практично відсутня взаємодія між частинками), і в ній міститься вільна вода. Різке зростання нахилу кривих в'язкості є результатом перетворення золю в гель, в якому діють значні зв'язки між частинками і відсутня вільна вода. Вільна вода зумовлює низьку в'язкість рідкого скла, проте знижує його міцність, а зв'язана вода знижує проникну здатність складу.



Рис. 1.52. Залежність в'язкості від щільності рідкого скла в інтервалі щільності більше 1,25 г/см<sup>3</sup> (об'ємна частка більше 0,48)

У зв'язку з викладеним, щільність рідкого скла перед початком її першого різкого збільшення, яка дорівнює 1,25 г/см<sup>3</sup> (в'язкість 0,006 Па\*с (рис. 1.52)), може бути найкращою при його модифікуванні зі збільшенням міцності і збереженні в'язкості для нагнітання з метою як зміцнення, так і ущільнення ґрунтів.

## **1.7. Модифікований силікатний розчин оптимального складу для закріплення слабких ґрунтів**

### ***1.7.1. Обґрунтування можливості зміцнення рідкого скла і надання йому гідравлічних властивостей***

Видалення води із слабого ґрунту може забезпечити високу міцність ґрунтів. Простішим і доступнішим є електроосмос або, наприклад, капілярне осушення ґрунту. Нагнітання у слабкі ґрунти при однорозчинній силікатизації рідкого натрієвого скла не дає значного зміцнення з причини, яка лежить і в основі низької міцності слабого ґрунту – однойменний негативний заряд структурних елементів рідкого скла. Застосування хлористого кальцію  $\text{CaCl}_2$  при дворозчинній силікатизації обмежено застосуванням цього способу лише для крупних і середньої крупності пісків; для зміцнення дрібних і пилюватих пісків рідке скло з хлористим кальцієм не застосовується.

Міцність рідкого скла можна збільшити за рахунок введення активних мікронаповнювачів, що реагують з рідким склом, однак це також знизить проникну здатність рідкого скла через набагато більші розміри частинок мікронаповнювачів порівняно з розмірами частинок рідкого скла в період нагнітання. З урахуванням викладеного, зміцнення рідкого скла і надання йому гідравлічності можливе за рахунок введення до його складу модифікуючої добавки, що є високодисперсною системою (частинки дисперсної фази менші, ніж у рідкого скла в період нагнітання) із змінним електроповерхневим потенціалом – негативним до твердіння рідкого скла, який потім стає позитивним при його твердінні. Це повинно привести до виникнення електрогетерогенних контактів, підвищення міцності рідкого скла і надання йому гідравлічних властивостей. Такою модифікуючою речовиною може бути водорозчинна аніонна добавка-поліелектроліт, яка при зменшенні кількості води і підвищенні її концентрації зменшує степінь розчинення, і її активні неорганічні аніони  $\text{A}^-$  перетворюються на неорганічні дипольні групи типу  $-\text{A}^- - \text{Me}^+$ . Вказані властивості повинні мати багато добавок-суперпластифікаторів для бетону. Підвищення концентрації цієї добавки відбуватиметься за рахунок зв'язування

вільної води в рідкому склі в кремнегелі при твердінні рідкого скла у присутності кремнефтористоводневої кислоти за реакціями з формул (1.17)÷(1.18). Як така речовина може бути прийнята модифікуюча добавка натрієвої солі поліметиленаполінафталінсульфоїкислоти (суперпластифікатора нафталінформальдегідного типу С-3 або СП-1), що звичайно застосовується як добавка-суперпластифікатор для цементно-водних суспензій і є добре вивченою, недорогою і доступною.

Молекули С-3 у водному розчині є негативно зарядженими органічними іонами за рахунок поверхневих неорганічними аніонів, утворених за рахунок дисоціації активних функціональних груп  $-\text{SO}_3\text{Na}$ . Протиіонами при цьому є в основному катіони  $\text{Na}^+$ . Основна маса молекул С-3 є полімерною вуглеводневою основою нафталіну, що має степінь конденсації  $n = 217$  (рис. 1.53).

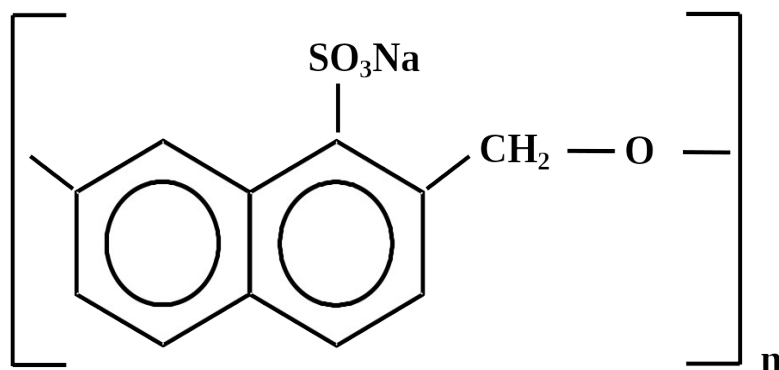


Рис. 1.53. Структура натрієвої солі поліметиленаполінафталінсульфоїкислоти (суперпластифікатора нафталінформальдегідного типу)

### ***1.7.2. Визначення оптимального складу модифікованого силікатного розчину з добавкою суперпластифікатора нафталінформальдегідного типу***

#### **Визначення оптимальної кількості отверджувача $\text{H}_2\text{SiF}_6$**

Як отверджувач рідкого скла була вибрана кремнефтористоводнева кислота  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  у зв'язку з утворенням великої кількості кремнегелю  $\text{H}_2\text{SiO}_3$  і  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ . Вміст

отверджувача у складі рідкого скла визначалось експериментально за часом початку тужавіння (життєздатності) рідкого скла. У табл. 1.10 і на рис. 1.54 наведені дані про вплив кількості  $H_2SiF_6$  на початок тужавіння рідкого скла. Як видно з табл. 1.10 час початку тужавіння такого складу при  $4^\circ C$ , що відповідає температурі ґрунту на глибині, складає 90 хв, що допустимо для закріплення ґрунтів.

Таблиця 1.10

Дані про вплив кількості кремнефтористоводневої кислоти  $H_2SiF_6$  на терміни тужавіння рідкого скла

Вміст $H_2SiF_6$ , %	Початок тужавіння, хв			Висновок про придатність складу для закріплення
	при $20^\circ C$	при $4^\circ C$	при $0^\circ C$	
0	$\infty$			Непридатний
0,06	>120			Придатний
0,12	17	90	60	Непридатний
0,20	10			
0,30	2			

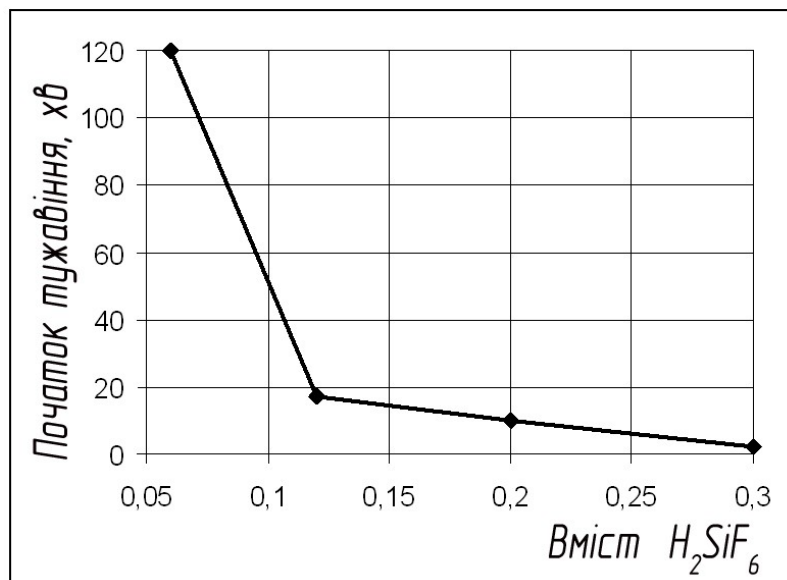


Рис. 1.54. Вплив кількості кремнефтористоводневої кислоти  $H_2SiF_6$  на терміни тужавіння рідкого скла

Згідно з графіком на рис. 1.54 при вмісті отверджувача, що дорівнює 0,12, спостерігається різкий перехід кривої від крутої



ділянки до пологої. Це пояснюється тим, що при меншому вмісті, ніж 0,12, частина скла залишається такою, що не прореагувала, а це затримує час тужавіння і знижує кінцеву міцність скла. При більшому вмісті отверджувача, ніж 0,12, частина кислоти в складі залишається у незв'язаному стані, тобто є надмірною. З урахуванням цього, а також виходячи з раціональної тривалості одного циклу нагнітання в один ін'єктор, який дорівнює приблизно 20 хв, вибрано вміст кремнекислоти у складі рідкого скла, що дорівнює 0,12, при якому час до початку тужавіння складає 17 хв.

### Експериментальні дослідження впливу добавки С-3 на проникну здатність рідкоскляної композиції

Серед зазначених властивостей рідкого скла, на які може вплинути добавка С-3, найважливішою є проникна здатність. Експериментально показано, що на реологічні властивості – умовну в'язкість (час витікання складу із віскозиметра ВЗ-1 через капіляр) і динамічну на ротаційному віскозиметрі ВСН-3 (опір складу обертанню циліндра) - добавка С-3 істотно не впливає (рис. 1.55).

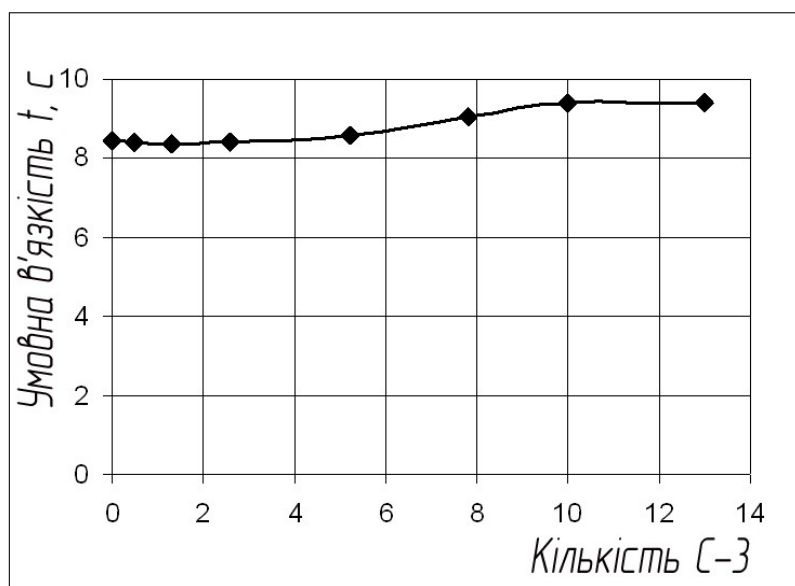


Рис. 1.55. Зміна умовної в'язкості  $t$  (с) рідкого скла від кількості добавки С-3 %

У той же час добавка С-3 значно впливає на проникну здатність. Проникну здатність оцінювали шляхом нагнітання

рідкого скла з отверджувачем і добавкою С-3 за допомогою поршневого розчинонасоса в заповнену дрібним піском комірку із поліетиленової труби діаметром  $D_u = 35$  мм з отворами, які закривали фільтруючою тканиною (рис. 1.56). Радіус закріплення заздалегідь оцінювали за виходом закріплюючого розчину через отвори і тоді заміряли висоту стовпа розчину в подовжньо розрізаних трубках приблизно через добу після нагнітання (рис. 1.57).

На рис. 1.58 наведена графічна залежність глибини нагнітання розчину рідкого скла залежно від вмісту добавки С-3. З графіка видно, що С-3 сильно збільшила глибину нагнітання композиції порівняно з бездобавочним рідким склом (для рідкоскляної композиції з С-3 = 7,8 % – у 4 рази). Збільшення проникної здатності рідкоскляної композиції з добавкою С-3 обумовлене електрофоретичним переміщенням у полі потенціалу течії негативно заряджених частинок С-3, що призводить до різкого зменшення величини потенціалу течії і усунення за рахунок цього його гальмуючого впливу.



Рис. 1.56. Установка для визначення радіуса нагнітання розчину в ґрунт



Рис. 1.57. Подовжньо розрізані трубки після нагнітання закріплюючого розчину

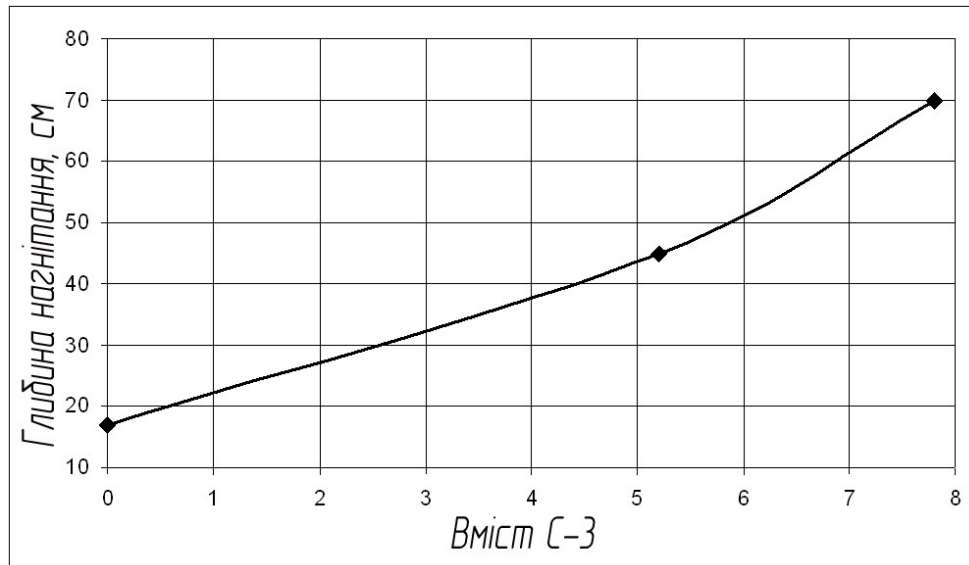


Рис. 1.58. Глибина нагнітання в дрібний пісок рідкого скла залежно від вмісту добавки С-3 в ньому

### **Експериментальні дослідження впливу добавки С-3 на міцність, водостійкість і водонепроникність рідкого скла**

Виконано експериментальні дослідження впливу добавки С-3 на міцність при стиску рідкого скла з отверджувачем – кремнефтористоводневою кислотою. Для проведення досліджень виготовляли 6 серій зразків-кубиків  $4 \times 4 \times 4$  см по 3 на кожний склад. Контрольний склад № 1 містив розчин рідкого скла РС щільністю  $1250 \text{ кг/м}^3$  і розчин кремнефтористоводневої кислоти (КФВК) щільністю  $1080 \text{ кг/м}^3$  – у кількості 0,12 % маси рідкого скла за сухою речовиною. У склади № 1, № 2, № 3, № 4, № 5 і № 6 вводили добавку С-3 в кількостях відповідно 0,5, 1,3, 2,6, 5,2, 8,17, 9,18 і 10 % маси рідкого скла. Добавку С-3 заздалегідь розчиняли в частині води, що використовувалась для приготування рідкого скла. Зразки витримували першу добу на повітрі в нормальних умовах, а потім у воді при нормальній температурі  $20^\circ\text{C}$ . Випробування на стиск зразків-кубиків проводили через 3, 7 і 14 діб. На рис. 1.59 наведені дані зміни міцності при стиску  $R_{\text{CT}}$  від вмісту С-3.

За даними графіків на рис. 1.59, а, добавка С-3 вже на 3 добу твердіння збільшує міцність рідкоскляної композиції, при цьому максимальна міцність має місце при С-3 = 7,8 %. Збільшення міцності рідкоскляної композиції при С-3 = 7,8 % стає ще більшим на 7 і 14 добу відповідно у 2,4 та 5,8 разу. Це свідчить про оптимальний за міцністю вміст С-3 при твердінні композиції на повітрі і недоцільність збільшення кількості цієї добавки. Підвищення міцності при введенні добавки обумовлене утворенням ЕГК між частинками С-3 з полярним шаром, оберненим назовні позитивним полюсом (позитивний полярний шар), і негативно зарядженими частинками рідкого скла. При вмісті С-3 = 7,8 % досягається рівність площ поверхні частинок з позитивним полярним шаром і негативним електроповерхневим потенціалом, або максимальна кількість ЕГК.

а)

б)

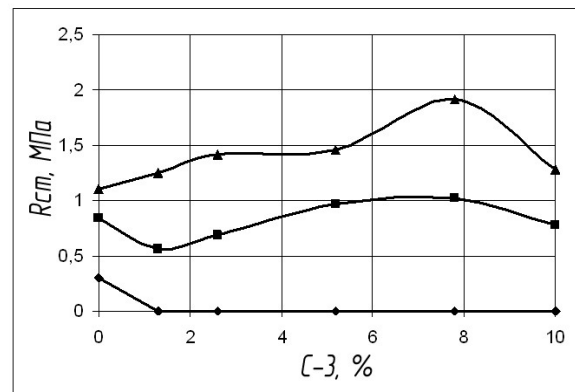
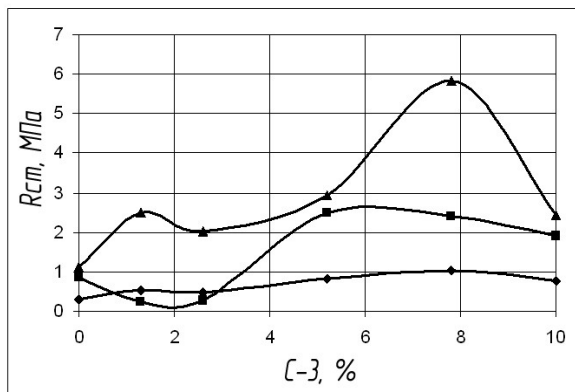


Рис. 1.59. Зміна міцності при стиску  $R_{ст}$ , МПа, рідкоскляної композиції від вмісту добавки С-3 при твердінні на повітрі (а) і у воді (б) на 3, 7 і 14 добу (знизу угору)

При твердінні у воді, яке починається на 3 добу (рис. 1.59, б) зразки із бездобавочного рідкого скла повністю втрачають міцність (зразок у воді розвалюється). Зразки із композицій з добавкою С-3 при твердінні у воді продовжують набирати міцність, при чому чим більше вміст С-3, тим вище приріст міцності. Максимальні значення міцності при С-3 = 7,8 % при твердінні у воді на 7 і 14 добу підтверджують оптимальність цього вмісту за міцністю, водостійкістю і гідравлічними

властивостями розробленої рідкоскляної композиції. Склад цієї композиції у масових частинах є таким: рідке скло щільністю  $1250 \text{ кг/м}^3$  – 1; кремнефтористоводнева кислота щільністю  $1,08 \text{ кг/м}^3$  – 0,12; добавка С-3 – 0,078 (до рідкого скла за сухою речовиною).

### Контрольні питання

1. Перелічити конструктивні способи штучної зміни властивостей ґрунтів.
2. Перелічити способи ущільнення ґрунтів.
3. Перелічити способи закріплення ґрунтів.
4. Перелічити способи хімічного закріплення ґрунтів.
5. Описати сутність способу цементзації.
6. Описати сутність способу однорозчинної силікатизації.
7. Описати сутність способу дворозчинної силікатизації.
8. Описати сутність способу електрохімічного закріплення ґрунтів.
9. Описати сутність способу електросилікатизації.
10. Описати сутність ін'єкційного способу закріплення ґрунтів.
11. Окреслити границі застосування способу цементзації.
12. Окреслити границі застосування способу однорозчинної силікатизації.
13. Окреслити границі застосування способу дворозчинної силікатизації.
14. Окреслити границі застосування способу електрохімічного закріплення ґрунтів.
15. Окреслити границі застосування способу електросилікатизації.
16. Окреслити границі застосування ін'єкційного способу закріплення ґрунтів.

## 2. ПРОЕКТУВАННЯ ЗАКРІПЛЕННЯ ҐРУНТІВ

### 2.1. Вихідні дані для складання проекту

#### 2.1.1. Інженерно-геологічні та гідрогеологічні обстеження ділянки робіт, загальні положення за проектом

Проектні рішення із закріплення ґрунтів повинні бути строго обґрунтовані і містити дані про об'єми закріплюваних масивів, загальну витрату матеріалів, необхідних для виконання робіт, про шляхи забезпечення робіт електроенергією, водою, каналізаційними устроями і транспортом. Проект повинен містити план ділянки з вказівкою контуру закріплюваного масиву; схеми розташування ін'єкторів або робочих (контрольних) свердловин (вертикальних, похилих, горизонтальних) з вказівкою їх конструкції, глибин, діаметрів і допустимих відхилень за напрямом; схеми розчинопроводів (газо-, повітропроводів та ін.); перелік бурильного і насосного устаткування; вказівки із режиму процесу нагнітання і технології виробництва робіт.

Основними вихідними даними для складання проекту служать матеріали інженерно-геологічних вишукувань, результати лабораторних досліджень закріплюваності ґрунтів і підсумки дослідно-виробничих робіт. Матеріали інженерно-геологічних вишукувань повинні містити такі дані: інженерно-геологічна будова і гідрогеологічний стан ділянки, фізико-механічні властивості ґрунту, коефіцієнт фільтрації ґрунту, напрям і швидкість руху ґрунтових вод і їх хімічний склад. Інженерно-геологічні і гідрогеологічні вишукування проводять шляхом проходки шурфів і свердловин з кроком не більше 15 м. Зразки ґрунту відбирають з кожного характерного шару через 0,5 м по глибині, а проби води об'ємом 1–2 л з кожного водоносного горизонту. Зразки крупноуламкових і піщаних ґрунтів з порушеною структурою повинні бути доставлені в лабораторію з природною вологістю, а зразки глинистих ґрунтів у вигляді одного-двох монолітів з кожного характерного шару – з непорушеною структурою і природною вологістю. Число свердловин слід призначати з розрахунку дві на невеликі

односекційні будівлі, що окремо стоять, або по одній на кожен секцію багатосекційного будинку.

У результаті вишукувань повинні бути визначені такі основні фізичні властивості ґрунтів: густина, гранулометричний склад, пластичність, показник консистенції, пористість, природна вологість, а також механічні характеристики ґрунтів (модуль деформації, зчеплення, кут внутрішнього тертя). Ці характеристики слід визначати при природній вологості та повному водонасиченні.

При проектуванні хімічного закріплення лесових просадних ґрунтів необхідно визначити просадність, величину просідання від власної ваги ґрунту, початковий просадний тиск, ємкість поглинання в лужному середовищі, а також коефіцієнт фільтрації силікатного розчину густиною  $1,13 \text{ г/см}^3$  і модулем  $2,7 \div 3,0$ . При виконанні дослідницьких робіт необхідно відібрати зразки ґрунтів для лабораторного закріплення.

При виконанні інженерно-геологічних вишукувань особлива увага повинна бути приділена гідрогеологічним умовам майданчика. Необхідно визначити рівень ґрунтових вод і швидкість його зміни. Глибину дослідницьких свердловин слід призначати з урахуванням отримання даних, необхідних для розрахунку осідань закріплених масивів. Вони повинні бути глибше за нижній рівень закріплюваного масиву не менше ніж на 10 м.

### **2.1.2. Лабораторні дослідження**

Для встановлення можливості закріплення ґрунту і визначення необхідних для проектування даних проводять лабораторні випробування, до складу яких входять такі дослідження:

- 1) вивчення фізико-механічних і хімічних властивостей ґрунтів, що підлягають закріпленню;
- 2) визначення коефіцієнта фільтрації належних закріпленню ґрунтів;
- 3) вибір оптимальної рецептури розчину для конкретних умов;
- 4) вивчення хімічних властивостей ґрунтових вод;
- 5) визначення фізико-механічних властивостей закріпленого ґрунту.

Для просадних ґрунтів необхідно додатково визначити міцнісні, деформативні та просадні характеристики як у природному заляганні, так і після закріплення. Усі вказані визначення проводять за методиками, наведеними нижче.

Ємкість поглинання ґрунтів у лужному середовищі характеризує їх фізико-хімічну активність, за якою можна орієнтовно прогнозувати ефективність силікатизації лесових ґрунтів. Методика визначення ємкості поглинання ґрунтів полягає в наступному. Ґрунт у повітряно-сухому стані розтирають у фарфоровій ступці гумовим товкачем і просівають через сито з отворами розміром 1 мм. З підготовленого ґрунту відбирають наважку масою 50 г і поміщають її в конічну колбу об'ємом 250 ÷ 300 мл, після чого заливають 50 мл 1Н розчину їдкого натру. Після 1-хвилинного збовтування та відстоювання протягом 2 ÷ 3 хв розчин фільтрують через складчастий фільтр. З фільтрату відбирають піпеткою пробу об'ємом 15 ÷ 20 мл і титрують її по фенолфталеїну 1Н розчином соляної кислоти. Розрахунок ємкості поглинання  $v$ , ммоль на 100 г ґрунту, виконують за формулою

$$v = [(aN_L - bN_K) k \cdot 100/m] [100/(100 - W)], \quad (2.1)$$

де  $a$  – об'єм відібраної проби фільтрату, мл;

$N_L$  – нормальність лужного розчину;

$b$  – об'єм кислоти, витраченої на титрування, мл;

$N_K$  – нормальність розчину HCl;

$k$  – коефіцієнт переведення на весь об'єм;

$m$  – маса наважки ґрунту, г;

$W$  – гігроскопічна вологість ґрунту, %.

Активними ґрунтами, що піддаються закріпленню способом однорозчинної силікатизації, є просадні ґрунти з ємкістю поглинання в 1Н лужному розчині не менше 15 ммоль на 100 г сухого ґрунту.

Приблизний вміст карбонатів  $\text{CaCO}_3$  у ґрунті визначають за характером скипання проби при дії 10 %-ої соляної кислоти:

- сильне і тривале скипання -

понад 5 %;



- явне короткочасне скипання -  $3 \div 4 \%$ ;
- слабке короткочасне скипання -  $1 \div 2 \%$ ;
- відсутність скипання - менше  $1 \%$   $\text{CaCO}_3$ .

Визначення вмісту карбонатів у піщаних і просадних ґрунтах, а також у лесових карбонатних супісках необхідно проводити у тих випадках, коли проектом передбачається застосування газової силікатизації з попередньою активізацією цих ґрунтів вуглекислим газом. Підвищення хімічної активності таких ґрунтів обумовлене утворенням на поверхні карбонатних частинок двовуглекислого кальцію, який частково отверджує розчин силікату натрію, що нагнітається. Газова силікатизація ефективна при закріпленні хімічно неактивних карбонатних просадних ґрунтів з ємкістю поглинання в лужному середовищі менше 10 ммоль. При цьому міцність закріплення підвищується зі збільшенням вмісту в ґрунті дисперсних карбонатів.

Точніше вміст карбонатів у ґрунті визначають у лабораторних умовах за допомогою кальциметра Гейслера – Максим'юка або титрометричним способом. Титрометричним способом за  $15 \div 20$  хв можна досить точно визначити вміст карбонатів у піщаних і просадних ґрунтах, що не містять гумусових речовин.

Сутність титрометричного способу визначення вмісту карбонатів полягає в наступному. Середню пробу повітряно-сухого ґрунту розтирають у ступці та просівають через сито з отворами розміром 0,25 мм. З сильноскипаючого ґрунту беруть наважку масою  $4 \div 5$  г, із слабкоскипаючого –  $8 \div 10$  г. Узятую наважку поміщають у конічну колбу об'ємом  $150 \div 200$  мл і заливають  $70 \div 80$  мл дистильованої води. Суспензію збовтують протягом 30 с. Після цього в колбу додають декілька крапель фенолфталеїну; у разі лужної реакції розчин нейтралізують декількома краплями 1Н розчину  $\text{HCl}$  до зникнення рожевого забарвлення індикатора. У нейтралізований розчин уводять близько  $4 \div 5$  г кристалічного хімічно чистого фтористого натрію. Суспензію збовтують і нагрівають до кипіння. Після 5 хв кип'ятіння суспензію охолоджують до  $20 \div 25$  °С і додають до неї декілька крапель фенолфталеїну. Розчин карбонату, що утворився, титрують 1Н розчином соляної кислоти до зникнення рожевого забарвлення індикатора в освітленому шарі суспензії.

Звичайно титрування триває 10 ÷ 15 хв. У цьому випадку доцільно титрувати одночасно декілька проб за допомогою декількох бюреток.

Об'єм кислоти, витраченої на нейтралізацію природного лугу, не враховують. Розрахунок проводять лише на об'єм кислоти, витраченої на нейтралізацію розчину карбонату натрію, що утворився від розкладання карбонатів розчином фтористого натрію. Розрахунок проводять за формулою

$$\text{CaCO}_3 = (V \cdot N \cdot 0,1 \cdot 100/m) \cdot [100 - (100 - W)], \quad (2.2)$$

де  $V$  – об'єм соляної кислоти, витраченої на титрування, мл;

$N$  – нормальність розчину соляної кислоти;

0,1 – коефіцієнт переведення мілімолів у молі;

$m$  – маса наважки ґрунту, г;

$W$  – гігроскопічна вологість ґрунту, %.

Описаний спосіб придатний для визначення вмісту карбонатів у просадних, піщаних, сіроземистих, карбонатних та інших ґрунтах, забарвлених у світлі тони.

Методика визначення коефіцієнта фільтрації ґрунту залежить від його виду. У лабораторних умовах коефіцієнт фільтрації пісків визначають у трубці Каменського або в іншому будь-якому відомому приладі. У польових умовах коефіцієнт фільтрації піщаного ґрунту визначають приладом, зображеним на рис. 2.1.

Прилад складається з труби діаметром 19 мм, рухомого наконечника діаметром на 6 мм більше від діаметра труби, глухих ланок труб з ніпелями і бака діаметром 100 ÷ 150 мм з водомірним склом. Порядок виконання роботи такий: труби забивають у ґрунт на глибину, на якій слід визначити коефіцієнт фільтрації, потім закріплюють бак і всю систему заповнюють поступово водою до певної відмітки на водомірному склі. Після цього всю систему підводять на 5 см, внаслідок чого наконечник затримується в ґрунті і тим самим відкривається зазор між трубою і наконечником. Через зазор, що утворився, вода починає надходити в ґрунт. Відлік часу падіння рівня води в баку

проводиться за водомірним склом у міру зниження рівня на 1 ÷ 2 см залежно від швидкості фільтрації.

Коефіцієнт фільтрації обчислюють за формулою

$$k_{\phi} = r_0^2 \Delta h / (4h_{\max} r \Delta T), \quad (2.3)$$

де  $r_0$  – радіус бака, см;

$\Delta h$  – падіння рівня, см;

$h_{\max}$  – напір від середнього рівня ґрунтових вод до рівня води в баку (при глибокому заляганні ґрунтових вод відлічується від рівня води в баку до низу труби), см;

$r$  – радіус зонда (труби), см;

$\Delta T$  – час падіння рівня, с.

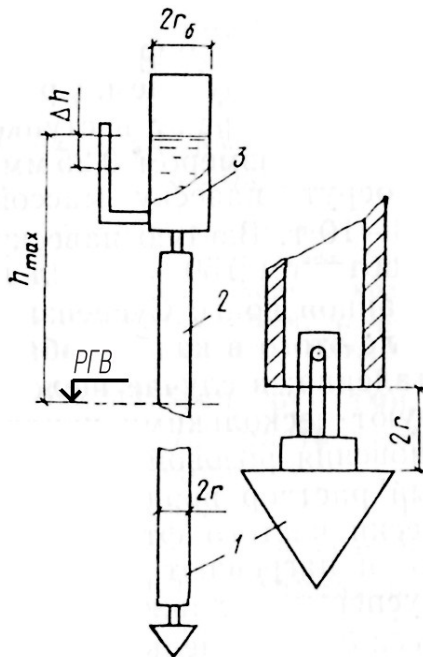


Рис. 2.1. Прилад для визначення коефіцієнта фільтрації піщаного ґрунту в польових умовах:

1 – труба з рухомим наконечником;  
2 – глухі ланки; 3 – водомірний бак

Коефіцієнт фільтрації лесу рекомендується визначати в приладі конструкції Л.І. Курденкова шляхом фільтрації силікатного розчину густиною 1,13 г/см<sup>3</sup> через зразок ґрунту природної структури і вологості. Зразок діаметром 50 і висотою 60 мм закладають у

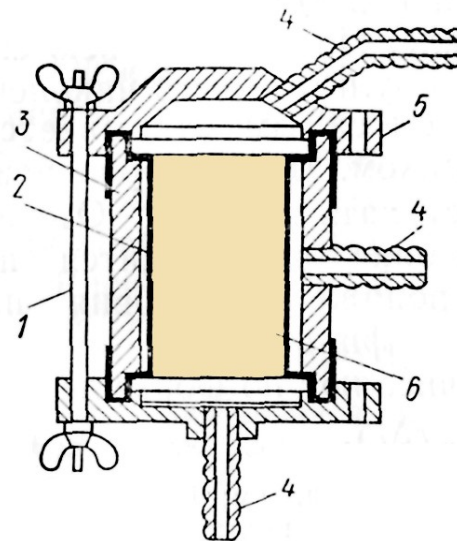


Рис. 2.2. Прилад для визначення коефіцієнта фільтрації лесу:

1 – болт з гайкою; 2 – гумова обойма; 3 – стакан; 4 – патрубок;  
5 – кришка; 6 – ґрунт

стакан, на бічній поверхні якого вмонтований патрубкок. Стакан закривають з обох кінців кришками, затягуючи їх болтами (рис. 2.2). Потім проводять титрування лугу приблизно 0,5N розчином соляної кислоти до появи рожевого забарвлення. У нейтралізований розчин додають 4÷5 г кристалічного фтористого натрію і додатково 4÷5 крапель змішаного індикатора. При активному помішуванні проводять повторне титрування для визначення вмісту кремнієвої кислоти. Титрування закінчують у той момент, коли дві останні краплі кислоти забарвлять розчин у рожевий колір. У стакан вмонтована обойма з еластичної гуми, яка призначена для бічного обтискання зразка і запобігання пристінній фільтрації. Створивши в обтискаючій обоймі надлишковий тиск, що у декілька разів перевищує тиск, при якому проводять випробування, починають фільтрувати силікатний розчин через зразок. Коефіцієнт фільтрації визначають за формулою

$$K_{\phi} = QL / (WH), \quad (2.4)$$

де  $Q$  – витрата,  $\text{см}^3/\text{с}$ , розчину через переріз фільтруючого зразка площею  $W$ ,  $\text{см}^2$ ;

$L$  – довжина шляху фільтрації в ґрунті,  $\text{см}$ ;

$H$  – напір, під яким відбувається фільтрація,  $\text{см}$ .

Модуль силікату натрію визначають таким чином: 1 мл розчину силікату натрію зі щільністю 1,07–1,10  $\text{г}/\text{см}^3$  вводять у скляну колбу об'ємом не менше 120 мл, додають 30–50 мл води і декілька крапель індикатора, виготовленого із суміші метилового-червоного і бромтимолового-синього з масовим відношенням 1 : 1 за загальноприйнятою методикою. Модуль розчину силікату натрію  $M$  розраховують за формулою

$$M = \frac{\text{об'єм HCl, що витратили на вторинне титрування, мл}}{\text{об'єм HCl, що витратили на первинне і вторинне титрування, мл}} \cdot 0,5. \quad (2.5)$$

Коефіцієнт 0,5 виводиться із відношення  $(15/31) \cdot 1,032 = 0,499 \approx 0,5$ , де 15 – еквівалент  $\text{SiO}_2$ ; 31 – еквівалент  $\text{Na}_2\text{O}$ ; 1,032 – коефіцієнт, що виражає відношення молекулярних мас  $\text{Na}_2\text{O}$  і  $\text{SiO}_2$ .

У разі закріплення пісків способом однорозчинної силікатизації або смолизації застосовують гелеутворюючий розчин, що складається з таких компонентів: основного розчину (маткового) і розчину-коагулянту (отверджувача). Час гелеутворення повинен відповідати часу, необхідному для закачування розчину в одну західку. За час гелеутворення приймають період між закінченням введення отверджувача в розчин основного реагенту і моментом переходу приготованої суміші із рідкого стану в желеподібний. Порядок визначення часу гелеутворення приведемо на прикладі гелеутворюючих розчинів на основі карбамідних смол з соляною кислотою як отверджувачем.

У чотири - п'ять ємностей об'ємом по  $150 \div 200 \text{ см}^3$  наливають заздалегідь приготований розчин смоли густиною  $1,07 \div 1,08 \text{ г/см}^3$ . У розчин при ретельному перемішуванні скляною паличкою доливають з бюретки різні об'єми соляної кислоти густиною  $1,013 \text{ г/см}^3$ . Ці об'єми повинні відповідати співвідношенням, вказаним у розд. 1. Приблизне дозування соляної кислоти і порядок запису при визначенні часу гелеутворення вказані у табл. 2.1. Такий саме порядок визначення часу гелеутворення зберігається і при підборі рецептури однорозчинної силікатизації, де основним розчином є силікат натрію. Винятком є приготування розчинів на основі силікату натрію і ортофосфорної кислоти, коли силікат натрію доливається до розчину кислоти.

Таблиця 2.1

Приблизні дозування соляної кислоти і час гелеутворення

Об'єм, $\text{см}^3$		Початок дослід, год, хв	Закінчення дослід, год, хв	Час гелеутворення	$t, \text{ }^\circ\text{C}$
смоли з $\rho = 1,08 \text{ г/см}^3$	3 % HCl з $\rho = 1,013 \text{ г/см}^3$				
100	6	12.00	12.10	10 хв	20
100	5	12.05	12.40	35 хв	20
100	4	12.10	13.30	1 год 20 хв	20
100	3	12.15	15.25	3 год 10 хв	20

Визначення рН ґрунтових вод проводять потенціометричним методом з використанням рН-метра марки рН-340 або аналогічного.

Випробування піщаного ґрунту на закріплюваність у лабораторних умовах проводять шляхом нагнітання в нього закріплюючих розчинів і подальшого випробування закріпленого ґрунту на міцність при стиску і на водостійкість. Закріплюваність піску визначається за допомогою приладу, зображеного на рис. 2.3.

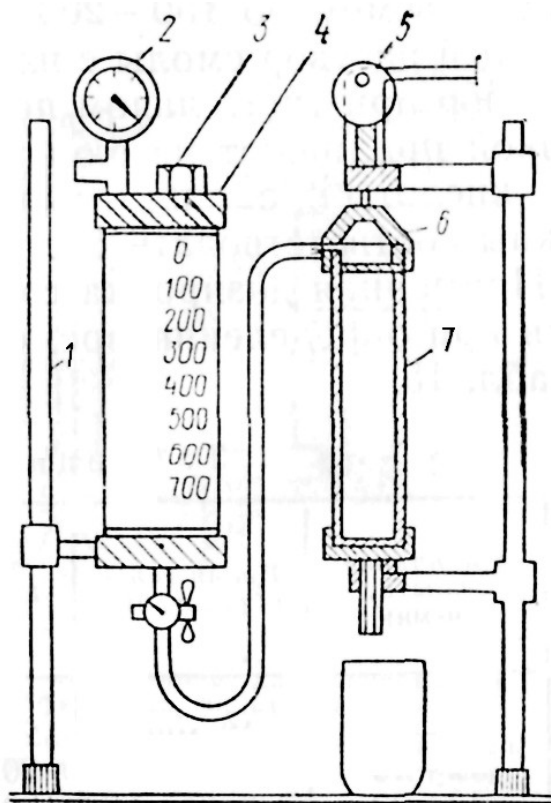


Рис. 2.3. Прилад для визначення закріплюваності піщаного ґрунту:

- 1 – штатив; 2 – манометр; 3 – отвір з пробкою для заливання розчину; 4 – мірний циліндр; 5 – кулачковий ущільнювач; 6 – кришка; 7 – трубка для ґрунту

Прилад складається зі штатива з двома стояками, металевої трубки діаметром  $40 \div 50$  мм з нижньою кришкою, що нагвинчується, та мірного циліндра з органічного скла об'ємом до 1 л, розрахованого на тиск  $0,8 \div 1,0$  МПа. Випробування проводять таким чином. Трубку усередині парафінують. На нижній її кінець нагвинчують кришку з перфорованим дном і тубусом для стікання розчину. Спочатку на дно трубки завантажують крупний чистий пісок шаром  $5 \div 10$  см (фільтр), потім невеликими порціями з капілярним підсосом води (за типом трубки Каменського) завантажують  $120 \div 130$  г випробуваного ґрунту. Трубку з ґрунтом підвішують до штатива і в неї поступово паличкою вливають  $250 \div 300$  см<sup>3</sup> гелеутворюючого розчину. Розчин самопливом просочує ґрунт і закріплює його. Через

1 добу закріплений ґрунт видаляють із злегка підігрітої трубки, розрізають на невеликі зразки-циліндри (заввишки 40 мм), які і випробовують на міцність і водостійкість.

За необхідності визначають фільтраційні властивості закріпленого ґрунту. З цією метою через зразок, поміщений у трубку, прокачують при заданому тиску воду, для чого використовують описаний вище прилад або трубку з кришкою, що нагвинчується зверху і підключається через шланг до насоса.

При випробуванні піску на закріплюваність способом газової силікатизації роботи ведуть на тому самому приладі за такою методикою: пісок завантажують у трубку з пошаровим ущільненням і щільно закривають її кришкою за допомогою притискного кулачка. До кришки підводять дві гумові трубки, одну з яких з'єднують з газовим балоном через редуктор, іншу – з мірним циліндром, в який заливають розчин силікату натрію. Через ґрунт нагнітають спочатку вуглекислий газ в об'ємі 0,5 л (за відсутності витратоміру об'єм орієнтовно встановлюють за часом нагнітання –  $1 \div 2$  хв при тиску 0,02 МПа), потім  $80 \div 100$  см<sup>3</sup> розчину силікату натрію і знову вуглекислий газ в об'ємі 1,5 л. Ґрунт після закріплення видаляють із трубки, розпилюють на зразки і випробовують на міцність при стиску і на водостійкість.

При випробуванні на закріплюваність просадного ґрунту зразки цього ґрунту можуть бути відібрані із монолітів або кернів, отриманих без застосування вибухових робіт. Моноліти і керни з майданчиків повинні бути гідроізолювані, щоб уникнути порушення природної вологості ґрунту. Крім того, у зв'язку з анізотропією матеріалу повинно бути вказане просторове орієнтування проб. Для виготовлення зразків із монолітів заздалегідь випилюють пластини-заготовки довільної конфігурації товщиною, дещо більшою від необхідної висоти зразка. При цьому вирівнюють тільки дві паралельні грані. Потім цю заготовку завантажують у кільце. Наявність зазорів між ґрунтом і кільцем у  $2 \div 5$  мм не погіршує якості проби. Висота кільця складає приблизно 0,5 висоти відібраного зразка. Потім у пластину-заготовку усередині кільця занурюють пробовідбірник, що є металевим циліндром, у якого внутрішній діаметр передньої загостреної частини (заввишки  $10 \div 15$  мм) на 1 мм менше, ніж у решти частини. Занурення пробовідбірника проводиться

швидким і плавним рухом. Для завантаження кільця, а потім занурення пробовідбірника може бути використано будь-який пристрій, що забезпечує достатнє зусилля при рівномірній поступальній вертикальній ході.

Видалення циліндрового зразка із пробовідбірника здійснюється за допомогою виштовхувача, діаметр якого менше від діаметра пробовідбірника на 1–2 мм. Перед використанням пробовідбірника його необхідно змастити технічним вазеліном. Одержані описаним способом зразки можуть бути використані без додаткової обробки. Цим способом можливо отримання зразків з розмірами, необхідними для всіх видів випробувань, рекомендованих для силікатизованого ґрунту. Кількість випробувань зразків, виготовлених із закріпленого способом силікатизації просадного ґрунту, повинно бути не менше трьох. Лабораторне закріплення просадних ґрунтів для розрахунку їх параметрів силікатизації проводиться в спеціальному приладі (рис. 2.4).

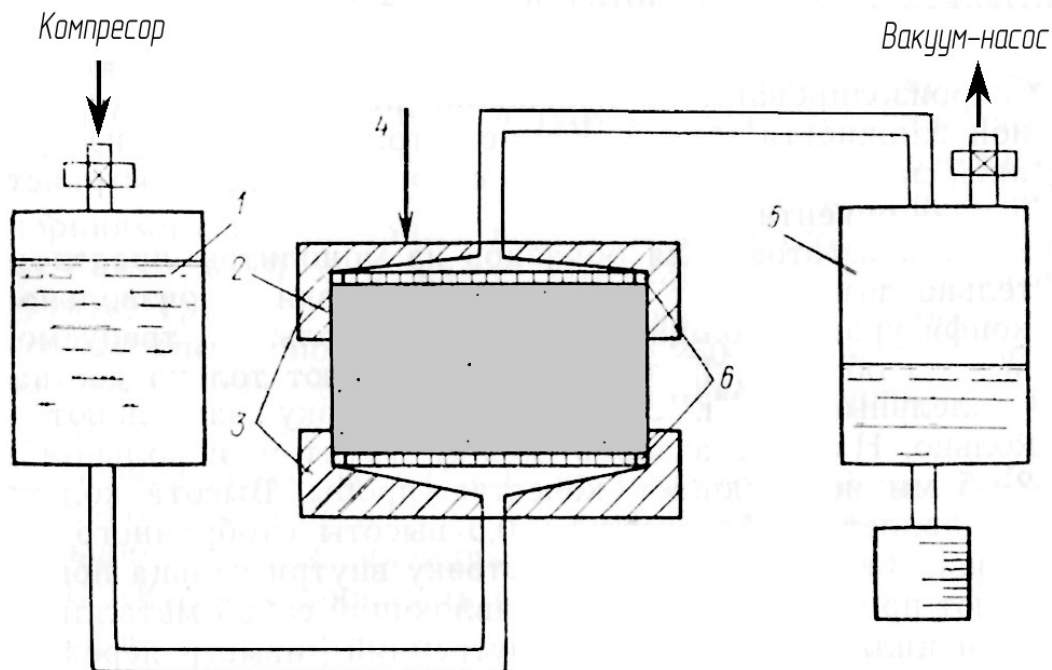


Рис. 2.4. Схема приладу для визначення закріплюваності лесових просадних ґрунтів:

- 1 – колба з закачаним розчином; 2 – кільце з ґрунтом; 3 – кришки;  
4 – струбцина; 5 – колба з фільтратом; 6 – решітка з гумовими прокладками

Зразок ґрунту закріплюється розчином силікату натрію, що надходить із колби під тиском завдяки розрідженню, створюваному в зразку шляхом відкачування повітря із колби з



фільтратом. Принцип роботи приладу полягає в наступному. Кільце зі зразком ґрунту поміщається між верхньою і нижньою кришкою. Зверху і знизу зразок захищений решітками, які запобігають його руйнуванню при ін'єкції розчину. До нижньої кришки за допомогою шланга приєднується колба з робочим розчином, а до верхньої – колба з фільтратом. За допомогою струбцини, гумових прокладок і шлангів зразок герметично з'єднується з обома колбами. При достатній проникності ґрунту ін'єкцію розчину через нього можна здійснити за рахунок розрідження, що створюється вакуумом-насосом у колбі з фільтратом. В іншому випадку необхідний надмірний тиск розчину створюється нагнітанням в колбу стиснутого повітря від компресора. Якісніше закріплення ґрунту в лабораторних умовах досягається при використанні вакууму. При лабораторному закріпленні ґрунтів особливо важливо правильно виконати всі виміри, інакше можливі значні помилки у визначенні витрат силікату натрію при складанні проекту силікатизації ґрунту.

Для розрахунку параметрів силікатизації ґрунтів (границі міцності  $R_n$  через  $n$  діб, питому витрату силікату натрію  $q$ , коефіцієнта, що враховує ступінь наростання міцності,  $d$ ) проводять закріплення зразків ґрунту розчинами густиною  $1,05 \div 1,17$  г/см<sup>3</sup> і температурою  $18 \div 20$  °С. Об'єм розчину, що пропускається через зразок, повинен бути не менше ніж у  $12 \div 15$  разів більше об'єму зразка, а інтенсивність нагнітання не повинна перевищувати  $10\text{--}15$  см<sup>3</sup>/хв при діаметрі зразка 40 мм і висоті 60 мм. Після закріплення зразки витримують 3–7 діб в ексікаторі в легко-вологому середовищі, потім випробовують на стиск. Границю їх міцності на 28 добу визначають за формулою

$$R_{28} = R_n \cdot K, \quad (2.6)$$

де  $R_n$  – тимчасовий опір стиску зразків з терміном твердіння  $n$  діб;  
 $K$  – перевідний коефіцієнт, що приймається залежно від терміну твердіння зразків:

- термін твердіння зразків, доб -	1; 3; 5; 7; 10; 15; 21; 28;
- коефіцієнт $K$ -	1,67; 1,48; 1,39; 1,33; 1,25; 1,16; 1,07; 1,00.

Кількість закріплюваних проб ґрунту повинне бути не менше трьох. З метою отримання показників міцності і просадності при різних питомих витратах силікату натрію зразок ґрунту закріплюють розчинами зі щільністю 1,17; 1,15; 1,13; 1,07 і 1,05 г/см<sup>3</sup>. Для визначення  $R_n$  при різних  $q$  беруть зразки такого самого розміру, як і у першому випадку. Для визначення просадних характеристик і опору зсуву ґрунтів діаметр зразка повинен бути не менше 100÷110 мм, а його висота – 45÷50 мм. Закріплення зразків діаметром 40÷60 мм проводиться до появи фільтрату в об'ємі, що не перевищує 15÷20 см<sup>3</sup>, а зразків діаметром 100÷110 мм – 35÷50 см<sup>3</sup>.

При закріпленні зразків розчинами різної густини проводять контрольні вимірювання:

1) густину розчину  $\rho_p$  заміряють шляхом зважування на технічних вагах розчину певного об'єму (25÷30 см<sup>3</sup>) з точністю до 0,01 г. Для кожної проби розчину виконують не менше двох визначень густини, причому кожного разу мірний посуд ретельно миють дистильованою водою і висушують, а після п'яти – восьми визначень (залежно від густини розчину) наново тарують;

2) маса зразка до ін'єктування  $m_1$ , г;

3) маса зразка після ін'єктування  $m_2$ , г;

4) об'єм зразка  $V$ , см<sup>3</sup>.

На основі отриманих значень цих вимірювань питому витрату силікату натрію при закріпленні зразка визначають за формулою

$$q = (m_2 - m_1) \cdot \rho_c \cdot (\rho_p - \rho_в) / [0,001(\rho_0 - \rho_в) \cdot V], \quad (2.7)$$

де  $\rho_c$  – густина рідкого скла, г/см<sup>3</sup>;

$\rho_в$  – густина води, г/см<sup>3</sup>.

Коефіцієнт, що враховує ступінь наростання міцності залежно від хімічних властивостей ґрунту, обчислюють як середнє значення із декількох визначень:

$$d = d_n / n, \quad (2.8)$$

де  $d_n = (1/q) \cdot \ln[(R_{max}-R_0)/(R_{max}-R_n)]$  (тут  $q$  і  $R_n$  – питома витрата розчину силікату натрію і відповідна йому міцність  $n$ -го порядку;  $R_{max}$  – максимально можлива міцність зразка;  $R_0$  – міцність зразка ґрунту природного складання до закріплення).

При випробуванні закріпленого лесового ґрунту зразки повинні мати циліндричну форму зі співвідношенням висоти до діаметра  $1,5 \div 2$ . Як норма рекомендується циліндр діаметром  $40 \div 50$  мм. Відхилення від цих рекомендацій допускається в межах  $\pm 2$  мм (діаметр) і до 10 % – відношення висоти до діаметра. Торцеві поверхні зразка повинні бути паралельні одна одній (невелика непаралельність – до 1,5 мм по діаметру – допускається в разі випробування зразків на приладі з верхнім легкорухомим шарніром). Випробування на стиск може проводитися на будь-якій призначеній для цієї мети випробувальній машині (пресі). Потужність преса вибирають виходячи з очікуваних зусиль руйнування, причому шкалу силівимірювача вибирають таку, щоб руйнуючі навантаження фіксувалися в другій і третій четвертинах, де точність показань манометра вища. При максимальній силі визначають границю міцності при стиску  $R_{cm}$ .

## 2.2. Склад проекту

Проект хімічного закріплення ґрунтів повинен містити:

- 1) ситуаційний план, дані про основні обсяги робіт, перелік основного обладнання і матеріалів;
- 2) проект хімічного закріплення ґрунтів на дослідно-виробничій ділянці;
- 3) план розташування свердловин, розрізи, основні вказівки з виробництва робіт;
- 4) параметри ін'єкційних свердловин;
- 5) специфікацію на основне технологічне та електротехнічне устаткування, а також матеріали;
- 6) конструктивні схеми розчинних вузлів;
- 7) кошторис, калькуляцію і одиничні розцінки;
- 8) розрахунок осідань основи;

9) схему організації виробництва робіт (перелік обладнання, вказівки з монтажу, потреба в матеріалах і робочій силі, кількість одночасно діючих верстатів і т. п.);

10) проект організації будівництва (ПОБ) або проект проведення робіт (ППР);

11) календарний план виконання робіт;

12) вказівки з техніки безпеки при проведенні робіт;

13) дані загальнобудівельного характеру (транспорт, допоміжні пристрої, заходи при роботі в зимовий час);

14) вказівки з контролю якості та приймання виконаних робіт.

На ситуаційному плані повинні бути показані розміщення об'єкта закріплення в ув'язці з виробничою базою будівельної організації, джерелами енерго-, тепло- і водопостачання, прив'язка до мереж каналізації, транспортних під'їздів і ліній зв'язку, а також основні особливості природних умов території будівельного майданчика. Дані про основні обсяги робіт подаються, як правило, у табличній формі і поділяються на складові частини залежно від видів робіт (дослідно-виробничих, основних, контрольних і т. п.) або відповідно до призначення споруди. У таблиці надаються найменування робіт і їх коротка характеристика, одиниці вимірювання та обсяги робіт. Перелік основного обладнання і матеріалів повинен бути поданий з зазначенням їх типів, марок, ДСТУ та кількості, потрібної для виконання робіт у встановлені терміни. Крім того, необхідними є відомості про загальну потребу в енергоресурсах (електроенергії, стиснутому повітрі, воді і т. п.) і потребу в них у певні періоди часу залежно від графіка виконання робіт. Графік виконання робіт у найзагальнішому вигляді характеризує обґрунтування відповідними нормативами норм часу і вироблення по кожному з видів робіт залежно від кількості одиниць устаткування або ланок за весь планований період виконання робіт по всьому об'єкту або по його частинах.

### **2.3. Дослідно-виробничі роботи**

Дослідно-виробничі роботи здійснюються з метою уточнення основних параметрів закріплення і відпрацювання технології виробництва робіт. Для виконання дослідно-виробничих робіт обирають ділянку території поблизу споруди з найбільш

характерними інженерно-геологічними умовами. Проект хімічного закріплення ґрунтів на дослідно-виробничій ділянці повинен містити:

- 1) план розташування свердловин на цій ділянці;
- 2) розріз з зазначенням інженерно-геологічної будови майданчика;
- 3) технологічну схему ін'єкційного обладнання;
- 4) норми витрати матеріалів для закріплення 1 м<sup>3</sup> ґрунту;
- 5) параметри ін'єкційних свердловин;
- 6) дані про обсяги робіт, потребу в матеріалах для їх виконання;
- 7) перелік основного технологічного устаткування з зазначенням його марок, типу, кількості і т. п.;
- 8) докладні вказівки з проведення робіт.

На фрагмент ситуаційного плану слід нанести всі свердловини дослідно-виробничої ділянки з прив'язкою до осей споруди. Свердловини потрібно розташовувати так, щоб можна було визначити параметри закріплення, що рекомендуються надалі для проектування. Відстань між свердловинами, їх кількість і порядок розташування на дослідно-виробничій ділянці слід призначати так, щоб перевірити на фрагменті технологічні рішення, що приймаються для всього проекту. Контроль якості закріплення може бути здійснений шляхом буріння контрольних свердловин або розкриттям шурфу з відбором зразків закріпленого ґрунту для лабораторного визначення його властивостей. Додатково може бути використано зондування. На плані розташування ін'єкційних свердловин слід вказати розташування шурфу, контрольних і зондувальних свердловин.

Для складання проекту дослідно-виробничих робіт необхідні інженерно-геологічний розріз майданчика, абсолютні відмітки поверхні ґрунту, відмітки верхньої і нижньої границь закріплення і рівня ґрунтових вод. Верхню і нижню границі закріплення вибирають з урахуванням глибини закладання фундаментів. Відстань від поверхні ґрунту до верхньої границі закріплення (розмір холостої частини ін'єкторів) приймають з таким розрахунком, щоб виключити можливість виходу розчину на поверхню при ін'єкції (як правило, не менше 1 м). У неоднорідних за коефіцієнтом фільтрації ґрунтах закріплення

слід проводити західками зверху вниз. Якщо коефіцієнт фільтрації збільшується з глибиною, то закріплення слід проводити знизу до верху. У неоднорідних піщаних ґрунтах з частою шаруватістю і різними коефіцієнтами фільтрації, що відрізняються більше ніж на 30 %, хімічні розчини слід нагнітати по шарах, починаючи з ґрунтів, що мають найбільший коефіцієнт фільтрації. При великій потужності закріплюваного шару застосовують ін'єктори з укороченою перфорованою частиною.

На технологічній схемі ін'єкційного устаткування дається весь комплекс використовуваного обладнання з зазначенням його типів, марок, ДСТУ і т. п. Схема повинна характеризувати загальне розміщення устаткування і сполучних трубопроводів, загальну послідовність приготування та ін'єктування розчинів. Норми витрати хімічних реактивів на 1 м<sup>3</sup> ґрунту або на 1 м довжини свердловини подають, як правило, у табличній формі з докладним зазначенням реагентів, основних їх характеристик, одиниць вимірювання і об'ємів.

Параметри ін'єкційних свердловин подають у табличній формі з зазначенням по кожній свердловині її номера, відміток верхньої і нижньої границь закріплення, довжини, розмірів холостих зон, витрати матеріалів, що ін'єктуються. Обсяги робіт і потребу в матеріалах для їх виконання враховують при складанні проекту основних робіт. У результаті виконання дослідно-виробничих робіт встановлюють основні параметри закріплення, які використовують при виробництві робіт і уточненні проекту.

## **2.4. Проект проведення робіт**

У проекті проведення робіт з хімічного закріплення ґрунтів повинен бути поданий план споруди з основними розмірами, суміщений з планом фундаментних конструкцій. На плані розташовують всі ін'єкційні свердловини, кожна з яких має прив'язку до осей будівель. Свердловини слід замаркувати і визначити черговість їх обробки. Її вибирають так, щоб виключити можливість сполучення між двома свердловинами. З цієї причини рекомендується обробляти одночасно свердловини, розташовані одна від одної на відстані, що в 2 рази більша від відстані між свердловинами (тобто через одну). На плані будівлі

слід вказати місце розташування дослідно-виробничої ділянки і прив'язку її до основних осей будівлі. На подовжніх і поперечних розрізах зображають фундаментні конструкції, розташування свердловин, геологічну будову майданчика, границі закріплення, рівень ґрунтових вод. Виконують їх, як правило, у найбільш характерних місцях будівлі. На розрізах указують всі відмітки, необхідні для виробництва робіт.

У проекті повинні міститися основні вказівки з виробництва робіт виходячи з конкретних умов, рекомендації з розміщення точок ін'єктування, послідовності виконання робіт, послідовності обробки свердловин з глибиною, довжини західки, режимів нагнітання (тиск, час і т. п.), з приготування робочих розчинів, технологічного устаткування, контролю якості робіт із закріплення.

За наявності потоку ґрунтових вод хімічні розчини для дворозчинної силікатизації слід нагнітати в такому порядку:

а) при швидкості руху ґрунтових вод до 1 м/доб спочатку послідовно західками зверху вниз на всю глибину закріплення нагнітають розчин силікату натрію, а потім західками знизу до верху – розчин хлористого кальцію;

б) при швидкості руху ґрунтових вод від 1 до 3 м/доб по черзі в кожную західку нагнітають розчин силікату натрію і розчин хлористого кальцію;

в) при швидкості руху ґрунтових вод більше 3 м/доб спочатку влаштовують тимчасову водонепроникну завісу, нагнітаючи одночасно в кожную західку рідке скло і розчин хлористого кальцію через різні ін'єктори, забиті на відстані 15÷20 см один від одного так, щоб силікат натрію у міру руху його з потоком ґрунтової води був перехоплений розчином хлористого кальцію. Після улаштування тимчасової завіси під її захистом закріплюють основний масив.

Об'єм закріплюючого розчину на одну західку визначають за формулою

$$Q = \pi r^2 l n a, \quad (2.9)$$

де  $r$  – радіус закріплення, м;

$l$  – довжина західки, м;

$n$  – пористість ґрунту, %;

$a$  – коефіцієнт, що приймається 5 – для кожного розчину при дворозчинній силікатизації, 12 – при однорозчинній силікатизації, 10 – при смолизації, 6÷8 – при газовій силікатизації (для просадних ґрунтів - 6, для піщаного ґрунту - 7, для пливунів - 8).

При газовій силікатизації необхідну масу вуглекислого газу  $B$  розраховують за такими формулами:

– для попередньої активізації ґрунту

$$B = Vnc\rho; \quad (2.10)$$

– для затвердіння силікатного розчину в порах ґрунту

$$B = VnB\rho, \quad (2.11)$$

де  $V$  – об'єм закріплюваного ґрунту, м<sup>3</sup>;

$n$  – пористість ґрунту, %;

$c$  – коефіцієнт, що дорівнює 0,025;

$\rho$  – щільність вуглекислого газу (1,98 кг/м<sup>3</sup>);

$B$  – коефіцієнт, що дорівнює 0,04 для просадних ґрунтів, 0,08 – для піщаних, 0,1 – для пливунів.

При нагнітанні хімічних розчинів у ґрунт через перфоровану ланку завдовжки 1 м їх витрату рекомендується призначати залежно від коефіцієнта фільтрації з урахуванням часу гелеутворення. Орієнтовно витрату можна приймати, керуючись такими даними:

- коефіцієнт фільтрації, м/доб - 0,3÷1; 1÷5; 5÷10; 10÷20; 20÷80;

- витрата розчинів, л/хв - 1÷2; 2÷5; 1÷2; 2÷3; 3÷5.

Об'єм початкового розчину силікату натрію або смоли, необхідний для приготування заданого об'єму розчину робочої концентрації, визначають за формулою

$$Q_n = [\rho_p - 1] / (\rho_1 - 1)] Q_p, \quad (2.12)$$



де  $\rho_p$  – густина розчину робочої концентрації, г/см<sup>3</sup>;

$\rho_1$  – густина початкового розчину, г/см<sup>3</sup>;

$Q_p$  – об'єм розчину робочої концентрації, л.

Міцність закріпленого ґрунту при стиску призначають при проектуванні, причому вона повинна бути не більше вказаних у табл. 2.2 величин.

Таблиця 2.2

Міцність закріпленого ґрунту при стиску

Спосіб закріплення	Ґрунт	Коефіцієнт фільтрації, м/доб	Границя міцності закріпленого ґрунту при стиску, МПа
Силікатизація дворозчинна	Пісок будь-якої крупності	5 ÷ 10	3,0 ÷ 3,5
		10 ÷ 20	2,0 ÷ 3,0
		20 ÷ 80	1,5 ÷ 2,0
Силікатизація однорозчинна: силікатно-кремнефториста рецептура	Пісок дрібний, пилюватий і середньої крупності	0,5 ÷ 5	1,5 ÷ 2,0
		5 ÷ 20	1,0 ÷ 1,5
силікатно-фосфорнокисла і алюмосилікатна рецептура	Пісок дрібний і пилюватий	0,5 ÷ 5	0,2 ÷ 0,3
Газова	Пісок дрібний і середньої крупності	5 ÷ 10	1,2 ÷ 1,5
		10 ÷ 20	0,8 ÷ 1,2
	Просадний лес	0,2	0,8 ÷ 1,2

Закріплення ґрунту, як правило, передбачають на всю просадну товщу, тобто до відмітки, на якій відносна просадність менше 0,01.

Об'єм закріплюючого розчину на одну західку завдовжки  $l$  може бути розрахований за формулою

$$Q = \pi r^2 \cdot (1,33r + l) n a \cdot 1000, \quad (2.13)$$

де  $n$  – пористість ґрунту в частках одиниці;

$a$  – коефіцієнт насичення ґрунту розчином, що приймається залежно від режиму ін'єкції:

- швидкість розповсюдження розчину, см/хв -

0,3; 0,6; 1,0; 1,8; 3; 6; 10;

- коефіцієнт насичення ґрунту розчином  $a$  -

1,0; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,35.

Швидкість розповсюдження розчину залежить від ступені вологості ґрунту і його проникності (табл. 2.3).

Таблиця 2.3

Ступінь вологості ґрунтів $G$	Швидкість розповсюдження розчину			
	Швидкість розповсюдження розчину, см/хв, при коефіцієнті фільтрації, м/доб			
	0÷0,3	0,3÷0,5	0,5÷1	1÷2
до 0,3	0,6÷1,2	1,2÷2	2÷3	3÷5
0,3 та більше	1,8÷3	3÷5	5÷8	8÷10

Розділ, присвячений параметрам ін'єкційних свердловин, повинен містити докладну характеристику кожної зі свердловин у вигляді паспорта, в якому вказують: відмітку верхньої границі закріплення, м; відмітку нижньої границі закріплення, м; кут нахилу до вертикалі, град; загальну довжину свердловини, м; розмір холостої зони, м; розмір зони, що ін'єктується, м. На плані розташування свердловин кожній з них привласнюють індивідуальний номер або індекс. У цьому розділі підраховують загальний об'єм робіт по окремій секції або фрагменту споруди і вказують загальну кількість свердловин.

Специфікація на основне технологічне та електротехнічне устаткування, а також матеріали містить перелік технологічного обладнання і матеріалів з зазначенням їх найменування, технічної характеристики і т. п., а також кількості, необхідної для виконання робіт у встановлені терміни.

## 2.5. Контроль якості закріплення

Хімічне закріплення ґрунтів в основі споруд належить до прихованих робіт, тому на всіх його етапах необхідні систематичний контроль і оцінка якості виконаних робіт.

Контроль якості робіт із хімічного закріплення ґрунтів поділяється на поточний контроль у ході виконання робіт і контрольні визначення результатів силікатизації відповідно до діючих норм.

Поточний контроль у процесі силікатизації або смолизації на об'єктах включає нагляд:

1) за правильністю розбиття і за черговістю обробки свердловин у плані і заходок з глибиною;

2) за якістю вживаного розчину, включаючи його щільність, температуру, силікатний модуль, наявність механічних домішок;

3) за режимом ін'єктування (тиск, витрата) і об'ємом закачуваного розчину;

4) за правильністю ведення журналу із закріплення ґрунтів, тобто за відповідністю зробленого запису фактичним даним.

Контрольні визначення результатів силікатизації з метою оцінки їх відповідності проекту виконують після завершення робіт по окремих секціях будівлі або об'єктах споруди. Якість закріплення масиву ґрунту перевіряють шляхом буріння контрольних свердловин або розкриттям шурфів з відбором зразків для лабораторних досліджень і візуальним обстеженням суцільності закріплення. До розкриття контрольних шурфів і контрольного буріння слід приступати не раніше, ніж через 7 діб після завершення ін'єкційних робіт.

Кількість контрольних свердловин повинна складати  $3 \div 5$  % загальної кількості точок ін'єктування. Кількість шурфів призначають із розрахунку один на  $5000 \text{ м}^3$  закріпленого ґрунту, але в цілому по об'єкту не менше двох. Контрольне буріння здійснюють колонковим способом. Діаметр свердловини повинен складати  $127 \div 150$  мм. При бурінні проводять ретельний опис видалених зразків ґрунту з візуальною оцінкою якості закріплення і присутності силікатного розчину за індикатором (фенолфталеїном). Результати контрольного буріння оформляють актом. При розкритті шурфів проводять опис і відбір зразків закріплених ґрунтів і оформляють акт з докладним описом і зарисовуванням характеру закріплення і візуальною оцінкою його якості. Відібрані при бурінні або із шурфу зразки закріпленого ґрунту випробовують на міцність при одноосному

стиску. Середньозважена міцність закріпленого ґрунту повинна відповідати передбаченій проектом.

При прийманні закінчених робіт встановлюють відповідність фактично отриманих результатів закріплення вимогам проекту. Приймання робіт здійснюється приймальною комісією на підставі зіставлення проектної, виконавчої і контрольної документації.

Контроль якості закріплення лесового просадного ґрунту однорозчинною силікатизацією може бути розглянутий на прикладі виконання дослідно-виробничих робіт на майданчику автобази заводу «Атоммаш» у 1982 р. Ін'єкційні роботи здійснювали через 12 свердловин, розташованих на відстані 1,2 м одна від одної (рис. 2.5).

У процесі ін'єкційних робіт були закачані силікатні розчини густиною 1,15; 1,20; 1,30 г/см<sup>3</sup>. У результаті цього утворилися три масиви ґрунту, закріплені силікатом різної густини. Масив ґрунту, оброблений силікатним розчином зі щільністю 1,15 г/см<sup>3</sup>, об'єднує зони, що утворилися від ін'єктування в свердловини 1, 2, 3, 4, 11. Масив ґрунту, закріплений розчином густиною 1,20 г/см<sup>3</sup>, об'єднує зони поблизу свердловин 5, 6, 7, 8, 12. Через свердловини 9 і 10 нагнітали розчин густиною 1,30 г/см<sup>3</sup>.

Розкриття шурфу здійснювали за допомогою бурового агрегату СО-2 з діаметром колонки 120 мм. Центр шурфу був розташований між свердловинами 8, 9, 10, 11. Шляхом буріння був утворений суцільний шурф квадратного перерізу в плані, причому роги шурфу співпадали зі стволами ін'єкційних свердловин. Для вивчення міцності закріпленого ґрунту вся бокова поверхня шурфу була розділена на ділянки розміром 25 см по горизонталі і 50 см по вертикалі. Всього утворилося 600 ділянок. Потім вивчалася якість закріплення на кожній з ділянок.

Міцність закріплення визначалася двома способами: за реакцією закріпленого ґрунту на дію індикатора (фенолфталеїну), яка виражається в інтенсивності забарвлення ґрунту, а також за опором закріпленого ґрунту проникненню загостреного предмета під впливом зусилля. На рис. 2.6 наведена схема розгортки бокової поверхні шурфу, поділеної на зони з різною міцністю закріпленого ґрунту. Як видно, якість закріплення неоднорідна.

Вона залежить від густини силікатного розчину, яким закріпленій ґрунт, глибини, відстані від ін'єктора, послідовності нагнітання розчину, довжини західок. Міцність ґрунту, закріпленого силікатним розчином густиною  $1,30 \text{ г/см}^3$ , значно вища, ніж при густині  $1,20$  і  $1,15 \text{ г/см}^3$  і складає в середньому  $0,9 \div 1,7 \text{ МПа}$ . Міцність зразків, закріплених розчином густиною  $1,20 \text{ г/см}^3$ , складає в середньому  $0,6 \div 1,2 \text{ МПа}$ . Зразки, закріплені силікатним розчином густиною  $1,15 \text{ г/см}^3$ , мали міцність  $0,3 \div 0,8 \text{ МПа}$ .

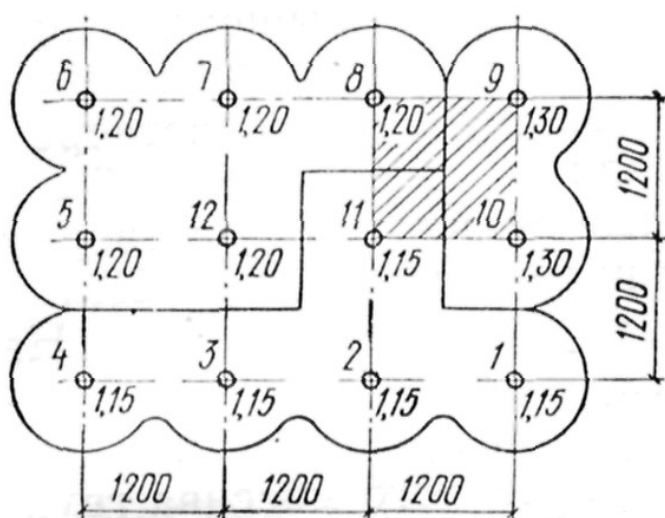


Рис. 2.5. План дослідно-виробничої ділянки: 1–12 номери свердловин

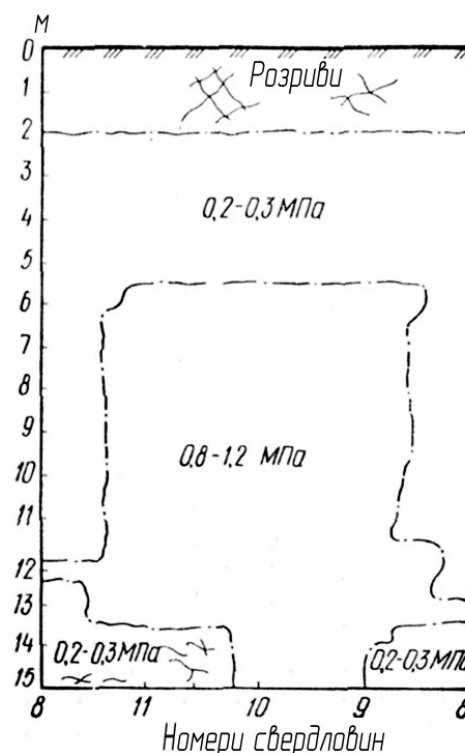


Рис. 2.6. Розгортка бокової поверхні шурфу

Міцність закріплення неоднорідна також і за глибиною. На глибині  $2 \div 5 \text{ м}$  вона нижча. На глибині від  $5$  до  $15 \text{ м}$  виявлено закріплення з вищою міцністю. Із всього дослідженого закріпленого масиву ґрунту  $8 \%$  не просочено силікатом. Це стосується головним чином верхньої частини шурфу, де знаходився насипний ґрунт. Решта ґрунту мала таку міцність:

- 22 % об'єму -  $0,2 \div 0,3 \text{ МПа}$ ;
- 22 % -  $0,3 \div 0,6 \text{ МПа}$ ;
- 16 % -  $0,8 \div 1,2 \text{ МПа}$ ;

32 % -                    понад 1,2 МПа.  
Середньозважена міцність склала близько 0,85 МПа.

## **2.6. Устаткування і механізація виробництва робіт**

### **2.6.1. Основна схема технології проведення робіт**

Проведення робіт з хімічного закріплення ґрунтів полягає в нагнітанні (ін'єктуванні) хімічних розчинів у ґрунт. Виконання цієї операції вимагає такого устаткування: занурюваних у ґрунт забиванням або забурюванням ін'єкторів, регулюючої і розвідної мережі, пристроїв для нагнітання і приготування хімічних розчинів. Крім того, для виконання робіт із забивання і видалення ін'єкторів, а також для розварювання глиби силікату і нагріву хімічних розчинів потрібне пневматичне і парове господарство. Схема, що достатньо повно характеризує весь технологічний процес робіт з хімічного закріплення ґрунтів способами однорозчинної і дворозчинної силікатизації, а також способом смолизації, наведена на рис. 2.7.

Технологічний процес і устаткування дещо змінюються залежно від застосованого способу. При дворозчинній силікатизації за наведеною схемою організації робіт шлях, який проходить силікат натрію, починається з силікат-глиби, що доставляється «навалом» із заводів і розварюється на місці в автоклавах. Після автоклавів розчин силікату натрію нагрівають для зниження в'язкості до 60 °С або до передбаченої проектом температури. Із запасних чанів, пройшовши насоси і потім пульт, де регулюються витрата і тиск розчину, що нагнітається, силікат натрію закачується через систему ін'єкторів у ґрунт. Шлях розчину хлористого кальцію аналогічний шляху розчину силікату натрію. Із схеми видно, що кожний з розчинів має своє насосне обладнання і свою регулюючу мережу, але один і той самий ін'єктор. У цьому випадку перед нагнітанням хлористого кальцію необхідно прокачати через ін'єктор невелику порцію води, що значною мірою збереже ін'єктор від утворення в ньому кремнегелю. Разом з устаткуванням для забивання ін'єкторів, верстатами для буріння свердловин, насосним обладнанням і розвідною мережею, забезпеченою манометрами, витратомірами

та ін., майданчик, де проводиться закріплення ґрунтів, повинен бути забезпечений електроенергією, водою і стиснутим повітрям. Нарешті, виробництво робіт з хімічного закріплення ґрунтів повинно бути забезпечено постійним контролем за якістю застосованих розчинів і закріпленого ґрунту.

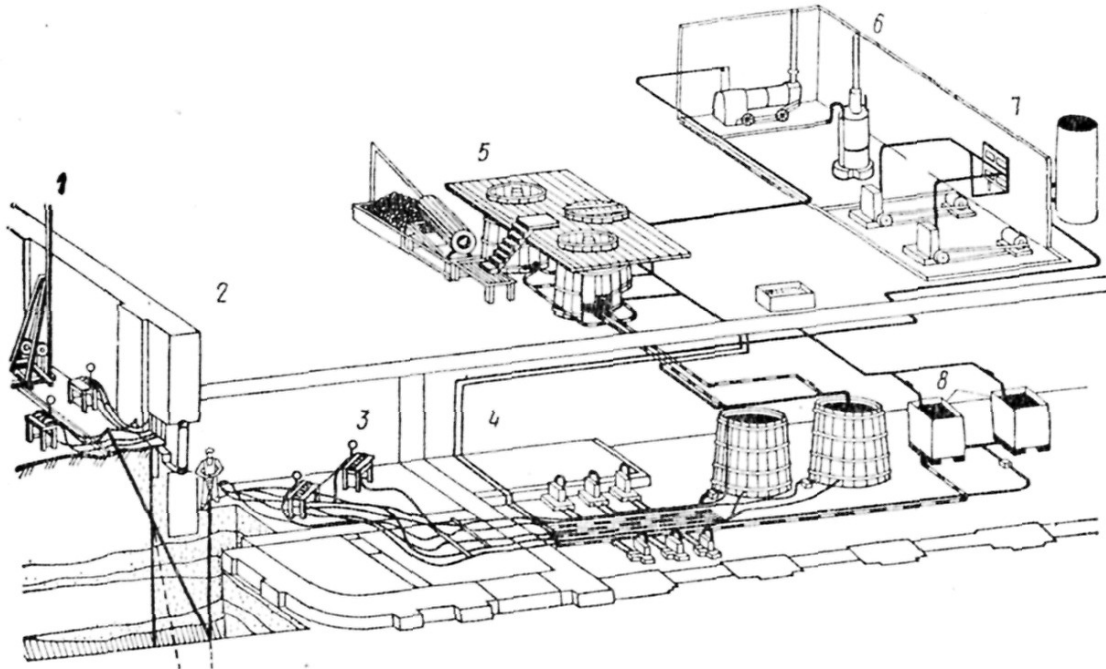


Рис. 2.7. Схема механізації робіт при закріпленні ґрунтів:  
 1 – забивання ін'єктора електрокопром; 2 – те саме, пневмолотом; 3 – пультові розподільники реактиву; 4 – насосна; 5 – силікаторозварювальний вузол; 6 – котельня; 7 – компресорна; 8 – ємкості для розчинів  $\text{CaCl}_2$

### 2.6.2. Ін'єктори

Конструкція ін'єктора і механізму для його занурення в ґрунт залежить від характеру і потужності закріплюваного ґрунту.

При закріпленні ґрунту на глибину до 20 м застосовують ін'єктор, що складається з наголовника, колон глухих ланок труб, перфорованої ланки, наконечника і сполучних частин – ніпелів. Для зменшення ущільнення ґрунту і полегшення введення розчинів у ґрунт перфорована ланка має менший діаметр, ніж глухі ланки ін'єктора. При забиванні ін'єктора наголовник тимчасово встановлюють без деталей, що забезпечують подачу

розчинів. Забивання ін'єктора на глибину до 20 м в піщані і лесові ґрунти можна здійснювати відбійними молотками (рис. 2.8, а).

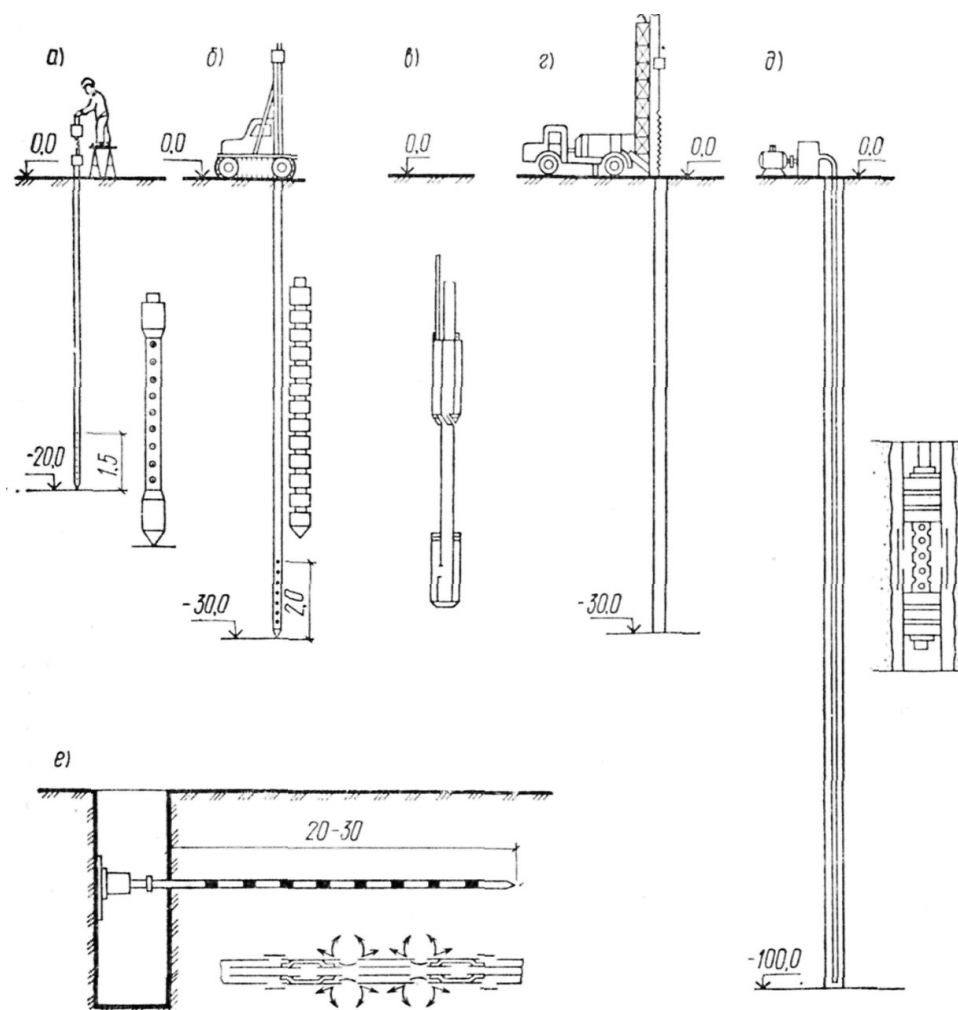


Рис. 2.8. Схеми забивання і задавлювання ін'єкторів

Закріплення ґрунтів на глибину до 30 м вимагає застосування міцнішого ін'єктора, зробленого з суцільнотягнутих труб діаметром  $58 \div 62$  мм. Перфорована частина такого ін'єктора має довжину  $1,5 \div 2,0$  м, а отвори, щоб уникнути їх засмічення, закриті гумовими кільцями. Занурення таких ін'єкторів здійснюється потужнішим устаткуванням (рис. 2.8, б). Забивання ін'єкторів виконують як з поверхні ґрунту, так і з підземних виробок. Для забивання ін'єкторів застосовують переважно механізми, обладнані пневмоударниками або пневматичними молотками типу перфаторів. Наприклад, використовують бурильний верстат з пневмоударником СБУ-100 або НКР-100М, змонтований на



ходовому візку СБУ-2 або КБУ-50, а також різні дослідні установки типу портативних пересувних копрових установок. Для видалення ін'єкторів, окрім вказаних установок, можна використовувати гідравлічні спарені домкрати вантажопідйомністю до 10 т.

При силікатизації просадних лесових ґрунтів з вологістю  $16 \div 20$  % ін'єктування силікатного розчину густиною  $1,13 \div 1,20$  г/см<sup>3</sup> можна здійснювати за допомогою забивання ін'єкторів (рис. 2.8, в) або через стінки пробурених свердловин (рис. 2.8, г). Для цього бурильним верстатом ЦГБ-50 проходять свердловину на глибину, що дорівнює довжині першої західки. Довжина західки в існуючій практиці складає  $2 \div 3$  м. Потім у верхній зоні західки встановлюють надувний тампон, через який шлангом від насоса розчин нагнітають у ґрунт. Потім тампон виймають із свердловини і проводять її буріння на довжину наступної західки. Так повторюють на всю глибину закріплення просадного лесу.

При хімічному закріпленні піщаних ґрунтів на глибині  $50 \div 150$  м, як це було при створенні протифільтраційної завіси в основі Висотної Асуанської греблі, нагнітання хімічних розчинів здійснюють через манжетні ін'єктори, що опускаються в пробурену під захистом глинистого розчину свердловину діаметром  $120 \div 150$  мм. Свердловину пробурюють на всю глибину закріплюваної зони, потім у свердловину, заповнену глинистим розчином (завдяки чому її стінки не вимагають кріплення), занурюють ін'єктор з гумовими манжетами, що закривають його отвори. Після цього через нижню манжету із застосуванням тампона нагнітають цементно-глинистий розчин, який заповнює зазор між ін'єктором і стінкою свердловини. Цей варіант дозволяє надалі нагнітати закріплюючий розчин у будь-якій зоні ін'єктора (рис. 2.8, д).

Манжетний ін'єктор може бути використаний для закріплення ґрунту під існуючими будівлями шляхом задавлювання його зі спеціально підготовленої траншеї (рис. 2.8, е). Таким чином, застосування ін'єкторів різної конструкції дозволяє нагнітати хімічні розчини на необхідну глибину.

### **2.6.3. Регулююча мережа**

Призначення регулюючої мережі – підведення хімічних розчинів у потрібній кількості і під потрібним тиском від

насосної установки до працюючих ін'єкторів. Конструктивно регулююча мережа складається з труб або шлангів, дільників, вимірників витрати рідини, сполучних муфт, кранів і ніпелів.

Металеві трубопроводи діаметром 36÷50 мм можуть бути застосовані для підведення розчинів тільки при капітальному прокладенні на тривалий час в утеплюваних приміщеннях. В основному ж для трубопроводів слід рекомендувати гумові товстостінні шланги. Перевагами їх є легке збирання і розбирання, швидкість і легкість промивання. Гумові шланги з внутрішнім діаметром 25 мм виготовляють для тиску до 3 МПа. Вони цілком придатні для практичного застосування при хімічному закріпленні ґрунтів.

Найбільш важливою апаратурою регулюючої мережі є вимірник витрати. Для точного контролю за кількістю розчину, що нагнітається через ін'єктор в одну західку при використанні спільної насосної установки, необхідно мати для кожного ін'єктора свій вимірник витрати.

#### **2.6.4. Насосне устаткування**

Нагнітання хімічних розчинів у ґрунт проводиться за допомогою насосів, які повинні відповідати таким вимогам: мати регульовану подачу від 5 до 20 л/хв; забезпечувати тиск 1 МПа; мати деталі і вузли з матеріалу, що не піддається корозії при застосуванні хімічних розчинів. Цим вимогам повною мірою відповідають насоси типу ПС-4Б, НД, ДА та ін.

Насос ПС-4Б (одноплунжерний) має подачу 0,33 м<sup>3</sup>/год, масу 47 кг. Насос НД випускається таких марок: НД-400/16, НД-1000/10, НД-1600/10 і НД-2500/10 (перше число – подача насоса, л/год, друге – тиск у 0,1 МПа). Агрегати ДА є насосами НД, які забезпечені варіатором регулювання подачі, скомпоновані на загальній рамі і працюють від одного двигуна. Поєднання насосів у них може бути різним, але всі вони можуть працювати незалежно один від одного. Випускаються агрегати декількох марок, найбільш придатні агрегати марки 2 ДА (двонасосні) з подачею 0,5÷7 л/хв і марки 4 ДА (чотиринасосні) з подачею 11÷40 л/хв. Перераховані насоси виконані з кислототривкої сталі, прості у виконанні і надійні в роботі. У

комплекті з насосами заводи поставляють апаратуру управління, що забезпечує світлову сигналізацію контролю їх роботи.

Замість насосів для нагнітання розчинів у ґрунт можуть бути використані пневматичні установки, що є циліндровими ємностями об'ємом до 1 м<sup>3</sup>, розраховані на тиск до 0,8 МПа. Ємність обладнується водомірним склом, манометрами, запобіжним клапаном, випускним краном.

Для закачування тампонажних розчинів застосовують насоси з великою подачею і високим тиском. Як такі насоси можуть бути використані: Гр 16/40 з максимальною подачею 16 м<sup>3</sup>/год і тиском до 4 МПа; НГр 250/50 з подачею 15 м<sup>3</sup>/год при тиску 5 МПа; 11 ГрБ з подачею до 18 м<sup>3</sup>/год при тиску 6,3 МПа. Насоси перших двох типів мають масу 550 і 730 кг.

### **2.6.5. Забивання і видалення ін'єкторів**

У практиці хімічного закріплення ґрунтів на дуже великій кількості об'єктів (більше 600) виконувалися роботи порівняно невеликого обсягу. Це пояснюється тим, що багато побудованих будівель і промислових об'єктів, особливо на лесових просадних ґрунтах, що піддалися деформації, можна було продовжувати експлуатувати тільки після застосування хімічного закріплення ґрунтів основи. Для цього, як правило, застосовують забивання або задавлювання ін'єкторів.

До робіт із забивання ін'єкторів висувають такі вимоги: ін'єктор повинен бути забитий строго за вказаним у проекті напрямом і з точністю кута нахилу 2 ÷ 3°; забивання повинно бути проведене на задану глибину в можливо короткий термін; при забиванні обладнання не повинне піддаватися сильному зносу. Перераховані вимоги являють собою серйозні вимоги до механізмів і устаткування, яке застосовується на цих роботах.

Проводити забивання ін'єкторів у вертикальному і похилому напрямках, а також видаляти їх із ґрунту можна за допомогою портативної копрової установки з перфоратором КЦМ-4. Вона складається зі зварної рами, трубчастих напрямних, якими переміщається перфоратор, і ручної лебідки. У будівельній практиці для видалення ін'єкторів набув поширення верстат Л.Г. Медведєва (рис. 2.9).

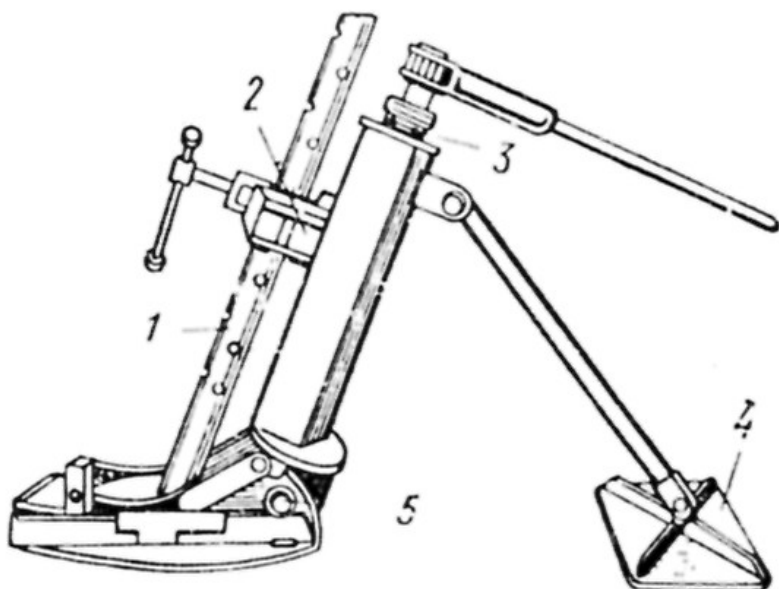


Рис. 2.9. Верстат для направлення при забиванні та видаленні ін'єктора:  
1 – ін'єктор; 2 – трубний затиск; 3 – гвинт; 4 – упор; 5 – шарнірний пристрій

### 2.6.6. Приготування розчинів

Приготування хімічних закріплюючих розчинів вимагає точного дотримання дозування їх компонентів і щільності. Тільки за цієї умови гелеутворюючий розчин може забезпечити необхідну міцність закріпленого ґрунту і можливість виробництва ін'єкційних робіт. Для приготування розчинів можна використовувати розчиномішалки будь-якої конструкції, обладнані подавальними і зливними патрубками з кранами. Найбільшого поширення набули розчиномішалки РМ конструкції ВО «Гідроспецбуд». Перемішування в них розчину проводиться швидкообертаючою турбіною з частотою обертання  $500 \text{ хв}^{-1}$ . Для приготування тампонажних розчинів можуть бути використані розчиномішалки РМ і СБ.

Заслужує уваги ін'єкційна установка для хімічного закріплення ґрунтів з програмним управлінням західнонімецької фірми «Бауер», використана на об'єктах «Главмосінжбуду». До установки входять: бункер для розчину силікату натрію і два бункери для розчину отверджувача; дозуючі насоси; ємності змішувача; гідравлічний агрегат; ін'єкційні насоси; пульт

управління; напірна лінія і стрічкові самозаписувачі. Усе обладнання, виключаючи бункери, змонтоване на спеціальному фургоні. Технологічна схема виробництва робіт установки така. На пункті управління задається програма робіт. Автоматично вмикаються насоси-дозатори, що відміряють в ємності змішувача відповідні компоненти гелеутворюючого розчину. Змішення їх в ємності проводиться міксером. Після приготування суміші вмикаються насоси для закачування.

У міру того як витрачається розчин із ємності змішувача, автоматично готується нова порція розчину в іншій ємності. Об'єм прокачуваної кожним насосом порції контролюється індивідуальним лічильником. Після перекачування заданого програмою об'єму розчину насос автоматично вимикається. У процесі ін'єктування розчинів у ґрунт параметри нагнітання (одинична витрата, тиск) записуються на стрічці самозаписувача.

### **Контрольні питання**

1. Перелічити вихідні дані для складання проекту закріплення ґрунтів.
2. Що визначається в результаті інженерно-геологічних вишукувань?
3. З якою метою проводяться лабораторні випробування ґрунтів?
4. З якою метою проводиться визначення ємності поглинання ґрунтів?
5. Як визначається ємність поглинання ґрунтів?
6. З якою метою проводиться визначення вмісту карбонатів у ґрунті?
7. Як визначається вміст карбонатів у ґрунті?
8. З якою метою проводиться визначення коефіцієнта фільтрації ґрунту?
9. Як проводиться визначення коефіцієнта фільтрації ґрунту?
10. З якою метою проводиться визначення часу гелеутворення закріплюючих розчинів?
11. Як проводиться визначення часу гелеутворення закріплюючих розчинів?

### **3. ПРИКЛАДИ ЗАКРІПЛЕННЯ ҐРУНТІВ У БУДІВНИЦТВІ**

#### **3.1. Застосування хімічного закріплення ґрунтів у будівництві**

Основні властивості закріпленого ґрунту – підвищені міцність, водонепроникність, дозволяють застосовувати хімічне закріплення ґрунтів майже у всіх галузях будівництва. Улаштування фундаментів, вертикальних стін, склепінь, протифільтраційних завіс без розкриття поверхні ґрунту забезпечує вирішення складних завдань у фундаментобудуванні, підземному, гірничому і гідротехнічному будівництві. Застосування хімічного закріплення ґрунтів у кожній з галузей будівництва накладає свій відбиток на склад хімічних розчинів, технологію, устаткування. У зв'язку з цим приклади практичного застосування способів поділені в подальшому викладі за галузями будівництва.

### ***3.1.1. Закріплення ґрунтів під фундаментами***

Необхідність у закріпленні ґрунту під фундаментами виникає або при збільшенні навантаження на фундаменти, або при зменшенні несучої здатності ґрунту. Протягом останніх 30 років виконано великий обсяг робіт із силікатизації просадних лесових суглинків. Це обумовлено будівництвом будівель і споруд на заздальгідь ущільнених трамбуванням і палями просадних лесах, а також на пальових фундаментах, що не прорізають всієї товщі просадних лесів. Широке розповсюдження просадних лесів призвело в сотнях випадків при подальшому замочуванні лесів до понаднормативних нерівномірних осідань фундаментів і деформацій будівель. Майже єдиним надійним способом, що дозволяє припинити подальші деформації цих будівель, є силікатизація їх лесових основ. Характерним прикладом виступає будівництво будівель на просадних лесах у Волгодонську. За короткий строк тут у зв'язку з будівництвом заводу «Атоммаш» було побудоване нове місто із сучасних багатопверхових будівель на ущільнених подушках товщиною в 5 м. Подальші замочування лесу призвели до деформацій багатьох будівель. Для збереження цих будівель підготовлено 30 проектів із силікатизації просадної товщі.

Не тільки нові, але і давно побудовані будівлі з різних причин вимагають закріплення ґрунтів під фундаментами.

Наприклад, будівлі ряду театрів, побудованих 100÷200 років тому. Так, при реконструкції сцени Великого театру в Москві збільшилися навантаження на ґрунт. Для збільшення його несучої здатності був застосований спосіб дворозчинної силікатизації.

При збільшенні площі сцени Ленінградського театру опери і балету в теперішньому Санкт-Петербурзі, коли забивали палі в Крюковському каналі, стіни сцени отримали незагасальні осідання. Було терміново застосовано смолизацію для закріплення слабкопроникних ґрунтів.

Спосіб смолизації застосовувався в Санкт-Петербурзі (Ленінграді) також при закріпленні основи під фундаментами виробничого корпусу молококомбінату. В одному з корпусів комбінату було необхідно встановити сім цистерн по 30 т кожна, у зв'язку з чим навантаження на основу збільшилося в 1,5 разу порівняно з допустимою. Ґрунт під фундаментами було закріплено способом смолизації, тому що саме він дозволив не зупиняти роботу цеху. У результаті проведеного закріплення була одержана висока міцність ґрунту.

У м. Одесі рясні поливи квітів і дерев з одного боку будівлі театру опери та балету протягом 80 років призвели у 1956 р. до її аварійного стану, що вимагало виконання силікатизації лесів. Силікатизацію ґрунтів було запроектовано також під фундаментами Київського театру опери і балету ім. Т.Г. Шевченка.

Як видно, на всіх перерахованих об'єктах застосовані різні способи закріплення ґрунтів.

Разом із застосуванням «підведення» фундаментів для існуючих будівель у будівництві знаходить застосування улаштування фундаментів із закріпленого ґрунту до спорудження будівель і споруд. Прикладами є будівництво труб висотою 120 м у м. Запоріжжі і будівництво адміністративної будівлі на просадній товщі в 31 м у м. Ташкенті. Нижче наведено приклади практичного застосування закріплення ґрунтів під фундаментами дворозчинним і однорозчинним способами силікатизації, смолизацією, електрохімічним способом і електросилікатизацією. Способи електрохімічного закріплення та електросилікатизації широкого розповсюдження не одержали, але приклади їх вдалого практичного здійснення існують.

## Дворозчинна силікатизація

**Фундамент житлової будівлі у м. Москві.** Поблизу будівлі здійснювалась проходка тунелю для Московського метрополітену. Щоб уникнути осідань будівлі, ґрунти під його фундаментом були закріплені способом дворозчинної силікатизації. За даними бурових робіт, на ділянці силікатизації залягали такі ґрунти: культурний шар потужністю 1,0÷1,5 м; пісок середньої крупності, місцями дрібний з невеликими включеннями гальки і гравію, потужністю 2,0÷4,5 м; суглинок потужністю 0,5÷1,0 м, що підстилається моренним суглинком з включенням валунів. Гідрогеологічні умови характеризувалися рухом ґрунтових вод уздовж фасаду будівлі. Рівень ґрунтових вод увесь час змінювався, що говорило про порушення їх режиму при проходці поблизу підземних виробок. Пористість ґрунтів складала від 24 до 38 %. Коефіцієнт фільтрації змінювався від 2,6 до 8,6 м/доб.

Для закріплення ґрунтів під фундаментом будівлі забили чотири ряди ін'єкторів – три із підвалу і один із зовнішнього боку будівлі. Закріпленням були охоплені надморенні піски і покрівля суглинку. Ін'єктори розташовували в шаховому порядку на відстані 0,8 м один від одного. З боку підвалу перший ряд ін'єкторів був направлений вертикально, другий – під кутом 75° і третій – під кутом 60° до горизонталі. Ряд ін'єкторів із зовнішнього боку будівлі був направлений вертикально і розташований на відстані 0,5 м від фасадної стіни (рис. 3.1).

Роботи почали з підвалу. Унаслідок недбалості і помилок результат закріплення виявився незадовільним, і роботи припинили. До основних помилок можна віднести такі:

1) перерва між нагнітанням силікату натрію і хлористого кальцію складала 20 діб. Природно, концентрація силікату натрію у водонасичених ґрунтах, тим більше за наявності фільтраційного потоку, за цей час знижувалася;

2) розчини нагнітали без підігріву, не дивлячись на низькі температури (грудень), у зв'язку з чим вони погано розповсюджувалися в дрібних пісках;

3) між нагнітанням силікату натрію і хлористого кальцію ін'єктори промивали водою в довільному об'ємі;



4) була відсутня технічна документація, зокрема дані про розташування ін'єкторів і глибину їх забивання;

5) водоміри, встановлені на пульті для вимірювання витрати силікату натрію, надавали неправильні дані;

6) целулоїдні лопаті турбіни були замінені на металеві, а останні піддавалися корозії.

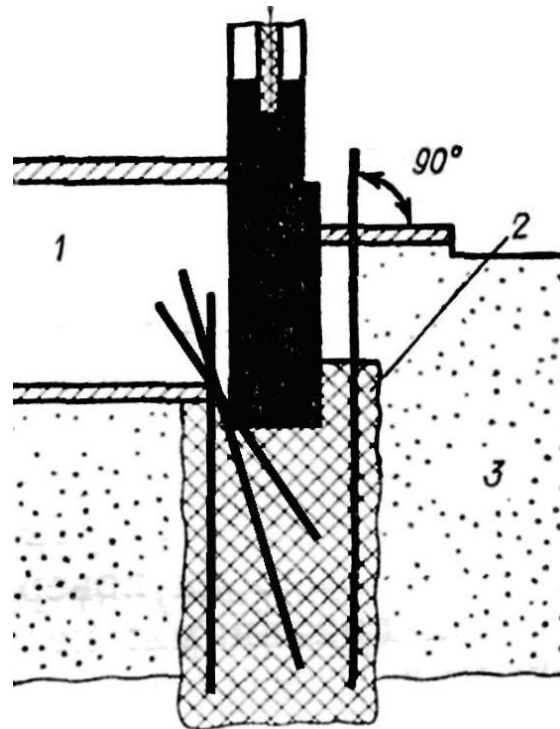


Рис. 3.1. Закріплення ґрунту під фундаментом житлової будівлі:  
1 – підвал; 2 – закріплення; 3 – пісок

Розкриття шурфу показало, що ґрунт насичений розчинами, але не закріплений (були наявними тільки малі зони закріплення). Успішному повторному проведенню початих робіт перешкоджав вихід розчинів затрубним простором уздовж ін'єктора на поверхню. Це пояснювалося такими причинами: наявністю щільних суглинків, які мало і надзвичайно повільно приймали розчини; неврахуванням того, що частина об'єму ґрунту вже піддалася закріпленню. Проникнення розчинів крізь культурний шар через відсутність бетонної подушки також спричинило вихід розчину на поверхню із закріпленням культурного шару, що було зайвим. У зв'язку з цим при повторній роботі вирішили закачати розчин спочатку через перший ряд ін'єкторів (вертикальний) з

тим, щоб закріплений за допомогою цього ряду ґрунт служив подушкою. Така подушка перешкоджала б виходу розчинів при подальшому їх ін'єктування через другий і третій ряди. Проте через подушку виявилось неможливо забити ін'єктори наступних рядів, тому від цього варіанта довелося відмовитися і повернутися до одночасного нагнітання розчину у всі три ряди ін'єкторів.

Оскільки з підвалу не всюди вдалося забити три ряди ін'єкторів, у цих місцях забивали додаткові ін'єктори із зовнішнього боку будівлі. Перший ряд ін'єкторів, забитих вертикально, відстояв від фасаду на 0,5 м, другий ряд ін'єкторів, забитих під кутом  $75^\circ$  до горизонту, – на 0,75 м і третій ряд ін'єкторів, забитих під кутом  $60^\circ$ , – на 2,0 м. Через перший ряд розчини нагнітали на глибині від 2,2 до 8,6 м, через другий – від 5,8 до 8,6 м і через третій – від 4,2 до 7,4 м. При довжині перфорованої частини ін'єктора 0,8 м і середній пористості ґрунту 34 % норма витрати на заходку силікату натрію складала 200 л, хлористого кальцію – 240 л. Визначення витрат розчинів на  $1 \text{ м}^3$  ґрунту до їх уточнення проводилося за формулою (2.7). На початку робіт силікат натрію нагрівали до  $80 \div 85^\circ \text{C}$ , а хлористий кальцій – до  $50^\circ \text{C}$ ; надалі хлористий кальцій нагрівали тільки до  $20^\circ \text{C}$ . У середньому витрата на заходку складала 200 л силікату натрію і 230 л хлористого кальцію. Тривалість нагнітання цього об'єму розчину складала  $50 \div 100$  хв. Середній тиск нагнітання дорівнював приблизно 1 МПа.

Роботи із закріплення ґрунтів під фундаментом були початі з рогу будівлі. Закріплення велося одночасно на двох, а іноді на трьох ділянках окремими бригадами уздовж двох стін. При сполученні окремих ділянок розчин, що нагнітався, інколи не приймався ґрунтом, оскільки зустрічався з ділянками, вже заповненими розчинами або продуктами реакції від раніше закріпленої ділянки. Збільшення тиску дозволяло закачати силікат натрію, але хлористий кальцій закачати в цьому місці вже виявлялося неможливим. У цих випадках у попередню свердловину нагніталася подвійна норма хлористого кальцію.

Ін'єктори забивали пневматичними молотками СР-116. Стиснуте повітря подавали повітрогоном від тимчасової компресорної установки. Для забивання ін'єкторів з боку вулиці застосовували електрокопер. Розчини нагнітали через пульти

насосами «Ижорец» типу Е, які були встановлені в підвальному приміщенні будівлі. Насосна установка складалася з трьох насосів для нагнітання силікату натрію і трьох насосів для нагнітання хлористого кальцію. У роботі застосовували по одному насосу для кожного розчину. Решта насосів використовувалася для подачі гарячої води при промиванні насосів та ін'єкторів.

По хлористому кальцію лічильники працювали задовільно з поправковим коефіцієнтом  $1,1 \div 1,3$ . Силікатний розчин відповідав поставленим вимогам, тобто мав модуль  $2,6 \div 2,8$  і щільність  $1,5 \text{ г/см}^3$ . Проектом була встановлена гранична швидкість нагнітання в  $4 \div 5$  л/хв, або  $40 \div 50$  хв на закачування в одну західку 200 л розчину. У процесі виробництва робіт швидкість нагнітання збільшували в  $2 \div 5$  разів, тобто до 20 л/хв через один ін'єктор. Це призводило до розриву ґрунту і не могло забезпечити монолітного закріплення. У результаті проведених робіт було закріплено  $3470 \text{ м}^3$  ґрунту. В одну зміну закачувалося близько 3000 л розчину. Середня продуктивність за зміну склала  $6 \div 7 \text{ м}^3$  закріпленого ґрунту.

Якість закріплення було перевірено шістьма шурфами з боку підвалу і двома шурфами із зовнішнього боку будівлі. Один шурф, закладений із зовнішнього боку будівлі, був розкритий на глибину 4 м. При його огляді встановлено, що верхній культурний шар і піски, що під ним залягають, за винятком одного невеликого прошарку в піску середньої крупності та двох у дрібному, були суцільно закріплені. При розкритті шурфу застосовували ломи, кувалди і пневматичні молотки. Інший шурф, закладений в підвалі, був розкритий на глибину 4,05 м. Закріплення ґрунту виявилось задовільним. Розкриття шурфу, як і попереднього, проводилося із зусиллям. При розкритті шурфу ґрунтові води в нього не поступали, хоча до початку робіт із закріплення їх рівень знаходився на глибині 1,6 м від поверхні. Тільки на третій день після розкриття шурфу вода почала просочуватися в нього через незакріплений прошарок на глибині 2 м від його гирла. Розкриття двох інших шурфів показало ще кращі результати. Границя міцності при стиску закріпленого ґрунту склала 5 МПа.

**Фундамент будівлі на вул. Моховій у м. Москві.** Ґрунт поблизу та під фундаментом цього будинку був розпушений у результаті робіт з будівництва Московського метрополітену. Щоб припинити осідання будівель, що почалися, потрібно було укріпити ґрунт. Потужний піщаний шар, на якому розташований фундамент будівлі, підстилався моренним суглинком, тому виявилось доцільним закріпити шари піщаного ґрунту між фундаментом і покрівлею моренного суглинку (4÷5 м). Форма закріплюваного масиву була трапецеїдальною з шириною зверху 1,25 м і знизу 3,8 м. Норма витрати розчинів для закріплення була визначена за пористістю ґрунту і складала 385 л/м<sup>3</sup>. Загальне число ін'єкторів визначалося довжиною закріплюваного масиву уздовж фасаду (22 м) і складало 110 шт., з яких 60 шт. було забито із підвалу і 50 шт. – із зовнішнього боку будівлі. Загальний об'єм закріплюваного ґрунту був визначений у 250 м<sup>3</sup> (рис. 3.2).

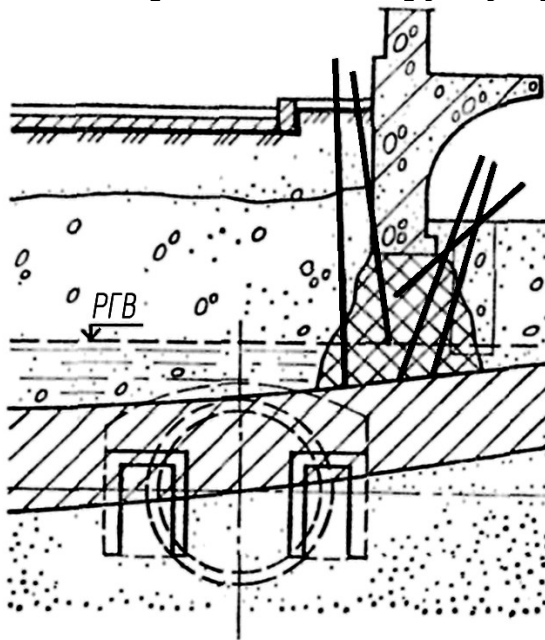


Рис. 3.2. Закріплення ґрунту під фундаментом будівлі на вул. Моховій

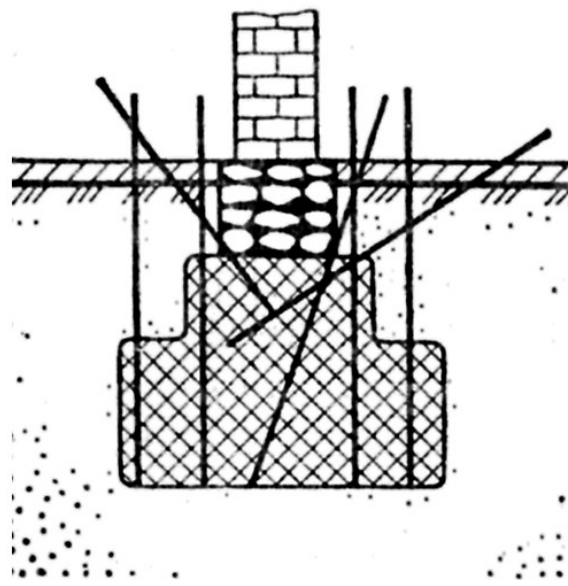


Рис. 3.3. Закріплення ґрунту під фундаментами стін сцени Великого театру

Нагнітання першого розчину проводилося по західках при забиванні ін'єктора, а другого – також по західках, але при його витягуванні. Забивався ін'єктор пневматичним відбійним молотком масою 25 кг. Швидкість забивання складала 0,75–1,0 м/хв і майже не залежала від глибини. Витягувався ін'єктор за допомогою талі вантажопідйомністю 0,5 т і відбійного

молотка, бойок якого упирався знизу в хомут, надягнений на ін'єктор. Розчини нагніталися шістьма плунжерними насосами при середньому тиску 1,0–1,5 МПа.

Після закінчення робіт на границях зони закріплення були розкриті два контрольні шурфи, які виявили однорідність закріплення. Границя міцності при стиску закріпленого ґрунту склала 1,5–2,5 МПа.

**Фундаменти стін сцени Великого театру.** Старе дерев'яне перекриття над сценою Великого театру в Москві з часом (за 80 років) прийшло в непридатність. Прогин окремих ферм досяг 40÷50 см, що загрожувало серйозною аварією. Старе перекриття підлягало заміні металевими фермами прогоном 39,25 м, які повинні були спиратися на зовнішні стіни.

Тиск на дрібнозернистий піщаний ґрунт, що залягає під фундаментами зовнішніх стін, досягав при старих конструкціях 0,5÷0,6 МПа, після встановлення нового перекриття і внаслідок розбирання проміжних стін повинен був зрости до 0,7 МПа. Це вимагало закріплення ґрунту під фундаментами для можливості збільшення глибини їх закладання і розподілу тиску на більшу площу. Ширина фундаменту знизу повинна була скласти 4,5 м (рис. 3.3). Закріплення було проведено способом дворозчинної силікатизації по двох зовнішніх стінах сцени довжиною 60 м. Об'єм закріплення склав 720 м<sup>3</sup>. Перевагу способу силікатизації віддали над іншими способами «підведення» фундаменту завдяки надійності, портативності устаткування і простоті виробництва робіт, що не вимагало якої-небудь перерви в роботі театру. У 1950 р. у зв'язку з ремонтними роботами на сцені були розкриті шурфи і відібрані зразки закріпленого ґрунту. Границя міцності при стиску склала через 15 років після закріплення 3 МПа.

### **Однорозчинна силікатизація**

**Фундаменти пам'ятника архітектури в Московському Кремлі.** Наявність значної кількості органічних речовин (гумусу) в піщаних ґрунтах, що залягають під фундаментами пам'ятника архітектури, не дозволяла закріплювати їх способом дворозчинної силікатизації через незначну проникність, а

смолизація в ґрунтах з великим вмістом органіки взагалі непридатна, тому був використаний спосіб однорозчинної силікатизації, заснований на взаємодії силікату натрію і кремнефтористоводневої кислоти. Як видно з рис. 3.4, під фундаментами стін була створена плита із закріпленого ґрунту товщиною від 2 до 7 м. Загальний об'єм закріплення склав близько 13 000 м<sup>3</sup>.

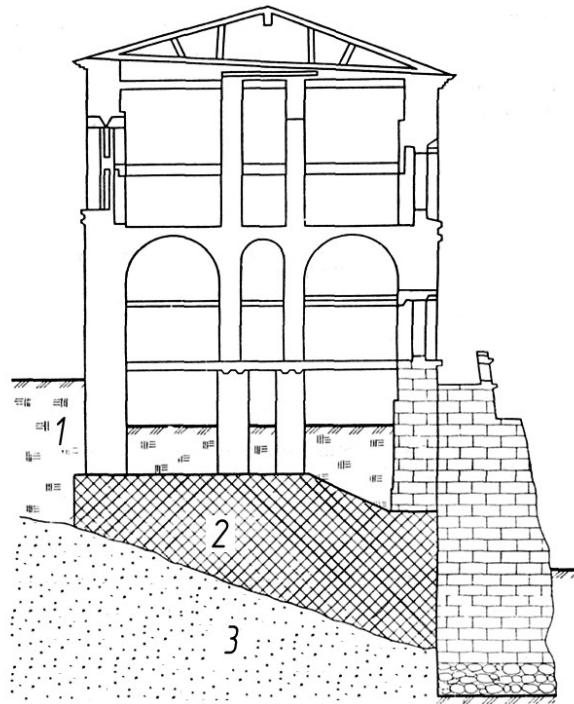


Рис. 3.4. Закріплення ґрунту під фундаментами пам'ятника архітектури:  
1 – насипний ґрунт; 2 – закріплений ґрунт; 3 – пісок

Розчини готували в спеціальному цеху, де силікат натрію розбавляли до щільності 1,3 г/см<sup>3</sup>, а кремнефтористоводневу кислоту – до щільності 1,08 г/см<sup>3</sup>. Час гелеутворення підбирали виходячи з умови, щоб розчини могли бути ін'єктованими протягом 1 год. У зв'язку з тим, що запропонована рецептура при звичайній температурі (15÷20 °С) має короткий час гелеутворення (30÷40 хв), на робочому майданчику розчини охолоджували за допомогою аміачної холодильної установки до 8÷10 °С. У результаті час гелеутворення склав 1,0÷1,5 год. Змішували розчини безпосередньо біля насосної установки.

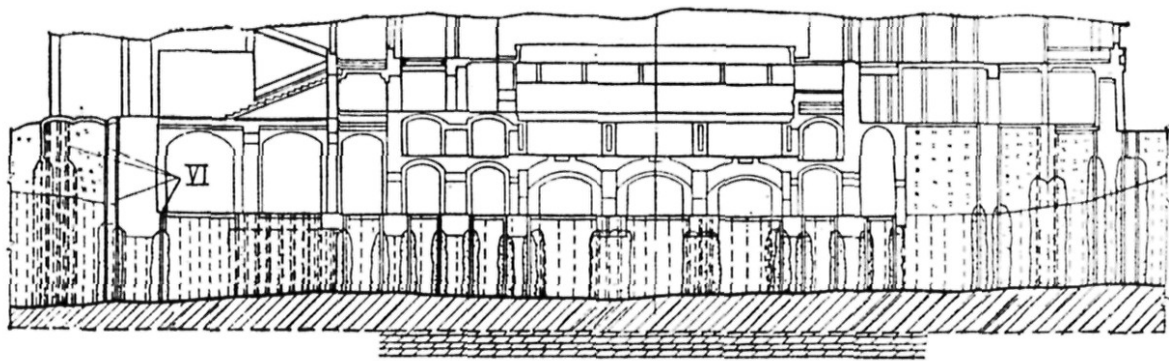
Залежно від місця виробництва робіт розчини нагнітали через забивні або манжетні ін'єктори; останні опускали в заздалегідь пробурені свердловини.

Контроль виконаних робіт здійснювали шляхом вимірювання об'єму закачаних розчинів, а після закінчення робіт контроль проводили шляхом розкриття шурфів завглибшки до 11 м. Відібрані із шурфів зразки закріпленого ґрунту мали границю міцності при стиску  $0,8 \div 1,0$  МПа. Основним показником успішного виконання робіт з'явилося припинення нерівномірних осідань фундаментів і доведення їх до 1 мм в рік.

**Фундаменти будівлі Одеського театру опери і балету.** Прикладом заходів з ліквідації значних деформацій будови, зведеної на лесових просадних ґрунтах, є закріплення ґрунтів під фундаментами будівлі Одеського театру опери і балету. Будівлю театру було побудовано в 1887 р. архітекторами Ф. Фельнером і Р. Гельмером. Театр має п'ять ярусів і двоповерховий підвал. Висота будівлі 30 м, площа  $5000 \text{ м}^2$ , об'єм 100 тис.  $\text{м}^3$ . Основний несучий остов будівлі – стіни з цегли і щільного вапняку. Фундаменти будівлі стрічкові зі щільного вапняку шириною від 0,6 до 2 м. У 1900 р. були виявлені значні нерівномірні осідання будівлі: східна сторона осіла місцями на 210 мм, підлоги осіли на  $65 \div 110$  мм. Деякі крокв'яні ферми значно деформувалися. Експертна комісія рекомендувала виключити замочування під фундаментами шляхом прокладення комунікацій у прохідних тунелях. Це було виконано, але осідання тривали.

У 1948  $\div$  1950 рр. деформації будівлі Одеського театру стали настільки значними, що постало питання про можливість її подальшої експлуатації. Вивчення геологічних умов і геотехнічних властивостей ґрунтів в її основі показало, що на глибині  $12,5 \div 13,5$  м під фундаментами залягає шар лесового ґрунту товщиною від 8 до 11 м. Вологість цього ґрунту -  $13 \div 20$  %, коефіцієнт фільтрації - 0,4 м/доб, коефіцієнт відносної просадності - 0,06, пористість -  $40 \div 46$  %. Найбільш доцільним способом стабілізації осідань і припинення деформацій будівлі театру в даних геологічних умовах була визнана однорозчинна силікатизація його основи, яка і була здійснена протягом 1956 р. трестом Південдіпробуд за участю НДІ основ та фундаментів (рис. 3.5).

а)



б)

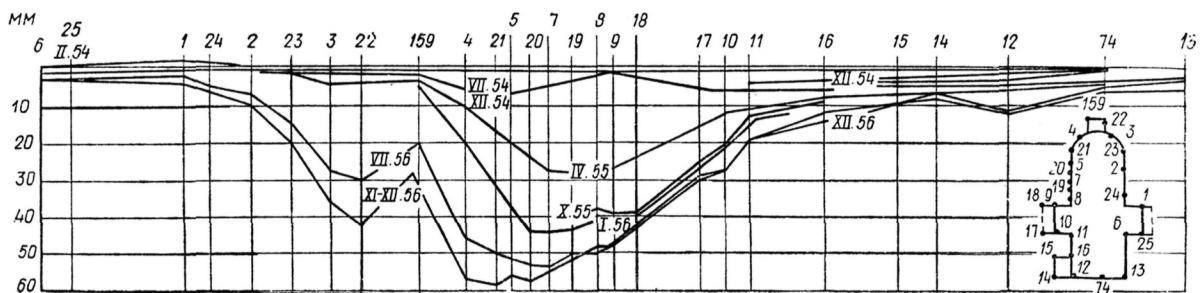


Рис. 3.5. Закріплення ґрунту під фундаментами будівлі  
Одеського театру опери і балету:

а – поперечний розріз; б – графік спостережень за осіданнями; I – насипний ґрунт; II – лесовий ґрунт; III – червоно-бура глина; IV – щільний мергель; V – ґрунт, закріплений силікатизацією; VI – ін'єктори

У напівкруглій частині будівлі закріплення проводилося через два ряди ін'єкторів, а у прямокутній – через один ряд. Силікатний розчин робочою густиною  $1,13 \text{ г/см}^3$  нагнітали західками завдовжки 1,3 м зверху вниз. Радіус закріплення від одного ін'єктора складав 0,6 м. Кількість західок залежала від потужності лесового ґрунту і коливалася від трьох до восьми. Нагнітання здійснювали трьома шестиплунжерними насосами НС-1. У кожен західку нагнітали 514 л розчину силікату натрію. Швидкість нагнітання складала в середньому 4 л/хв. Об'єм закріпленого ґрунту склав  $15436 \text{ м}^3$ .



У результаті контролю була встановлена монолітність закріплення. Границя міцності при стиску закріпленого ґрунту склала  $1,5 \div 2,5$  МПа. Спостереження за осіданнями, що проводилися одночасно з силікатизацією, показали їх загасання в процесі закріплення і повне припинення після закінчення робіт (рис. 3.5, б).

**Фундаменти із закріпленого ґрунту в м. Ташкенті.** У 1975 р. в Ташкенті були виконані проектні і будівельні роботи з посилення основи деформованої будівлі (корпус А) і улаштування фундаментів із закріпленого ґрунту при будівництві нової будівлі (корпус Б) способом силікатизації. Корпус А є шестиповерховою будівлею прямокутної форми розміром в плані  $93 \times 16,5$  м, розділеною деформаційними швами на три секції, кожна з яких спирається на суцільну залізобетонну фундаментну плиту. Підшви плит заглиблені на 4,7 м (рис. 3.6). Будівлю було споруджено у 1964 р. При будівництві лесова основа була утрамбована на глибину 1 м. Необхідність закріплення основи корпусу А була викликана значними нерівномірними осіданнями будівлі, які склали у 1970 р.  $10 \div 20$  мм, у 1972 р.  $30 \div 80$  мм, а до початку 1975 р.  $130 \div 360$  мм. Спостереження показали, що в процесі експлуатації будівлі ступінь вологості ґрунту збільшилася з 0,32 до 0,8. Відносна просадність у 1974 р. склала  $0,03 \div 0,04$ .

Після проведення дослідних робіт була рекомендована така схема посилення основи корпусу А: улаштування по периметру будівлі суцільної стіни із закріпленого ґрунту, що відіграє роль стрічкового фундаменту і водонепроникної завіси; улаштування в середній частині будівлі подовжньої стіни із закріпленого ґрунту шириною 2 м, а також створення двох поперечних стін у місцях розрізання фундаменту деформаційними швами. У результаті площа силікатованого ґрунту в плані повинна була скласти більше 60 % площі будівлі. Виробництво робіт не вимагало застосування землерийного і вантажопідйомного устаткування. Силікатизацію на майданчику проводили через систему ін'єкторів, занурення яких на глибину 30 м і їх витягання здійснювали верстатами БТС-2 або БТС-150 із зусиллям вдавлювання до 100 кН. Для транспортування і нагнітання розчину використовували поливомийну машину, обладнану насосом. Після завершення робіт із силікатизації основи корпусу

А нерівномірні осідання припинилися, а рівномірні протягом першого року склали  $11 \div 18$  мм, що вказує на ущільнення замоченого лесу нижче подошви фундаментів. Наступного року ці осідання склали  $5 \div 6$  мм, а на третій рік – лише 3 мм (див. рис. 3.6, б).

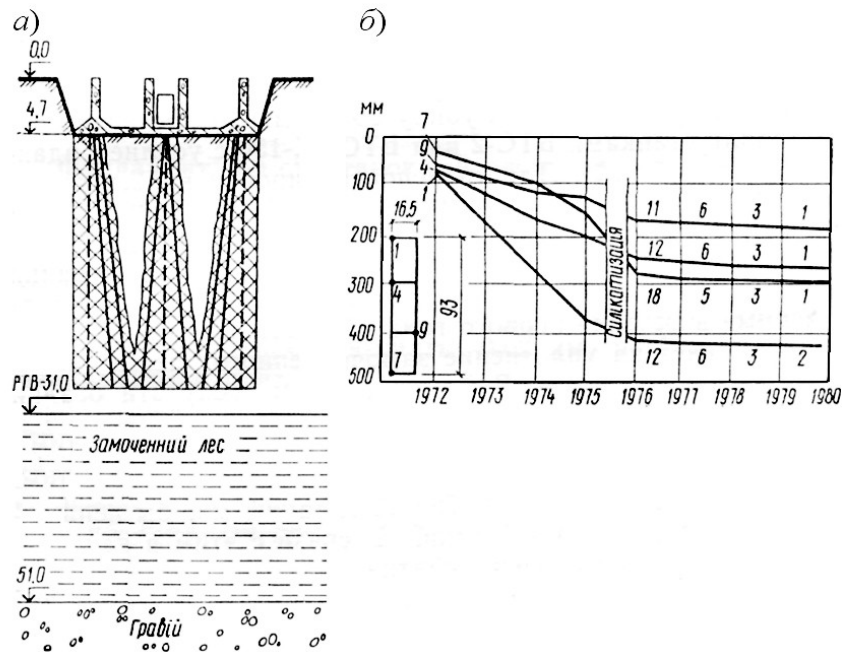


Рис. 3.6. Улаштування фундаменту із закріпленого лесу під існуючою будівлею в Ташкенті

Намічений до будівництва чотириповерховий корпус Б розміром у плані  $72 \times 13$  м також міг піддатися нерівномірним осіданням. У зв'язку з цим як передбудівельний захід було рекомендовано улаштування за згаданою схемою стрічкового фундаменту шириною 1,5 м із силікатованого ґрунту на всю глибину просадної товщі. Осідання корпусу Б, зведеного на стрічковому фундаменті, було рівномірним і складало  $2 \div 3$  мм. Обтискання замоченого лесу відбулося, мабуть, у період будівництва будівлі. У наступні роки, не дивлячись на замочування просадної товщі, осідання залишалися рівномірними і складали 1 мм за рік. Про несучу здатність замоченого лесу, що залягає, як правило, нижче просадної товщі, в літературі немає жодних даних, окрім деяких думок про те, що він практично не

може нести яке-небудь істотне навантаження. Проте проведений на цьому об'єкті великий обсяг робіт із зондування замоченого лесу, покрівля якого залягає на глибині 30 м, у 27 точках показав, що модуль деформації замоченого лесу, що знаходиться нижче за 30-метрову просадну товщу, дорівнює 9,4 МПа. Одержаний ефект від прорізання просадної товщі у 25 м, нижче за яку залягає товща замоченого лесу в 20 м, наочно показує перевагу улаштування фундаментів із силікатованого лесу порівняно з буронабивними палями в умовах, коли фундаменти повинні спиратися на замочений лес.

**Фундаменти карусельного верстата у м. Волгодонську.** Фундамент під верстат у першому корпусі «Атоммашу» був виконаний у вигляді плити розміром в плані 10×10 м і товщиною 3 м, що обпиралася на палі. На початку його експлуатації (у 1980 р.) були помічені нерівномірні осідання. За умовами заводу-постачальника карусельного верстата нерівномірність осідань фундаментної плити під ним не повинна перевищувати 0,02 мм на 1 м, тобто вся фундаментна плита не повинна мати нерівномірне осідання більше 0,2 мм. Біля верстата було передбачене рихтування в межах 15 мм. Коли нерівномірні осідання перевищили половину рихтування, було дано розпорядження провести силікатизацію просадної товщі лесової основи (рис. 3.7).

Для закріплення просадного лесу вологістю 17÷20 % був застосований розчин силікату натрію з модулем 2,8 і густиною 1,3 г/см<sup>3</sup>, нагрітий для зниження в'язкості до 60 °С. На 1 м<sup>3</sup> ґрунту закачувалося 350 л розчину. По закінченні робіт було проведено буріння з відбором кернів закріплюваного ґрунту. Границя міцності при стиску закріпленого ґрунту коливалася від 0,5 до 1,2 МПа. Середньозважена величина склала 0,9 МПа. Після закінчення робіт із силікатизації осідання верстата припинилися. Аналогічні роботи були проведені під фундаментами ще трьох верстатів.

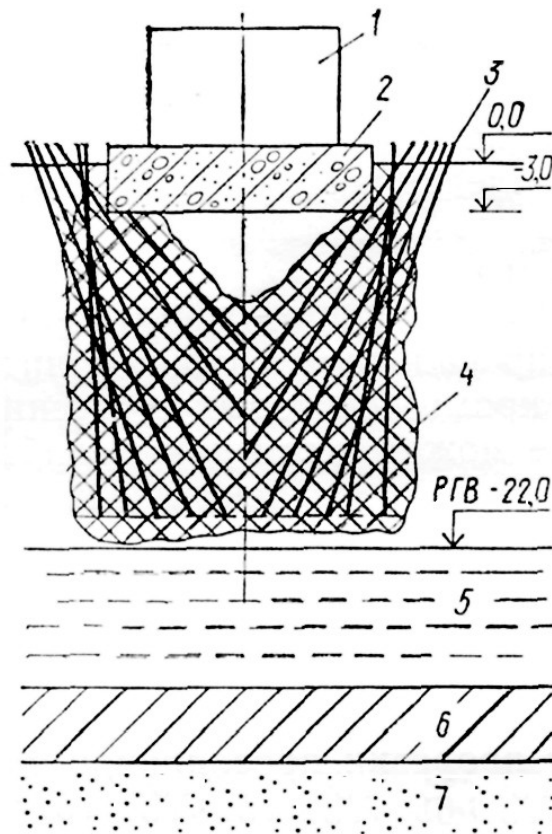


Рис. 3.7. Закріплення лесового ґрунту в основі верстата:  
 1 – верстат; 2 – фундаментна плита; 3 – ін'єкційні свердловини;  
 4 – закріплення; 5 – замочений лес; 6 – глина; 7 – пісок

**Фундамент 120-метрової залізобетонної димової труби.** При відновленні Дніпровського алюмінієвого заводу в 1949 р. було виконано силікатизацію лесу в основі фундаменту 120-метрової залізобетонної димової труби, що будувалась (рис. 3.8). Зважаючи на велику висоту труби і небезпеку виникнення її крену в разі осідання ґрунту навіть при найменшому випадковому замочуванні було ухвалене рішення про силікатизацію ґрунту під її фундаментом. Спосіб силікатизації була віддана перевага перед іншими способами зміцнення основи (наприклад, перед використанням залізобетонних і ґрунтових паль), оскільки він дозволяв отримати стійку основу, не перериваючи робіт з будівництва труби, що значно прискорювало пуск підприємства.



зовнішньому кільці відстань між рядами і в ряду складало 0,6 м, у середній частині – відповідно 0,8 м. Вказаною схемою при радіусі ін'єктування 0,35 м передбачалося суцільне закріплення ґрунту зовнішнього кільця і неповне в середній частині основи. Було передбачено 650 точок ін'єктування і проведено ін'єктування на загальній довжині 3315 м. Загальний об'єм закріпленого ґрунту склав приблизно 1500 м<sup>3</sup>. Об'єм витраченого розчину силікату натрію густиною 1,13 г/см<sup>3</sup> склав 450 м<sup>3</sup>.

Роботи із закріплення ґрунту проводили в такому порядку. Ґрунт закріплювали західками завдовжки 1,5 м зверху вниз у три прийоми. Для цього куц ін'єкторів (5÷7 шт.) забивали в першу західку і через нього нагнітали силікатний розчин. Після нагнітання певного об'єму розчину ін'єктори подовжували шляхом нагвинчування глухого відрізка труби завдовжки 1,5 м і забивали їх у другу західку, в яку також нагнітали розчин. У цей час через другий (сусідній) куц забитих у ґрунт ін'єкторів нагнітали розчин в першу західку. У міру просування фронту робіт і після закінчення нагнітання розчину в третю західку першого куца ін'єктори витягували і тампонували отвори, що утворилися, цементно-піщаним розчином. При такому порядку робіт досягалося рівномірне нагнітання силікатного розчину в ґрунт без проникнення його в сусідні свердловини. Усього було використано 33 комплекти ін'єкторів завдовжки по 7,5 м кожен. Швидкість забивання ін'єкторів складала близько 12 м/год. Силікатний розчин нагнітали ручним насосом (гідропресом) при тиску 0,1÷0,2 МПа. Розчин на майданчик надходив самопливом трубами.

Роботи тривали 3 тижні і велися у дві зміни. При цьому продуктивність кожної зміни складала сім-вісім ін'єкційних свердловин. У першу чергу проводили роботи на ділянках, де повинен був зводитися стакан залізобетонної труби, з таким розрахунком, щоб не уривалися інші роботи, що прискорювало будівництво. Силікатизація була виконана протягом 2,5 міс.

**Монумент на вул. Белгородський спуск у м. Харкові.** Монумент будувався у 2007 р. на приватній ділянці на пересіченні Белгородського спуску та пров. Синельникова. Монумент є бронзовою скульптурою висотою 4 м на гранітному постаменті висотою 6 м (рис. 3.9).

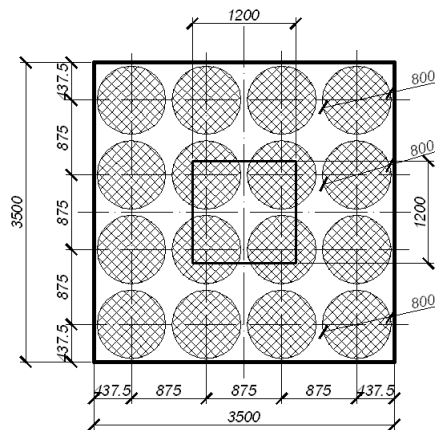
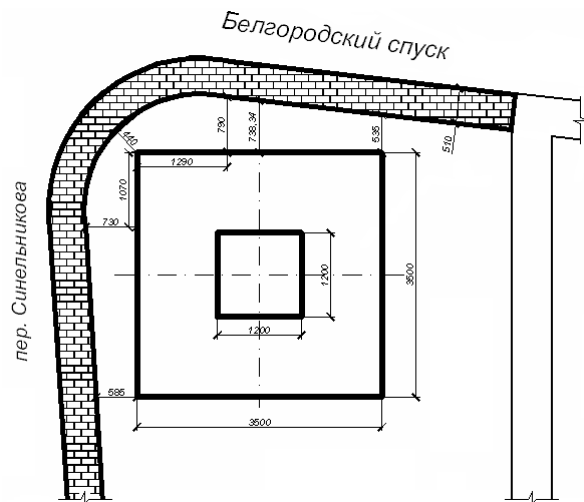


Рис. 3.9. Схема закріплення ґрунту під фундаментом монумента на вул. Белгородський спуск:

- 1 - корінний ґрунт із залишками цегляних фундаментів; 2 - насипний ґрунт (пісок); 3 - пісок, закріплений силікатизацією; 4 - щебенева підготовка, закріплена цементацією; 5 - мікропалі; 6 - ростверк; 7 - підпірна стіна

Основою монумента служить шар штучного ґрунту із слабоущільненого піску Безлюдівського родовища (дуже дрібного,  $M_{кр} \approx 1$ ) товщиною від 3 до 5,5 м, з трьох боків обмежений залізобетонними підпірними стінами: з боку Белгородського спуску - висотою близько 2 м, з боку пер. Синельникова - близько 1 м, з протилежного боку - близько 3 м (стіна підземного гаража). Під шаром піску розташовані залишки старого цегляного фундаменту на основі із суглинистих ґрунтів, поверх шару піску - щебенева подушка товщиною 100 мм і залізобетонна плита

товщиною 300 мм. Плита лежить на піщаній основі без спирання на підпірні стіни.

Монумент зводився на схилі, що має ознаки деформацій (нахил дерев на протилежному боці Белгородського спуску, тріщини в стінах будівель нижче по Белгородському спуску), що вимагало прийняття заходів щодо забезпечення міцності і стійкості основи і конструкції монумента. Розрахунки основи і конструкції монумента відповідно з ескізним проектом і діючими СНиП 2.01.07, СНиП 2.02.01, СНиП 2.03.01 показали, що несуча здатність основи не забезпечена, опір скульптури перекиданню від вітрових навантажень не забезпечений.

Як заходи щодо забезпечення міцності і стійкості основи і конструкції передбачено таке:

- закріплення ґрунту основи в поєднанні з улаштуванням 16 мікропаль;

- улаштування розвиненої фундаментної плити - ростверку шириною 3,5 м з бетону класу за міцністю на стиск В35, марки за морозостійкістю F200;

- улаштування по осі колони армуючого елемента (напрямної осі) з 3-х стержнів  $\varnothing 22\text{AIII}$  і кріплення скульптури до неї різьбовим з'єднанням;

- склеювання блоків колони між собою епоксидною композицією, що забезпечує міцність клейового з'єднання на розрив не менше 1 МПа і стійкою в атмосферних умовах.

Був виконаний розрахунок напружено-деформованого стану такої конструкції закріплення основи методом кінцевих елементів (рис. 3.10).

Аналіз напружено-деформованого стану показав таке:

- несуча здатність пального фундаменту з укріпленням силікатизацією ґрунтом забезпечена, максимальні напруги у вістря палі не перевищують 0,02 МПа при допустимому значенні 1,5 МПа;

- стійкість ґрунтового масиву забезпечена, максимальні напруги в насипному ґрунті не перевищують 0,025 МПа при допустимому значенні 0,1 МПа;

- нерівномірне осідання ґрунтової основи (максимальне значення 4,65 мм) може призвести до виникнення крену верху споруди не більше 3,5 мм, що не вплине на його стійкість та естетичні якості.



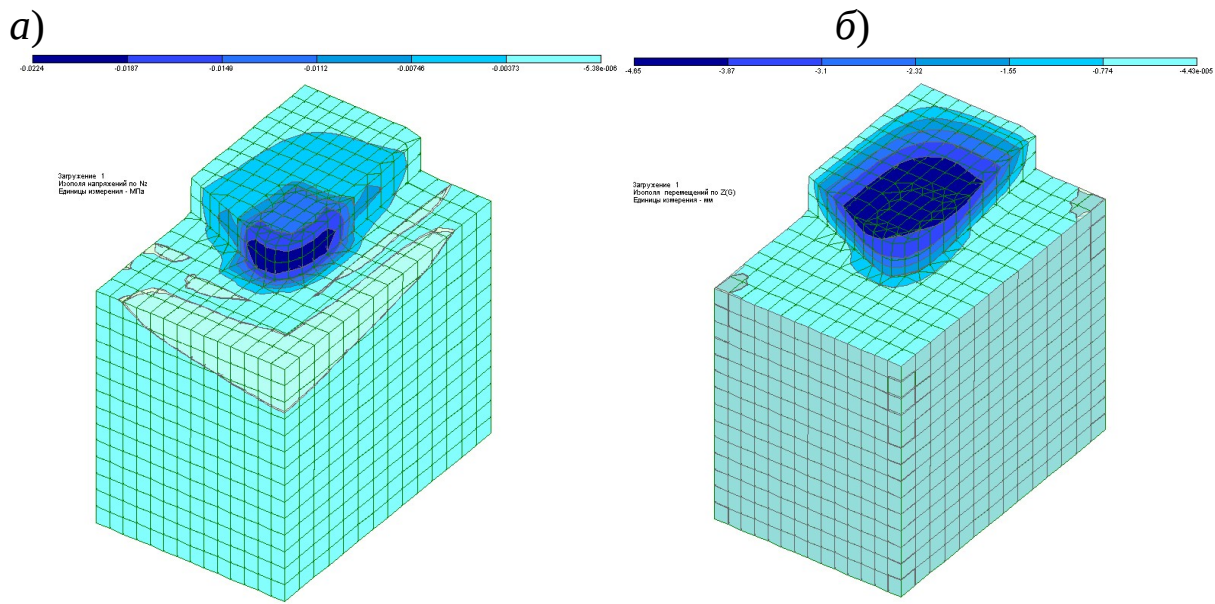


Рис. 3.10. Ізополя напружень (а) і переміщень (б) у ґрунтовому масиві

При розробленні рецептури закріплюючого складу досліджували її вплив, а також умови і режими нагнітання на проникну здатність і радіус закріплення, міцність і корозійну активність закріпленого ґрунту. У результаті досліджень встановлено:

а) затвердіння рідкого скла (РС) з прийнятними термінами тужавіння досягається розчином кремнефтористоводневої кислоти (КФК) в кількості  $\text{КФК} / \text{РС} = 0,12$ ;

б) уповільнення тужавіння може досягатися зниженням силікатного модуля рідкого скла шляхом введення в нього гідроксиду натрію або калію, однак при цьому може бути втрачена здатність до затвердіння;

в) уведення в силікатний розчин суперпластифікатора С-3 призводить до різкого збільшення його проникнення в пісок - від 120 мм до  $700 \div 750$  мм;

г) попереднє водонасичення піску шляхом нагнітання в нього води призводить до збільшення радіуса закріплення.

Для закріплення піску основи двокомпонентною силікатизацією застосували склад модифікованого силікатного розчину:

- натрієве рідке скло щільністю  $1250 \text{ кг/м}^3$ ;
- добавка суперпластифікатора С-3 - 7,8 % маси рідкого скла;
- розчин кремнефтористоводневої кислоти щільністю  $1080 \text{ кг/м}^3$ , КФК/РС = 0,12.

При приготуванні розчину спочатку готували водний розчин натрієвого рідкого скла щільністю  $1250 \text{ кг/м}^3$  з додаванням С-3 7,8 % за масою від кількості нерозведеного рідкого скла і водний розчин кремнефтористоводневої кислоти щільністю  $1080 \text{ кг/м}^3$ , які змішували безпосередньо перед нагнітанням в об'ємному співвідношенні 1:0,12. Приготування розчинів здійснювали в ємності об'ємом 50 л за допомогою електродріля з лопатевою насадкою (рис. 3.11, а). Такий силікатний розчин характеризується часом гелеутворення  $20 \div 30$  хв, а закріплений ним піщаний ґрунт - міцністю на стиск 0,6 МПа і рН = 12, тобто не має корозійної активності відносно сталі.

Закріплення щебеневої подушки виконали шляхом її цементації суперпластифікованим цементно-водним складом СПЦВС із портландцементу ПЦ І-500, води при водоцементному відношенні В / Ц =  $0,32 \div 0,35$ , добавки суперпластифікатора С-3 в кількості 0,3 % маси цементу.

Ін'єктори для силікатизації виготовляли з труб ВГП Ду 20 мм (рис. 3.11, б). Ін'єктор складається з робочої ланки довжиною 1 м з перфорацією  $\varnothing 3$  мм, забезпеченої загостреним наконечником, і колони глухих ланок довжиною 1 м кожна. З'єднання ланок - за допомогою різьбових муфт. На верхню ланку при забиванні встановлювали наголовник, забивання проводили молотом масою 15 кг вручну. Ін'єкторами для цементації були штуцери з труб ВГП Ду 20 мм довжиною 400 мм з різьбою з одного боку для приєднання розчинопровода. Нагнітання розчинів проводили за допомогою ручного поршневого насоса (рис. 3.11, в).

а)

б)



в)



г)



Рис. 3.11. Виробництво робіт із силікатизації ґрунту:  
 а - приготування гелеутворюючого розчину; б - ін'єктори, приготовані для нагнітання силікатного розчину; в - нагнітання силікатного розчину за допомогою ручного поршневого насоса (роботи проводяться в холодну пору в «тепляку»); г - оцінка радіуса закріплення за допомогою електричних вимірювань (змінення електричного опору ґрунту між суміжними ін'єкторами)

Роботи проводили в такій послідовності. В існуючій залізобетонній плиті свердлили отвори  $\varnothing 57$  мм. Робочу ланку ін'єктора через отвір забивали в ґрунт на всю довжину, приєднували до неї глуху ланку і добивали на товщину плити. Зазор між ін'єктором і стінками отвору герметизували цементним розчином з добавкою - прискорювачем твердіння.

Після тужавіння розчину до ін'єктора приєднували розчинопровід і виконували нагнітання силікатного розчину в кількості не менше 120 л (або до відмови). Розчинопровід від'єднували, встановлювали наступну ланку і забивали ін'єктор на довжину ланки - 1 м. До ін'єктора приєднували розчинопровід і проводили нагнітання силікатного розчину в кількості не менше 120 л (або до відмови). Нагнітання силікатного розчину продовжували таким чином західками по 1 м. Занурення ін'єктора здійснювали до відмови. Після завершення нагнітання силікатного розчину ін'єктор обпресовували СПЦВС і залишали в ґрунті як мікропаль. Після завершення силікатизації в плиті просвердлили отвір  $\varnothing 57$  мм для прямої осі, встановили стержні осі, добивши їх у щебінь і ґрунт, і залили зазор СПЦВС.

Між ін'єкторами для силікатизації в плиті свердлили отвори  $\varnothing 57$  мм, встановлювали в них ін'єктори для цементації і герметизували цементним розчином з добавкою прискорювача твердіння. Після тужавіння розчину до ін'єктора приєднували розчинопровід і проводили нагнітання СПЦВС до відмови. Після завершення робіт із закріплення ґрунту виготовляли арматурний каркас ростверку, зварюючи його стержні з виступаючими оголовками мікропаль, встановлювали опалубку і бетонували ростверк. Колону монтували з блоків на прямій осі.

Для регулювання положення нижнього блока в кутах його нижньої грані просвердлили отвори, в які вклеїли гайки з регулювальними гвинтами, а до верхньої грані ростверку врівень з її поверхнею приклеїли сталеві опорні плити (рис. 3.12, а). Нижній блок колони встановили на ростверк на цементно-піщаний розчин складу 1:1 за об'ємом,  $V / Ц = 0,32$ , з добавкою-суперпластифікатором С-3 в кількості 0,3 % за масою від витрати цементу. Положення блока регулювали за допомогою регулювальних гвинтів.



Через 2 доби змонтували наступний блок колони (рис. 3.12, б). Блоки склеювали між собою епоксидною композицією складу: смола епоксидно-діанова ЕД-20 - 100 масових частин, високоактивний отверджувач УП-583Д - 25 масових частин. Склеювані поверхні ретельно знепилювали і знежирювали, клей наносили на обидві поверхні. Блоки монтували трьома західками, відповідними довжині заготовленої частини напрямної осі. Після монтажу першої західки зазор між віссю і стінками отвору залили СПЦВС, доварили другу частину напрямної осі і змонтували другу західку блоків колони, залишаючи зазор незаповненим. Аналогічно зібрали третю західку колони, приваривши до осі перед монтажем її останніх блоків деталь кріплення скульптури (рис. 3.12, в). Після монтажу всіх блоків колони зазор між стінками отворів у них і віссю залили СПЦВС і до її тужавіння за допомогою упорної шайби, гайки і динамометричного ключа здійснили натяг осі зусиллям до 50 кН.

У верхній грані постаменту скульптури просвердлили осьовий отвір для її кріплення і два отвори для заливання порожнини постаменту СПЦВС. Після встановлення скульптури зазор між нижньою кромкою постаменту і верхньою гранню колони герметизували герметиком, після тужавіння якого порожнину постаменту залили СПЦВС. Через 2 доби після заливки СПЦВС гайку кріплення затягнули. Сталеві і бронзові деталі розділили ізолюючою текстолітовою шайбою. Деталі кріплення пофарбували двома шарами антикорозійного складу на основі епоксидної смоли (рис. 3.12, г).

У процесі експлуатації слід повністю виключити замочування закріпленого масиву ґрунту водами будь-якого походження - атмосферними опадами і т. ін., для чого поверхня над масивом повинна бути ретельно спланована і захищена від фільтрації. Поблизу закріпленого масиву не допускається влаштування штучних водойм, квітників без ретельно ізольованих днища і стінок. З урахуванням того, що монумент зведений на схилі, який має ознаки деформацій (нахил дерев на протилежному боці Белгородського спуску, тріщини в стінах будівель нижче по Белгородському спуску), у процесі експлуатації необхідно ретельно стежити за стійкістю споруди.

а)

б)



в)



г)



Рис. 3.12. Монтаж монумента



Для цього перші 3 роки експлуатації один раз на квартал, наступні роки - два рази на рік (навесні й восени) слід контролювати вертикальність колони і оглядати підпірні стіни з боку Белгородського спуску та пров. Синельникова. При виявленні тріщин у підпірних стінах на них слід встановити маяки. У разі виникнення крену колони або появи і розвитку тріщин у підпірних стінах слід провести детальне обстеження з метою встановлення необхідності призначення додаткового підсилення основ і конструкцій монумента.

**Прибудова до корпусу № 1 УкрДАЗТу.** У 2010 р. у дослідному порядку було виконано однорозчинну силікатизацію ґрунту основи прибудови лабораторії будівельних матеріалів до корпусу № 1 УкрДАЗТу модифікованим силікатним розчином.

Пошкодження – тріщини в стінах і тріщини відриву від основної будівлі внаслідок нерівномірного осідання (рис. 3.13). Осідання і розкриття тріщин не припинялись. Причина – різна глибина закладання підшови фундаменту під прибудовою, наявність під неглибокою частиною глинистого ґрунту, схильного до набухання, і слабого насипного ґрунту.

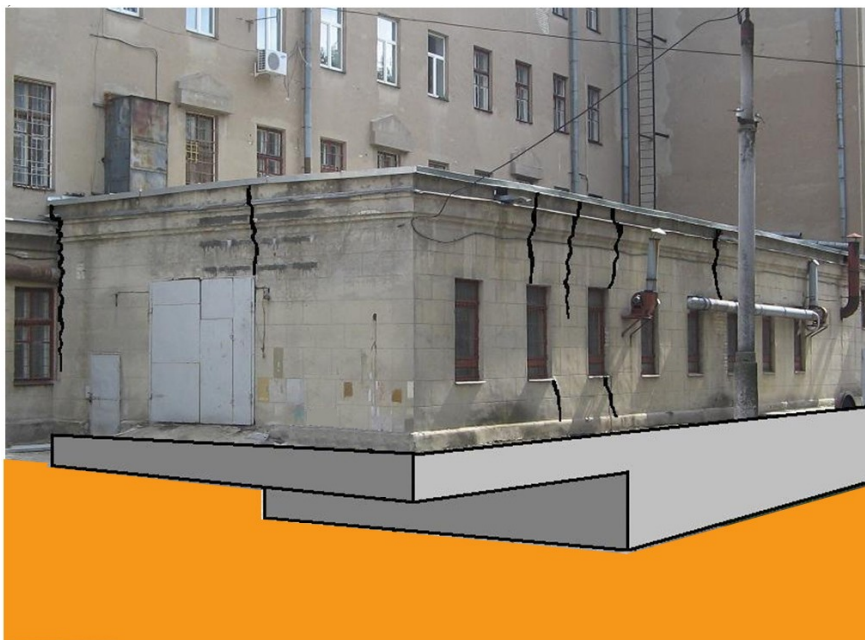
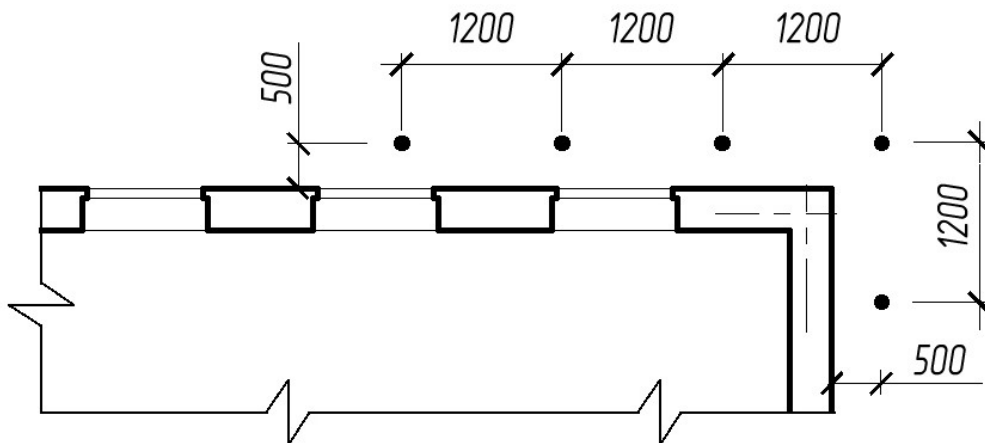


Рис. 3.13 Одноповерхова прибудова до чотириповірхової будівлі.  
Тріщини в стінах

Для запобігання подальшого осідання і розкриття тріщин застосовано однорозчинну силікатизацію шляхом нагнітання крізь похилі ін'єктори під подошву фундаменту (рис. 3.14) силікатного розчину, модифікованого оптимальною кількістю добавки-суперпластифікатора нафталінформальдегідного типу.

а)



б)



Рис. 3.14. Нагнітання під подошву фундаменту крізь похилі ін'єктори силікатного розчину:  
а – розташування ін'єкторів у плані; б – кут нахилу ін'єкторів забезпечує закріплення ґрунту під подошвою фундаменту



Розчин для силікатизації виготовляли із натрієвого рідкого скла (ГОСТ 13078), кремнефтористоводневої кислоти  $H_2SiF_6$  (ГОСТ 6552), добавки суперпластифікатора С-3 (ТУ 6-36-0204229-625, або СП-1) і води (ГОСТ 2874-82). При цьому спочатку готували водні розчини натрієвого рідкого скла густиною  $1250 \text{ кг/м}^3$  (співвідношення рідке скло : вода – 2:0,93 за масою) і кремнефтористоводневої кислоти густиною  $1080 \text{ кг/м}^3$  (співвідношення кремнефтористоводнева кислота : вода – 1:3 за масою).

Розчини готували в ємності обсягом 30 л за допомогою електродріля з насадкою для змішування (рис. 3.15) у такій послідовності:

- до водного розчину рідкого скла додавали суперпластифікатор С-3 у кількості 7,8 % за масою від кількості нерозведеного рідкого скла і перемішували;

- безпосередньо перед нагнітанням змішували водні розчини кремнефтористоводневої кислоти і рідкого скла в об'ємному співвідношенні кислота: рідке скло 1:10 (1:12). Час гелеутворення розчину складає  $20 \div 50$  хв залежно від навколишньої температури. Витрата матеріалів на приготування однієї порції для ін'єктування наведена у табл. 3.1.



Рис. 3.15. Приготування модифікованого силікатного розчину

Таблиця 3.1

Витрата матеріалів на приготування однієї порції для ін'єкування

Матеріали	Витрата, кг
на приготування водних розчинів:	
- натрієве рідке скло густиною 1400 кг/м <sup>3</sup>	20 кг + 9,3 кг води
- кремнефтористоводнева кислота 1400 кг/м <sup>3</sup>	1,1 кг + 3 кг води
на приготування гелеутворюючого розчину	
- водний розчин рідкого скла	29,3 кг
- суперпластифікатор С-3	1,4 кг
- водний розчин кремнефтористоводневої кислоти	2,8 кг

Ін'єктори для силікатизації виготовляють із труб ВГП Ду 20 мм. Ін'єктор складається з робочої ланки довжиною 1 м з перфорацією (діаметр отворів 3 мм), обладнаної загостреним наконечником (рис. 3.16, а), і колони глухих ланок довжиною по 1 м (рис. 3.16, б).

З'єднання ланок здійснювалося за допомогою різьбових муфт (рис. 3.16, в). На верхню ланку при забиванні встановлювали наголовник (рис. 3.16, г). Перед забиванням у вимощенні свердливали отвори Ø57 мм свердлильною установкою (рис. 3.17) за схемою, наведеною на рис. 3.14, а. Забивання ін'єкторів проводили молотом масою 15 кг вручну (рис. 3.18).

а)



б)



в)



г)



Рис. 3.16. Перфоровані ін'єктори:



а – наконечник; б – ланки зі з'єднувальними муфтами; в – різьбова з'єднувальна муфта; г – наголовник



Рис. 3.17. Свердління отворів у вимощенні



Рис. 3.18 Занурення ін'єктора для нагнітання силікатного розчину

Нагнітання проводили ручним поршневым насосом (рис. 3.19). Робочу ланку ін'єктора через отвір у вимощенні забивали в ґрунт на всю довжину, приєднували до нього по чергово глухі ланки й добивали на необхідну глибину нижче підшови фундаменту (рис. 3.14, б). Зазор між ін'єктором і стінками отвору герметизували цементним розчином з добавкою прискорювача твердіння.



Рис. 3.19. Нагнітання силікатного розчину ручним поршневым насосом

Після тужавіння розчину до ін'єктора приєднували розчинопровід і проводили нагнітання силікатного розчину в кількості не менше 120 л (або до відмови). Потім розчинопровід від'єднували, піднімали ін'єктор на довжину наступної ланки – 1 м. До ін'єктора приєднували розчинопровід і проводили нагнітання силікатного розчину в кількості не менше 120 л (або до відмови). Нагнітання силікатного розчину продовжували в такий спосіб західками по 1 м. Після завершення нагнітання силікатного розчину ін'єктори обпресовували суперпластифікованою цементно-водною суспензією СПЦВС і видаляли із ґрунту. Отвір, що залишився, заливали СПЦВС.

Середня витрата на 1 західку складала 64 л рідкого натрієвого скла, 3,7 л кремнефтористоводневої кислоти, 5,6 кг суперпластифікатора.

**Фундаменти мостових опор.** Весняним паводком були підмиті опори моста, що призвело до їх осідання. У результаті цього виникли тріщини в залізобетонних балках. У порядку реконструкції моста вирішили прибрати дві проміжні опори і залишити лише берегові стояни, на які і поставити однопрогонові металеві ферми. Одночасно з цим вирішили провести силікатизацію ґрунту в основі стоянів і забити металевий шпунт. Роботи з силікатизації повинні були бути виконані до проходження паводка, тобто протягом 1,5 міс. Для з'ясування геологічних умов стоянів на обох берегах було пробурено по дві свердловини. Лівий берег характеризувався таким нашаруванням ґрунтів: суглинок потужністю 0,8–1,05 м, потім супісок з домішкою гальки і гравію з гніздами різнозернистого піску і нижче щільна глина з включеннями аргіліту і гальки. Правий берег у геологічному відношенні аналогічний лівому. Таким чином, закріпленню підлягав водоносний галечний шар загальною потужністю близько 5 м (рис. 3.20).

Для визначення дійсних швидкостей ґрунтового потоку в галечному шарі були використано шість свердловин, причому флуоресцеїн завантажувався в дві свердловини, а іншими велися спостереження. Швидкість ґрунтового потоку вдалося визначити тільки у двох свердловинах, де вона дорівнювала 5 м/доб.

Коефіцієнт фільтрації, визначений дослідним шляхом, дорівнював  $200 \text{ м}^3/\text{доб}$ . Таким чином, у даному випадку був закріплений ґрунт, що виходить далеко за межі застосування способу дворозчинної силікатизації. Загальний об'єм закріплення склав  $487 \text{ м}^3$ . При закріпленні була прийнята така норма витрат розчинів:  $230 \div 250 \text{ л}$  силікату натрію і  $275 \div 300 \text{ л}$  хлористого кальцію на  $1 \text{ м}^3$  ґрунту.

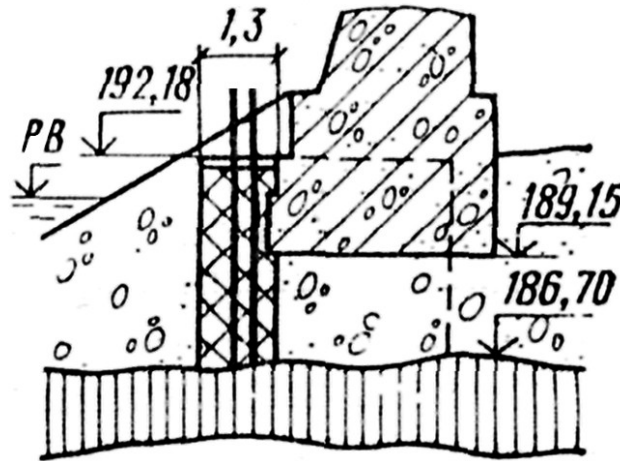


Рис. 3.20. Зміцнення основ стоянів моста

У процесі роботи було встановлено, що радіус розповсюдження розчинів перевищує проектний ( $0,6 \div 0,7 \text{ м}$  при відстані між ін'єкторами  $1,1 \div 1,2 \text{ м}$ ), тому частина ін'єкторів не була забита. Для перевірки якості закріплення забивали контрольні ін'єктори і розкривали шурфи глибиною до  $2 \text{ м}$ . Розкриття шурфів у закріпленому ґрунті було ускладнено і вимагало застосування відбійних молотків. Границя міцності при стиску закріпленого ґрунту склала  $5 \div 6 \text{ МПа}$ . Остаточне здавання робіт було проведено після проходження паводка. Не дивлячись на те, що паводок був максимальним за останні  $25$  років, опори не були пошкоджені. Усі роботи з силікатизації ґрунту були проведені за  $27$  днів (з  $25$  лютого по  $23$  березня).

### **Електросилікатизація та електрохімічне осушення**

**Фундаменти будівлі на вул. Симанській у м. Санкт-Петербурзі.** Житлову будівлю на вул. Симанській, що мала

висоту в три поверхи, надбудовували ще трьома поверхами. При цьому було потрібне розширення фундаментів. Вибір способу їх розширення визначався ґрунтами в основі будівлі. Вони були представлені пісками і пілуватими супісками з коефіцієнтом фільтрації  $0,03 \div 0,06$  м/доб, що залягали нижче рівня ґрунтових вод. Запропонований спосіб електросилікатизації з використанням розчину силікату натрію густиною  $1,16$  г/см<sup>3</sup> і розчину хлористого кальцію густиною  $1,07$  г/см<sup>3</sup> при градієнті потенціалу постійного електричного струму  $0,7$  В/см був застосований для розширення фундаментів і підвищення несучої здатності ґрунтів основи. У результаті проведених робіт міцність ґрунтів підвищилася до  $0,35$  МПа і практично припинилася фільтрація через них.

**Ліквідація обдимання ділянки залізничного насипу.** Нерівномірне обдимання ґрунту на одній з ділянок колії на ст. Дубці щорічно досягало  $70$  мм. Довжина обдимального горба складала  $4$  м. Обдимання відбувалося через наявність у верхній частині насипу вологих важких суглинків і глин. Становище погіршувалося ще і тим, що в цьому місці в насипу спостерігався різкий перехід від глини до супіску і піску. Поряд з насипом накопичувалася вода.

Схема розміщення електродів була дворядною смугою. Загальна довжина ділянки склала  $12$  м. У середині залізничної колії на відстані  $35$  см від рейок забивали два ряди електродів-анодів. Із зовнішнього боку (на брівці і міжколійї) на відстані  $120$  см від анодних рядів занурювали катодні електроди. Відстань між електродами склала  $70 \div 80$  см. Електроди забивали на глибину  $2,5$  м, яка визначалася зоною промерзання ( $1,8$  м). Як електроліт використовували  $20$  %-ий розчин хлористого кальцію. Електроліт заливали в електроди тільки у перші дві третини часу електрообробки. В останню третину часу електрообробку вели без електроліту. За цей час ґрунт підсушувався. Градієнт потенціалу під час електрообробки підтримували в межах  $0,7 \div 1,0$  В/см, густина струму при цьому коливалася в межах  $3,5 \div 4,5$  А/м<sup>2</sup>. Загальний об'єм робіт склав  $60$  м<sup>3</sup>. Спостереження за станом ділянки, яке проводилося протягом зим  $1965 \div 1967$  рр., показало, що в результаті електрохімічної обробки досягнута повна ліквідація обдимального горба.

**Зміцнення укосів каналів і основи фундаментів способом електролітичної корозії.** У 1971 р. були проведені роботи з осушення-закріплення укосів каналів меліоративної системи радгоспу «Родоманово». Укоси каналу закладанням 1:1 складені покривними суглинками густиною  $1,92 \text{ г/м}^3$  і вологістю 29 %. Закріплення ґрунтів проводили способом електролітичної корозії залізних електродів діаметром 0,16 см, забитих у ґрунт на відстані 50 см один від одного. Поряд з анодом пробурювали свердловини діаметром 60 см на глибину 50 см. Для інтенсифікації процесу корозії електродів в анодну зону заливали розчин хлористого кальцію густиною  $1,2 \text{ г/см}^3$  і пропускали постійний електричний струм з градієнтом потенціалу  $0,6 \div 1 \text{ В/см}$ . Випробуваннями встановлено, що міцність закріпленого ґрунту склала  $0,2 \div 0,25 \text{ МПа}$ . Усього закріплено  $126 \text{ м}^3$  ґрунту.

Спосіб електролітичної корозії був закладений і в проект закріплення ґрунту під фундаментами закритого складу металу Анжеро-Судженського машинобудівного заводу. Усього підлягало закріпленню  $152 \text{ м}^3$  ґрунту. Як основа запроектованих фундаментів був прийнятий армований ґрунт. На глибину товщі, що стискається, з дна котлована в ґрунт вдавлювали обрізки арматури, кутків і труб. На поверхні котлована залишали  $0,3 \div 0,4 \text{ м}$  цих стержнів для жорсткого закладення їх у тіло фундаменту. При улаштуванні армованої основи через ґрунт пропускали постійний електричний струм з градієнтом потенціалу  $0,5 \text{ В/см}$  протягом  $36 \div 48$  год. У міру завантаження фундаменту до проектного навантаження вели спостереження за осіданнями.

## **Смолизація**

**Фундаменти будівлі Московської консерваторії.** Внаслідок нерівномірних осідань фундаментів і утворення тріщин у стінах і склепіннях будівлі Московської консерваторії було ухвалене рішення про застосування хімічного закріплення ґрунтів в основі цієї унікальної будівлі. Основа під фундаментами будівлі складена маловологими давньоалювіальними пісками різної крупності, переважно дрібними, з пористістю  $35 \div 44 \%$  і коефіцієнтом фільтрації  $0,4 \div 18 \text{ м/доб}$ . Будівля консерваторії

цегляна чотириповерхова, фундаменти під стінами стрічкові, під колонами стовпчасті, бутові, частково цегляні, за шириною і глибиною різні (рис. 3.21).

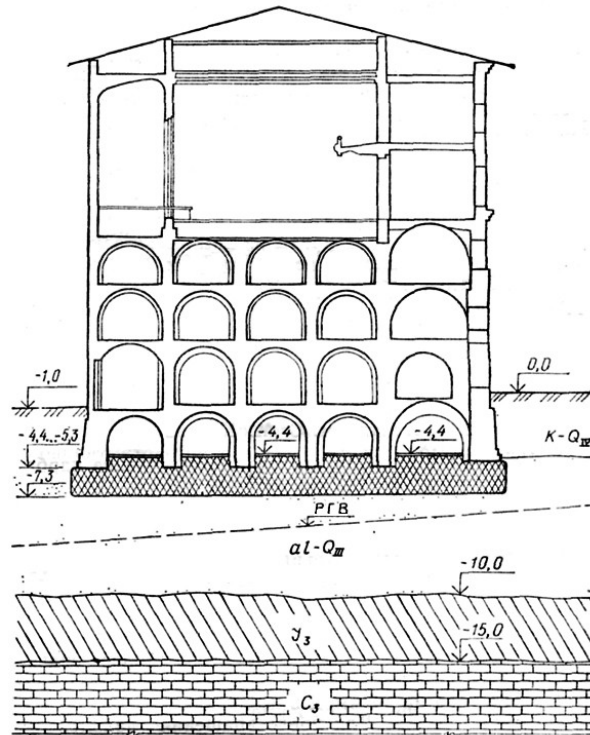


Рис. 3.21. «Підведення» розширеного фундаменту з хімічно закріпленого ґрунту основи

Будівля консерваторії з часу її зведення (більше 80 років) постійно відчуває повільні деформації з утворенням тріщин осідання від волосяних до значних з розкриттям 40 ÷ 70 мм. У результаті всебічного аналізу наявних даних про деформації будівлі було встановлено, що основною причиною нерівномірних осідань фундаментів є нерівномірне завантаження піщаної основи з локальними перевантаженнями до 1,0 МПа при допустимих навантаженнях 0,35 МПа. Отже, для усунення деформацій потрібне вирівнювання завантаження основи і доведення його до розрахункового. Для цього було запропоновано застосувати «підведення» розширеного фундаменту з хімічно закріпленого ґрунту основи. Таке закріплення було здійснено у вигляді суцільної плити певних



геометричних розмірів. Згідно з діючими нормами для хімічного закріплення ґрунтів був застосований спосіб однорозчинної смолизації на основі водних розчинів карбамідної смоли марки КМ-2 густиною  $1,1 \text{ г/см}^3$  і 4 %-го розчину щавлевої кислоти (отверджувача) з попередньою обробкою ґрунту кислотою. Щоб уникнути виходу закріплюючих розчинів на поверхню в місцях з незадовільною фундаментною кладкою і на контактах існуючих фундаментів з основою була проведена цементация. Для запобігання випадковим деформаціям ін'єктування супроводжували спостереженнями за програмою з прискореними вимірами. При ін'єктуванні використовували ін'єктори двох видів: забивні і манжетні. Перші застосовували при роботах усередині будівлі, а другі – зовні з використанням великогабаритного обладнання німецької фірми «К. Бауер».

При проектуванні і виробництві робіт були прийняті такі параметри закріплення: радіус закріплення 0,7 м, пористість ґрунту 39,2 %, коефіцієнт фільтрації 5,3 м/доб, довжина перфорованої частини забивного ін'єктора 0,7 м, манжетного – 0,33 м. Витрата розчину складала  $5 \div 10 \text{ л/хв}$ , ін'єктування велося західками зверху вниз. Якість закріплення ґрунту контролювалася розкриттям шурфів і бурінням свердловин, а також спостереженням за осіданнями фундаментів. Об'єм фундаментної плити з хімічно закріпленого ґрунту при товщині її в середньому 2 м склав  $5500 \text{ м}^3$ . Границя міцності при стиску закріпленого ґрунту досягала 9 МПа. Незагасальні осідання фундаментів, що спостерігалися до закріплення, дорівнювали 4 мм на рік, а після проведення закріплення тріщиноутворення практично повністю припинилося.

**Фундаменти будівлі Ленінградського театру опери і балету.** У 1958÷1960 рр. було проведене закріплення карбамідною смолою основи будівлі театру. Будівля розташована поблизу Крюковського каналу. Під фундаментами будівлі залягали дрібні слюдяні водонасичені піски. Сезонна зміна рівня води в каналі призводила до нерівномірних осідань окремих частин будівлі. Деформації будівлі виявили ще у 1895 р. У зв'язку з розширенням сценічної частини театру проводили затискування в ґрунт порожнистих паль діаметром 1 м, що призвело до ще значніших деформацій будівлі. Осідання будівлі збільшилося за 1,5 року на

80 мм, і в ній з'явилися тріщини розкриттям до 110 мм. Для запобігання подальшим осіданням провели закріплення ґрунту під фундаментами сценічної частини. Закріпленню підлягав пілуватий пісок з коефіцієнтом фільтрації  $0,5 \div 1,5$  м/доб і пористістю 43,8 %. Закріплення проводили карбамідною смолою густиною  $1,076 \div 1,08$  г/см<sup>3</sup>. Як отверджувач використовували соляну кислоту 3 %-ї концентрації.

Перед початком основних робіт провели дослід з уточнення радіуса закріплення і міцності закріпленого ґрунту. Виявилось, що границя міцності при стиску закріплених зразків склала  $1,8 \div 2,9$  МПа, що було цілком достатнім. Розчин нагнітали західками зверху вниз. Закріплення проводили з попередньою обробкою ґрунту розчином соляної кислоти 1  $\div$  3 %-ї концентрації в об'ємі 400 л на західку. Потім закачували 30  $\div$  50 л води, після чого гелеутворюючий розчин в об'ємі також 400 л. Для нагнітання застосовували плунжерні насоси ПСБ-4 і НС-3. Ін'єктори забивали в ґрунт за допомогою відбійних молотків, а видаляли після закріплення за допомогою домкратів. У процесі роботи і після закріплення ґрунту проводили спостереження за осіданням будівлі, які показали, що воно значно зменшилося. Перед початком робіт осідання сцени становило в середньому 1,72 мм за тиждень, а через рік – 0,09 мм за тиждень, тобто зменшилося майже в 20 разів.

**Фундаменти стіни Московського вокзалу в м. Санкт-Петербурзі.** У багатьох будівлях, побудованих понад 100 років тому, фундаменти укладені на лежні. Так, у Петербурзі при будівництві Московського вокзалу в 50-ті рр. минулого століття під фундаменти були покладені лежні діаметром 20  $\div$  25 см з метою перерозподілу навантаження на основу. Довгий час вони знаходилися нижче рівня ґрунтових вод і залишалися у цілості, але коли у зв'язку з улаштуванням тунелів метрополітену рівень ґрунтових вод знизився, вони опинилися в зоні змінної вологості і почали гнити. На стінах одного із залів вокзалу в результаті осідання, що почалося, з'явилися тріщини. Безпосередньо під фундаментом будівлі була відсипана піщана подушка завтовшки близько 1 м з піску середньої крупності з коефіцієнтом фільтрації 10  $\div$  15 м/доб; далі йшов насипний ґрунт, що складався з піску з домішкою шлаків, битої цегли і будівельного сміття (1  $\div$  2 м);

нижче – пилюваті піски з коефіцієнтом фільтрації  $0,2 \div 0,7$  м/доб ( $0,8 \div 2,0$  м) і їх підстилають шаруваті глини.

Для припинення деформацій будівлі була запропонована антисептична обробка лежнів розчином фтористого натрію з подальшою їх консервацією шляхом закріплення навколишнього піщаного ґрунту карбамідною смолою. Смолизацією досягалося також зміцнення основи в тих місцях, де лежні встигли зруйнуватися. Крім того, смола через наявність у ній вільного формальдегіду, у свою чергу, має антисептичні властивості, що також сприяє збереженню лежнів. Оскільки основною метою робіт було омонолічування дерев'яних лежнів, зона закріплення розповсюджувалася лише на глибину 1 м. Розчини нагнітали в ґрунт у дві західки за допомогою ін'єкторів, забитих з внутрішнього боку стіни під кутами  $45^\circ$  і  $60^\circ$  на відстані 0,8 м один від одного (рис. 3.22).

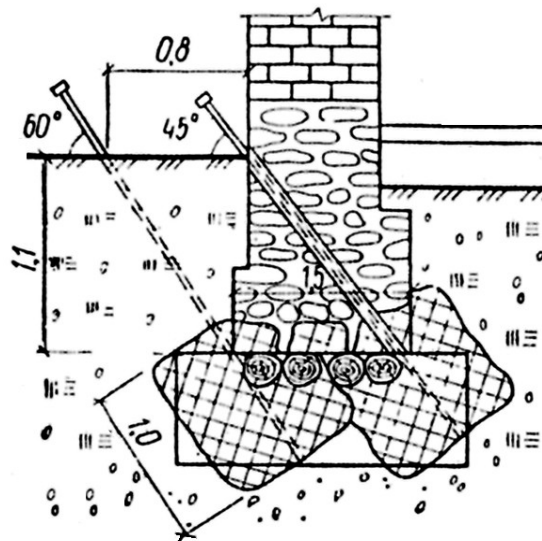


Рис. 3.22. Закріплення ґрунту під фундаментами стіни Московського вокзалу в м. Санкт-Петербурзі

Спочатку в зону розташування лежнів нагнітали 3 %-й розчин фтористого натрію. Через  $3 \div 4$  доби закачували соляну кислоту для попередньої обробки ґрунту, а потім закріплюючий розчин – суміш карбамідної смоли і соляної кислоти. Для виконання ін'єкційних робіт була застосована нова технологія: розчини компонентів (смоли і кислоти) змішували в ін'єкторі,

забезпеченому спеціальним наголовником з трійником; закріплюючий розчин нагнітали в ґрунт за допомогою пневмоустановки. Загальний об'єм робіт склав 630 м<sup>3</sup>. Огляд шурфів показав повне омонолічування лежнів. Тверда маса, що утворилася в результаті полімеризації карбамідної смоли, рівномірно заповнила всі пори ґрунту, а також всі розташовані поблизу порожнечі в нижній частині фундаменту.

Границя міцності при стиску закріпленого ґрунту склала 0,8÷1,5 МПа. Подальше регулярне спостереження показало повну відсутність осідання будівлі, деформація стін припинилася. Цими роботами відкрилася ще одна галузь хімічного закріплення – консервація дерев'яних конструкцій під спорудами.

**Фундаменти Успенського собору і церкви Ризопокладання у Московському Кремлі.** У минулому при будівництві багатьох будівель, особливо соборів, здійснювалося забивання в основу коротких дерев'яних паль довжиною близько 1 м. Це дозволяло ущільнити ґрунт на дні траншеї, яку потім заповнювали каменем і заливали вапняним розчином. При будівництві Успенського собору в Московському Кремлі в 1475÷1479 рр. на дрібних пісках без перегною під всі стіни забили дерев'яні палі завдовжки 0,5 сажени (1,0668 м). Прошло 500 років, палі згнили, і стіни отримали значні нерівномірні осідання.

Розмір будівлі в плані 17×16 м, несучими є зовнішні стіни і чотири колони, розташовані всередині будівлі. Фундаменти під стінами стрічкові, під колонами прямокутні. Глибина закладання фундаментів 3,3 м. Основою є різнозернисті (від пилюватих до гравелистих) неоднорідно складені давньоалювіальні піски. Ґрунтова вода (верховодка) залягає на глибині 10 м. Водопором є моренний суглинок. Причиною деформацій є виникнення порожнин і ущільнених зон в основі під подошвами фундаментів унаслідок гниття дерев'яних паль. З метою запобігання подальшому осіданню було здійснено хімічне закріплення ґрунтів у зоні розташування дерев'яних паль у комплексі з цементацією контакту фундаментів з основою.

При попередніх роботах із закріплення ґрунтів в основі Успенського собору і розташованої поряд церкви Ризопокладання виникли труднощі ін'єктування закріплюючих

розчинів, пов'язані з неможливістю вертикального або похилого забивання ін'єкторів і порівняно великою проникністю ґрунтів. У зв'язку з цим була розроблена схема горизонтального затискування ін'єкторів з манжетним пристроєм у ґрунт, в основу якої покладено принцип продавливання труб при прокладанні трубопроводів (рис. 3.23).

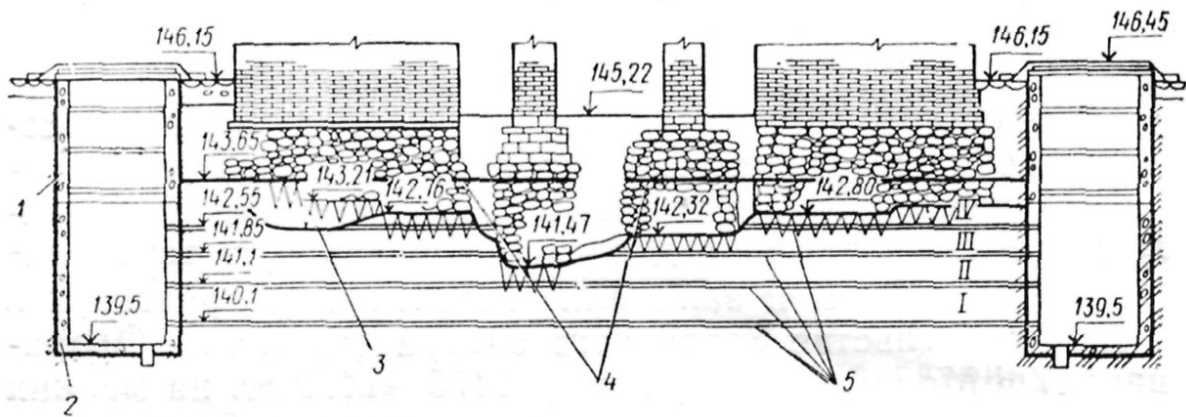


Рис. 3.23. Смолизація ґрунтів в основі церкви Ризопокладання:  
 1 – бетон; 2 – залізобетонний стакан; 3 – цементация культурного шару і  
 бутової кладки; 4 – цементацияні свердловини; 5 – ін'єкційні колони;  
 I-IV– яруси ін'єкторів

Робота за такою схемою зводилася до улаштування технологічного колодязя, в якому одну сторону кріпили цілком, а іншу (ближню до фундаменту) робили з несучільним кріпленням, через яке здійснювали затискування ін'єкторів. У стіни з суцільним кріпленням встановлювали вертикальну металеву плиту розміром 1,5×1,5 м і завтовшки 2÷3 см для упору затискувального механізму, який розміщували в колодязі. Механізм закріплювали на осі і один кінець його упирали в металеву плиту. Механізм міг вільно розвертатися під різним кутом до осі (в одній площині), завдяки чому можна було одержувати віялоподібне розташування ін'єкторів у ґрунті. Механізм встановлюється на будь-якій глибині, тим самим створюється масив закріпленого ґрунту потрібних розмірів. Ін'єктор для горизонтального затискування збирали із секцій завдовжки від 1 до 1,5 м. По довжині ін'єктора через кожні

33÷50 см було просвердлено по чотири отвори діаметром 6÷8 мм, що закриваються манжетами із еластичного матеріалу.

Цементацию, що передувала хімічному закріпленню, проводили безусадковим цементним розчином з добавкою бентонітової глини в кількості 6 %. Розчин мав щільність 1,65 г/см<sup>3</sup>, розплив конусу 22÷24 см. Міцність цементного каменя через 28 діб склала 12÷14 МПа. Усього через 36 свердловин було закачано близько 30 м<sup>3</sup> цементного розчину.

Ґрунт закріплювали способом смолизації. Гелеутворюючий розчин складався з карбамідної смоли марки КМ густиною 1,09 г/см<sup>3</sup> і щавлевої кислоти густиною 1,019 г/см<sup>3</sup> при часі гелеутворення 60 хв. При закріпленні застосовували попередню обробку ґрунту щавлевою кислотою в об'ємі 50 л. Об'єм закріплюючої гелеутворюючої суміші склав 150 л.

Для визначення якості закріплення було пройдено дві контрольні свердловини діаметром 89 мм з відбором суцільного керна закріпленого ґрунту. Границя міцності при стиску зразків склала від 0,95 до 6,3 МПа. У процесі закріплення вели спостереження за осіданнями фундаментів церкви і прилеглих будівель. Було встановлено, що осідання практично були відсутні як при проведенні робіт, так і після їх закінчення.

**Фундаменти Воскресенського собору в м. Угличі.** Вимивання дрібних фракцій піщаних ґрунтів, що залягають в основі будівель і споруд, при зміні режиму ґрунтових вод також часто спричиняє осідання фундаментів. Прикладом тому можуть служити нерівномірні осідання і деформація будівлі Воскресенського собору в Угличі – унікального пам'ятника архітектури XVII ст., що виникли у зв'язку зі спорудженням ГЕС. Для запобігання подальшій деформації терміново було здійснено закріплення дрібного водонасиченого піску в основі собору способом смолизації із застосуванням карбамідної смоли марки КМ густиною 1,08 г/см<sup>3</sup> і соляної кислоти густиною 1,013 г/см<sup>3</sup>. Заздалегідь ґрунт обробляли 3 %-м розчином соляної кислоти. Склад гелеутворюючого розчину: 9,6 част. карбамідної смоли + 0,4 част. НС1. Час гелеутворення - 1,5 год.

Обробку ґрунту закріплюючими розчинами вели західками завдовжки 1 м зверху вниз. Ін'єктори розташовували у вісім рядів по периметру фундаментів, з них чотири – з зовнішнього боку і

чотири – всередині приміщення. Відстань між ін'єкторами у ряді 1 м. Таке розташування ін'єкторів забезпечувало створення під фундаментами смуги із закріпленого ґрунту завширшки 8 м (при ширині фундаменту 2,5) і завглибшки 4 м (рис. 3.24).

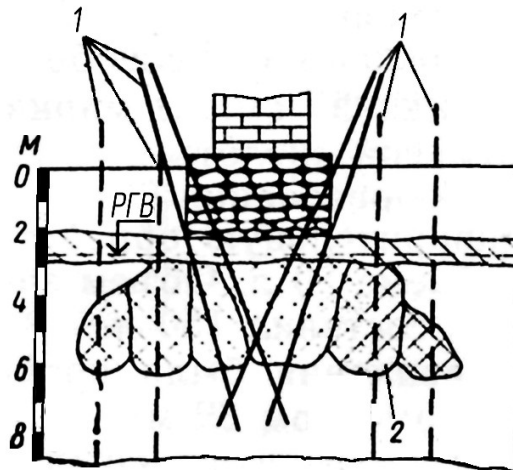


Рис. 3.24. Закріплення ґрунту під фундаментами Воскресенського собору в м. Угличі:  
1– ін'єктори; 2 – закріплений ґрунт

Зважаючи на наявність у верхній насипній 2-метровій товщі включень цегли, бетону, уламків деревини та іншого будівельного сміття забивання ін'єкторів вели комбінованим способом. Спочатку в насипному ґрунті (неводонасиченій товщі) за допомогою перфоратора до подошви фундаменту пробурювали свердловину-шпур, потім у неї вставляли і забивали до проектної глибини (6 м) ін'єктор. Для забезпечення безвідмовної роботи в умовах повного водонасичення дрібних пісків ін'єктори були забезпечені захисними гумовими кільцями. Розчини в ґрунт закачували за допомогою стиснутого повітря. У кожен західку нагнітали 335 л соляної кислоти для попередньої обробки і такий же об'єм гелеутворюючого розчину. Середня витрата розчину при тиску 0,5 МПа склала 7 л/хв. Після закінчення робіт були пробурені контрольні свердловини діаметром 127 мм в п'яти точках по периметру фундаменту і відібрані керни для випробування на міцність. Середня границя міцності при стиску склала 3 МПа.

Осідання будівлі, за якими велися спостереження протягом 8 місяців, припинилися.

### ***3.1.2. Проходка підземних виробок і розкриття котлованів***

У ряді випадків хімічні способи закріплення ґрунтів застосовують як допоміжний метод при проходці тунелів і розкритті котлованів. Найчастіше за допомогою цих способів заздалегідь закріплюють ґрунт із забою тунелю з випередженням проходки на 10÷20 м. Закріплений ґрунт дозволяє здійснити проходку в об'ємі тунелю. Ґрунт, закріплений за межами цього об'єму, створює склепіння, під захистом якого і здійснюється проходка тунелю без осідань. В обводнених ґрунтах закріплення інколи проводять по всьому перерізу прохідного тунелю.

При розкритті котлованів у піщаних ґрунтах, застосовуючи ін'єкційні способи (силікатизацію, смолизацію), створюють водонепроникні стінки, що запобігають притоку ґрунтових вод і переміщенню ґрунту. Порівняно зі шпунтовою огорожею ці способи мають істотну перевагу. У глинистих ґрунтах розкриття котлованів «насухо» здійснюють сумісним застосуванням голкофільтрового водозниження та електроосмотичного осушення. Нижче наведені приклади застосування хімічних способів закріплення ґрунтів при проходці підземних виробок і розкритті котлованів.

**Самопливна галерея.** Для подачі води від річки до заводу була споруджена дерев'яна самопливна галерея довжиною 550 м. Кінцева ділянка галереї довжиною 60 м була виконана із залізобетону. На всій довжині галереї встановлено п'ять оглядових колодязів – чотири дерев'яних і один залізобетонний. Через рік після пуску галереї в експлуатацію було встановлено, що сама вона, а також з'єднання оглядових колодязів з нею заносяться піском. Безпосередньо у галереї є значні щілини, через які засмоктується пісок.

Для запобігання проникненню піску в галерею та інфільтрації води через її стінки, а також для можливості відкачування води із галереї з метою її огляду була здійснена дворозчинна силікатизація ґрунту навколо оглядових колодязів і на дерев'яній ділянці галереї. За даними геологічного розрізу по



осі водозабору, галерея проходить в однорідному піску середньої крупності алювіального походження. Переріз закріпленого масиву показаний на рис. 3.25. Всього по колодязях і галереї було закріплено 487,85 м<sup>3</sup> ґрунту.

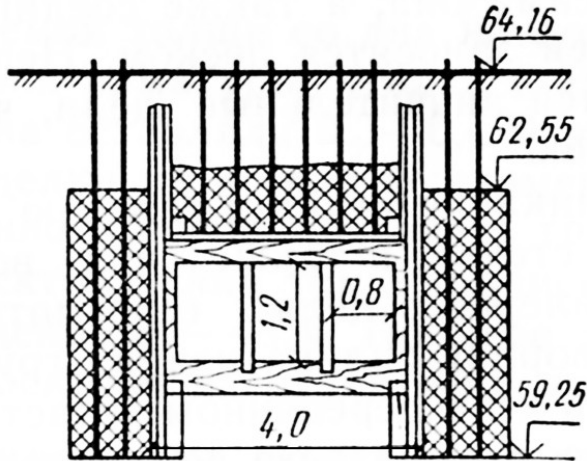


Рис. 3.25. Зміцнення самопливної галереї

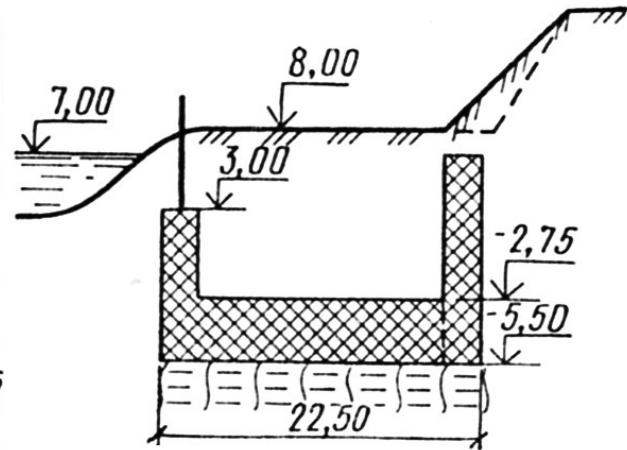


Рис. 3.26. Закріплення ґрунту при розкритті котлована насосної станції

**Котлован насосної станції.** Спосіб дворозчинної силікатизації був застосований при розкритті котлована насосної станції на березі ріки. Геологічне нашарування представлене 12-метровим шаром алювіальних відкладень, покривних делювіальних лесоподібних суглинків завтовшки до 14,5 м, покритих рослинним шаром чорнозему, який є складовим рельєфу берега. Належний закріпленню дрібний пісок мав коефіцієнт фільтрації в середньому 2 м/доб. Для обгороджування котлована від притоку ґрунтових вод була створена по його периметру захисна стіна завтовшки 1 м і під його дном плита завтовшки 2,75 м (рис. 3.26). Загальний об'єм закріплення склав 1443 м<sup>3</sup>. Кількість забитих ін'єкторів дорівнювала 1100 шт. при загальній довжині їх 30 807 м.

**Боротьба з обводненням нафтових свердловин.** На початку Великої Вітчизняної війни на промислах Сизраньнафти спостерігалось значне обводнення нафтових свердловин. Для збільшення видобутку нафти був застосований однорозчинний

спосіб закріплення піщаних ґрунтів на основі силікату натрію і ортофосфорної кислоти.

Шар піску залягав на глибині 900 м і мав товщину близько 10 м. Був прийнятий такий порядок проведення робіт. Спочатку припиняли відкачування води і нафти зі свердловини, обладнаною обсадною трубою з отворами у верхній частині нафтоносного пласта. Потім у неї опускали трубу з тампоном на кінці, який встановлювали вище за отвори в свердловині, і цементували отвори. Після цього трубу з тампоном видаляли і в обсадній трубі прострілювали отвори в середній частині пласта. Потім знову встановлювали тампон і через отвори в трубі нагнітали гелеутворюючий розчин. Нагнітання розчину здійснювали під тиском до 10 МПа в об'ємі 12 м<sup>3</sup>. Після нагнітання гелеутворюючого розчину отвір цементували, прострілювали нові отвори у верхній частині піщаного шару і відновлювали відкачування нафти. У результаті виконаних робіт співвідношення відкачуваних нафти і води змінювалося у зворотний бік, тобто нафти стали відкачувати в 3 рази більше, ніж води.

**Проходка підземних виробок при будівництві Московського метрополітену.** Впровадження способу однорозчинної силікатизації на основі силікату натрію і кремнефтористоводневої кислоти було здійснено для закріплення ґрунту з метою забезпечення щитової проходки тунелів без осідань на Жданівському і Замоскворецькому радіусах Московського метрополітену. На Жданівському радіусі ця рецептура була застосована при щитовій проходці лівого перегінного тунелю між станціями «Волгоградський проспект» і «Текстильники» для створення склепіння із закріпленого ґрунту.

Закріплювали піски середньої крупності з коефіцієнтом фільтрації 6÷8 м/доб і вологістю 4÷8 %. Закріплюючий розчин нагнітали за допомогою стиснутого повітря під час руху щита через спеціальні ін'єкційні камери, встановлені в його отворах. Гелеутворюючий розчин складався з 7 част. силікату натрію густиною 1,32 г/см<sup>3</sup> і 1 част. H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> щільністю 1,08 г/см<sup>3</sup>. Ґрунт задалегідь обробляли кремнефтористоводневою кислотою, що подається за оболонку щита за допомогою тих самих ін'єкційних камер (перший ряд). За оболонку з кожного ряду подавали по

10÷15 л розчину за 1 хв при тиску в розподільних колонках 0,15÷0,20 МПа. На 1 м тунеля витрачали близько 300 л кислоти і 700 л силікату натрію. Ґрунт закріплювали на довжині 16 м по осі тунеля. Результатом проведених робіт з'явилося утворення зони закріпленого ґрунту завтовшки 15÷25 см з міцністю від 1,0 до 1,9 МПа. Товщина склепіння, що утворилося із закріпленого ґрунту, і міцнісні дані закріплення відповідали вимогам проекту і забезпечили проходку тунеля без осідань.

На Замоськворецькому радіусі хімічне закріплення ґрунту було проведено на ділянці завдовжки 120 м між станціями «Автозаводська» і «Коломенська». Ділянка насичена підземними комунікаціями і надземними інженерними спорудами: будівлі тяглово-понижуючої підстанції, будівля фабрики іграшок, залізничні колії. Ґрунт – пісок середньої крупності з коефіцієнтом фільтрації 14÷16 м/доб і пористістю 42 %. Зустрічаються прошарки дрібного гравію і глинистих ґрунтів, перехідних у моренні суглинки. Рівень ґрунтових вод знаходився на глибині 6÷7 м від поверхні ґрунту. Хімічне закріплення проводили тільки в місцях, де тунелі проходили безпосередньо під будівлями або поблизу них. На ділянці під двома будівлями тяглово-понижуючої підстанції закріплення ґрунту здійснювали із забою. Закріплювали масив ґрунту довжиною 3 м (переріз 37÷39 м<sup>2</sup>) так, щоб після проходки тунелю навколо нього залишалося кільце із закріпленого ґрунту завтовшки 0,75 м. Створення закріпленого масиву забезпечувалося нагнітанням розчину через 69 точок. Закріплюючий розчин – суміш силікату натрію густиною 1,32 г/см<sup>3</sup> і Н<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> густиною 1,08 г/см<sup>3</sup> із співвідношенням 6:1. Ґрунт заздалегідь обробляли тією самою кислотою. У результаті закріплення масиву ґрунту тунель був пройдений, а будівлі збережені.

На найбільш відповідальній ділянці довжиною 29 м під триповерховою будівлею фабрики іграшок ґрунт закріплювали з поверхні ґрунту. Було запроектоване склепіння із закріпленого ґрунту. На 1 м тунелю закріплювали понад 40 м<sup>3</sup> ґрунту, частину з якого потім розробляли. Монолітність закріплення забезпечувалася густою сіткою ін'єкційних точок з радіусом закріплення 0,8 м. Глибина занурення ін'єкторів складала 8,5÷9 м. Для забивання і витягання ін'єкторів застосовували відбійні

молотки. Швидкість занурення ін'єкторів 0,2 м/хв. Розчини нагнітали насосами НКН-10 під тиском  $0,5 \div 0,6$  МПа західками довжиною 1 м. Швидкість нагнітання 40 л/хв. Витрата матеріалів на  $1 \text{ м}^3$  ґрунту склала 300 л силікату натрію і 350 л  $\text{H}_2\text{SiF}_6$ , а на 1 м тунелю – відповідно 13,7 і  $18 \text{ м}^3$ . Міцність закріплення через 1 добу склала  $1,8 \div 2$  МПа. У результаті хімічного закріплення було створене несуче склепіння закріпленого ґрунту, що забезпечило безаварійну проходку тунелю. Осідання поверхні ґрунту і деформація будівлі були виключені. Фабрика роботу не припиняла.

Тут же на невеликій ділянці були застосовані дворозчинна силікатизація і смолизація. Ці роботи були проведені для перевірки ефективності трьох рецептур в однакових умовах. При закріпленні ґрунтів дворозчинною силікатизацією була досягнута міцність  $2 \div 2,4$  МПа, а при смолизації – 3,5 МПа. Таким чином, була підтверджена можливість застосування всіх трьох способів хімічного закріплення ґрунтів для проходки підземних виробок.

**Колектор р. Неглинки у м. Москві.** У 1965 р. трест гірничопрохідницьких робіт застосував хімічне закріплення ґрунтів способом смолизації при проходженні колектора р. Неглинки щитом діаметром 4,1 м з використанням прес-бетону. Закріплювали піски з метою створення над щитом склепіння міцного ґрунту для проходки виробок без осідань і збереження тим самим розташованих над колектором будівель. Закріплення проводили із забою. Ін'єктори розташовували віялоподібно у верхній частині виробок в два ряди під кутом  $10^\circ$  до твірної склепіння. Відстань між ін'єкторами у верхньому ряду дорівнювала 0,74 м, у нижньому – 0,6 м. Глибина забивання складала  $3 \div 5$  м (для отримання склепіння завтовшки 0,5 м). Склад гелеутворюючого розчину: смола марки КМ щільністю  $1,08 \text{ г/см}^3$  і соляна кислота густиною  $1,013 \text{ г/см}^3$ . Ґрунт заздалегідь обробляли соляною кислотою, розчин нагнітали насосами ПСБ-4 і Н-3 відразу у всі забиті ін'єктори в два прийоми: після закачування в першу західку ін'єктор витягували на довжину 1 м і залишали на 2 доби, потім проводили ін'єктування розчину в наступну західку. Границя міцності при стиску закріпленого ґрунту склала  $1,2 \div 1,5$  МПа, що забезпечувало стійкість покрівлі при

розробці забою і кріпленні його шандорами. Розташовані над колектором будівлі деформацій не мали.

**Колектор у м. Ташкенті.** У Ташкенті для закріплення водонасичених ґрунтів при щитовій проходці колектора була застосована газова силікатизація. Пропонувалося здійснювати закріплення із забояю і з поверхні ґрунту. Проте оскільки глибина закріплення була невеликою (колектор проходив неглибоко), вирішили проводити роботи тільки з поверхні землі. Рівень ґрунтових вод знаходився на глибині 4,7 м від поверхні землі, а вісь щита діаметром 2,56 м розміщувалася на глибині 3,28 м. Було ухвалене рішення закріплювати ґрунт не по всьому периметру проходки, а лише в його перезволоженій частині – вище днища щита приблизно на 1,3 м і нижче за нього на 1 м (рис. 3.27).

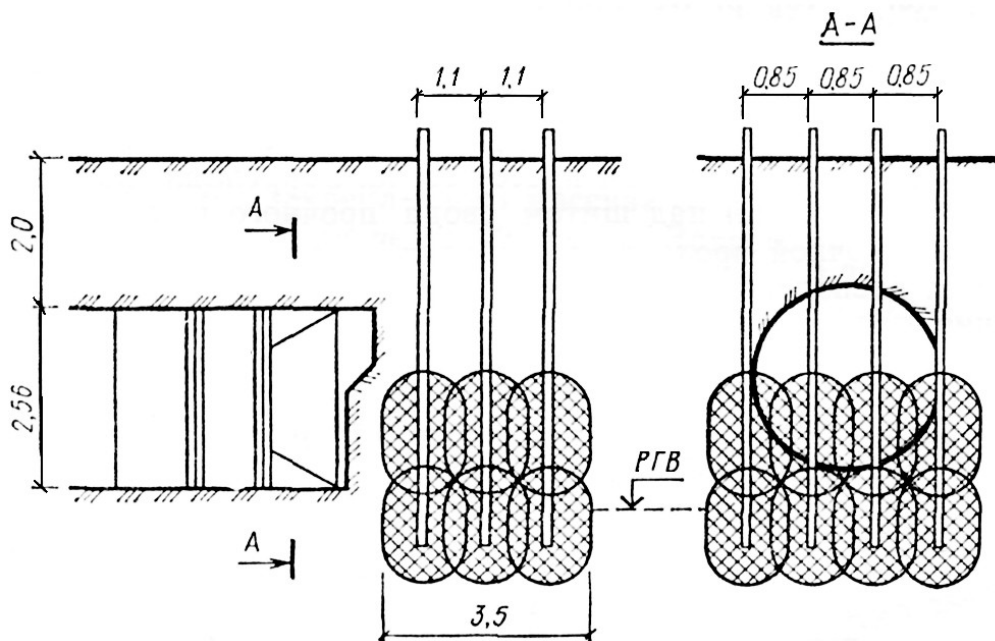


Рис. 3.27. Щитова проходка колектора в лесовому ґрунті, закріпленому способом газової силікатизації в Ташкенті

При закріпленні був прийнятий такий технологічний режим. Спочатку нагнітали вуглекислий газ масою 2 кг на одну західку під тиском  $0,2 \div 0,3$  МПа, потім розчин силікату натрію густиною  $1,13 \div 1,15$  г/см<sup>3</sup> об'ємом  $270 \div 350$  л на 1 м<sup>3</sup> ґрунту, а після знову вуглекислий газ –  $3 \div 4$  кг. Закріпивши певну ділянку лесу, починали просувати щит у закріплений ґрунт. Проектом

передбачалося проведення робіт із закріплення з випередженням руху щита на 10÷15 м. Усі ці роботи дали добрі результати: ґрунт набув міцності 0,4÷0,8 МПа, став водостійким, фільтрація його зменшилася в 50÷100 разів.

**Траншея для залізобетонного колектора р. Ніщенки.** Траншея глибиною 9 м і шириною 4,7 м для залізобетонного колектора р. Ніщенки була пройдена в юрських суглинках, що мали текучу консистенцію, із застосуванням способу електроосмотичного осушення. Коефіцієнт фільтрації ґрунту складав 0,02 м/доб, що виключало можливість застосування звичайного водозниження. Схема розташування електродів дана на рис. 3.28.

Голкофільтри (католи) і труби (аноли) занурювали гідравлічним способом. Вакуумна установка та електричний струм вмикалися одночасно, щоб уникнути замулювання фільтрів і піщаного обсіпання. Джерелом струму служив зварювальний агрегат САК-2Г. Дебіт всієї установки склав 4 м<sup>3</sup>/год. За 3 доби рівень ґрунтових вод був знижений на 4,5 м. Електроосушення продовжувалося 1 місяць, за цей термін вологість ґрунту знизилася з 32,8 до 17 %. Це дозволило пройти траншею «насухо».

**Електроосушення при розкритті котлована під фундамент житлової будівлі.** Перед початком будівництва будівельний майданчик був заболоченою ділянкою землі. Для улаштування фундаменту 14-поверхової будівлі необхідно було розкрити котлован глибиною 4,5 м у водонасичених суглинках (рис. 3.29).

Коефіцієнт фільтрації ґрунту складав  $1,4 \times 10^{-6}$  см/с, коефіцієнт електроосмосу –  $6,4 \times 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/(с·В). Електроди (380 шт.) розташували в два ряди по периметру котлована. Гідравлічне занурення голкофільтрів (катодів) і труб (анодів) проводили при тиску на насосі 1÷1,2 МПа. Піщане обсіпання голкофільтрів не доводили до поверхні землі на 1 м, і цю частину їх ущільнювали жирною глиною для можливості створення біля фільтра вакууму. Вакуум підтримували на рівні 0,06 МПа. Джерелом постійного електричного струму служив мотор-генератор СМГ-4 з максимальною напругою 50 В і силою струму 1000 А. Генератор забезпечував струм 1 А на 1 м<sup>2</sup> електричної

завіси. Відкачувану воду відводили за межі будівельного майданчика і скидали в зливостік.

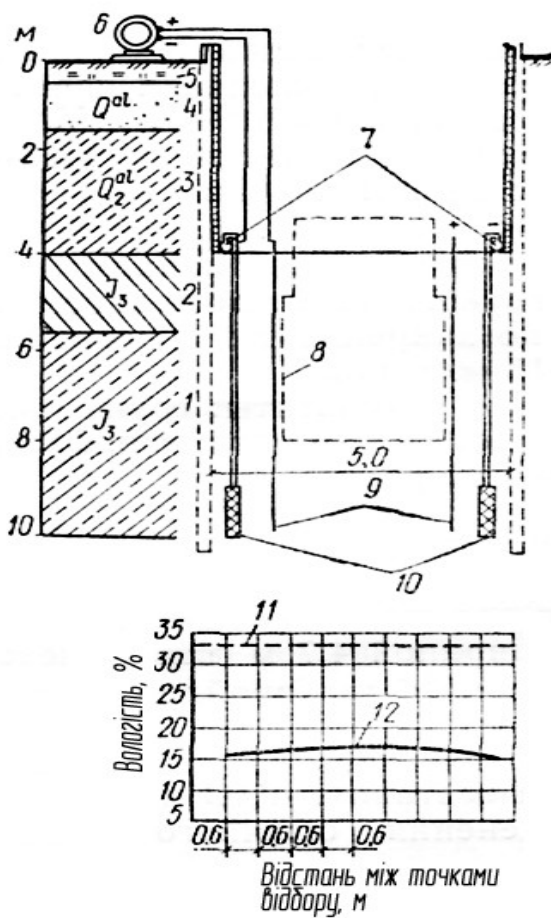


Рис. 3.28. Електроосмотичне осушення ґрунту при розробленні траншеї:

- 1 – суглинок; 2 – глина; 3 – супісок;
- 4 – пісок; 5 – насипний ґрунт;
- 6 – мотор-генератор; 7 – голкофільтровий колектор; 8 – контур залізобетонного колектора; 9 – труби-аноди; 10 – голкофільтри-катоди;
- 11 – початкова вологість;
- 12 – кінцева вологість

Для висновку про ефективність застосування постійного електричного струму відкачування води спочатку вели без приєднання струму. Зниження рівня контролювали у восьми п'єзометричних свердловинах. Через 30 діб після початку відкачування було встановлено, що рівень ґрунтових вод знизився лише на 3,2 м і розкрити котлован не можна. За

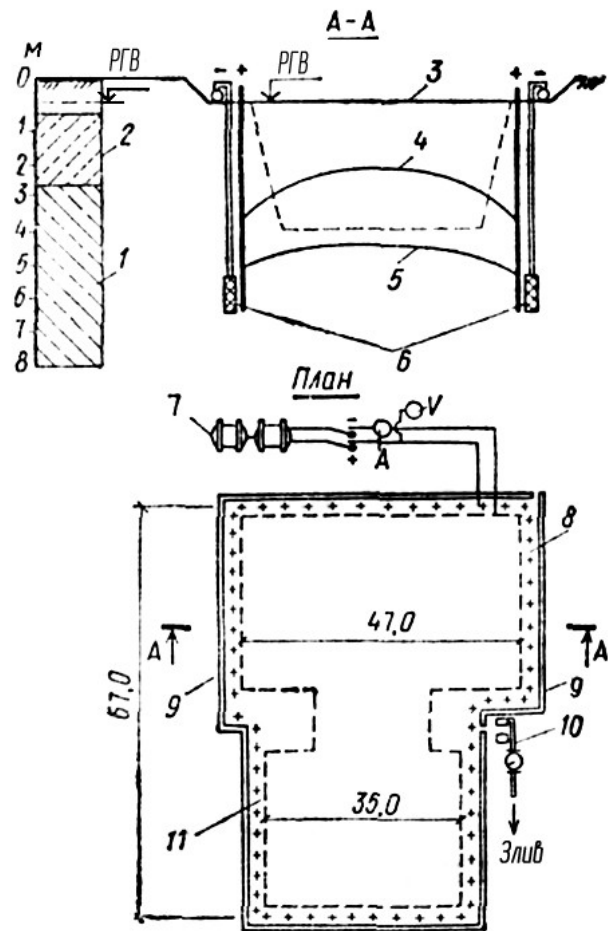


Рис. 3.29. Електроосушення для розкриття котлована при будівництві житлової будівлі:

- 1 – суглинок; 2 – супісок; 3 – рівень ґрунтових вод до початку робіт; 4 – те саме до електроосушення; 5 – те саме після електроосушення; 6 – голкофільтри; 7 – мотор-генератор; 8 – труби-аноди; 9 – водозбірний колектор з голкофільтрами-катадами; 10 – насосні установки; 11 – контур котлована

наступні 10 діб додаткового зниження рівня не відбулося. Потім включили електричний струм. Через 3 доби після цього рівень ґрунтових вод знизився ще на 1,7 м, і котлован був розкритий «насухо». Сила струму у момент його приєднання склала 500 А, а через 16 діб знизилася до 350 А і тоді залишалася постійною протягом інших 76 діб, поки йшло розкриття котлована.

За цей час відбувся такий випадок. Мотор-генератор був зупинений на ремонт. Через 2 доби ґрунтові води почали затоплювати котлован. Після приєднання струму рівень води був знову швидко знижений.

**Глибока траншея Єрмолаївського вугільного розрізу.** При проходці північної виїзної траншеї глибиною 36 м і довжиною 1200 м Єрмолаївського вугільного розрізу (р. Кумертау) будівельники зустрілися зі зсувними явищами в суглинистих ґрунтах у зоні розміром 900 м. Спорудження голкофільтрової завіси для захисту укосу не дала позитивних результатів.

Була запроектована і виконана система електроосмотичних завіс. Одна з них – глибока – складалася з водознижуючих і водовбирних свердловин, інша – голкофільтрова – розташовувалася на укосі траншеї і мала довжину 600 м. Схема улаштування і роботи глибокої завіси дана на рис. 3.30. Як видно з рисунка, водознижуючі свердловини були опущені у водоносний піщаний шар, що залягає на глибині 40÷50 м, і забезпечені насосами АТН. Водовбирні свердловини, закладені на ту саму глибину, були збірниками води, що надходить з навколишнього суглинного ґрунту. Вода, що поступала в свердловини, обладнані спеціальними фільтрами, спускалася у водоносний шар піску, звідки відкачувалася водознижуючими свердловинами.



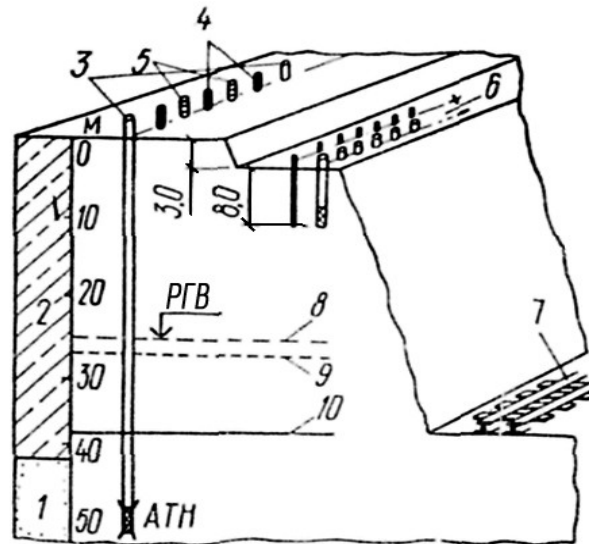


Рис. 3.30. Улаштування глибокої водознижуючої завіси:

1 – пісок; 2 – суглинок; 3 – водознижуючі свердловини; 4 – аноди;  
 5 – водовбирні свердловини; 6 – голкофіiltroва завіса; 7 – залізничні колії  
 на дні траншеї; 8 – рівень ґрунтових вод до початку робіт; 9 – те саме при  
 роботі водознижуючих свердловин; 10 – те саме при накладенні постійного  
 електричного струму

Усього по завісі було встановлено 15 водознижуючих і 19 водовбирних свердловин. Відстань між водознижуючими свердловинами складала 70 м (на схемі для наочності масштаб викривлений). Між сусідніми водознижуючими свердловинами було встановлено по дві водовбирні свердловини. При роботі за такою схемою без накладення струму надходження води із суглинку було дуже малим. Це пояснюється не тільки малою проникністю навколишнього ґрунту, але і постійним замулюванням фільтрів свердловини. За ухваленим рішенням на завісу був накладений постійний електричний струм. Водознижуючі і водовбирні свердловини були підключені до негативного полюса, а забиті між ними електроди – до позитивного. У результаті накладення струму різко збільшився приплив води до водовбирних свердловин і різко знизився рівень ґрунтових вод по всьому створу глибокої завіси (див. рис. 3.30). Зниження рівня ґрунтових вод у перші ж дні на 13 м підтвердило дію постійного електричного струму на поглинаючу здатність свердловин.

Надалі у зв'язку з тим, що ґрунт навколо електродів підсихав, збільшуючи свій омичний опір і тим самим знижуючи щільність струму, було ухвалено рішення про поперемінне вмикання і вимикання струму. Унаслідок цього ґрунт навколо електродів злегка зволожували і режим роботи завіси зберігався. На час вимикання струму рівень ґрунтових вод підвищувався на 3 м. Цей ефект можна пояснити не тільки припливом води до свердловин, але і очищенням фільтрів від замулювання, тобто в даному випадку було використане явище електрофорезу. Робота глибокої завіси дозволила довести траншею до проектної глибини і укласти по її дну залізничні колії «насухо».

Друга – голкофільтрова – завіса, як вже говорилося, була влаштована на укосі траншеї нижче поверхні землі на 3 м, для чого була підготовлена берма. На поверхні схилу спостерігався вільний вихід води (гідропостережна свердловина, розташована на схилі, самовиливалася). Зсувні явища, що відбувалися на схилі, заважали вести роботи з укладання колій. Завданнями голкофільтрової завіси були перехоплення води по схилу й осушення ґрунту на його поверхні. Завіса складалася з двох рядів електродів, одним з яких були голкофільтри (негативні), іншим – металеві труби (позитивні). Електроди в ряді були розташовані через 1,5 м, відстань між рядами складала 0,67 м. На завісу був накладений постійний електричний струм густиною 0,3 А при напрузі 40 В. Глибина закладання електродів складала 8 м. На лінію голкофільтрів був накладений вакуум, що досягав 0,053 МПа, який створювала установка ЛІУ-2.

На рис. 3.31 зображені виміри рівня ґрунтових вод по одному з семи створів через голкофільтрову завісу. Як видно із графіка, зниження рівня відбувається інтенсивно в початковий момент, а надалі зменшується, тому що він перебуває в межах дії вакууму. Перехоплення води голкофільтровою електроосмотичною завісою протягом декількох місяців дозволив ліквідувати зсувні явища на цій ділянці. Створення електроосмотичної завіси в малопроникних ґрунтах на Єрмолаївському розрізі є першим прикладом застосування електроосмосу для осушення глинистих ґрунтів у великих масштабах.

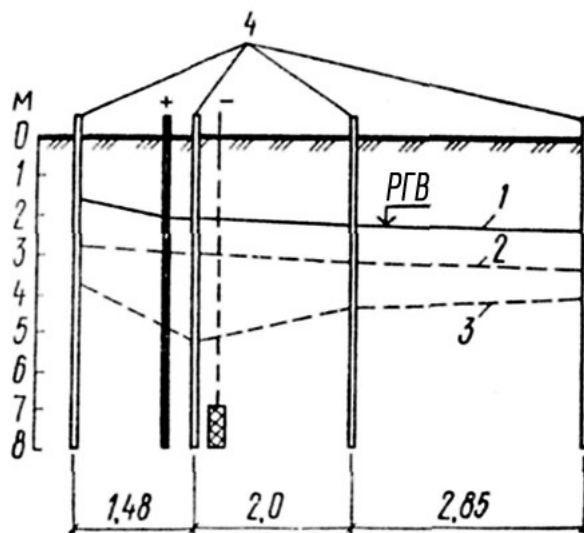


Рис. 3.31. Зниження рівня ґрунтових вод при роботі голкофільтрової завіси:

1 – рівень ґрунтових вод початковий; 2 – те саме через 7 діб; 3 – те саме через 20 діб; 4 – гідропостережні свердловини

### 3.1.3. Улаштування водонепроникних завіс

Застосування способу дворозчинної силікатизації в 1930-ті роки в гідротехнічному будівництві було спричинено аварійним станом деяких споруд. Цей спосіб з великим ефектом використовували для швидкого створення водонепроникної завіси навіть за наявності значних швидкостей фільтрації ґрунтових вод. Крім того, цей спосіб застосували на будівництві і при подальшій експлуатації каналу ім. Москви для створення водонепроникних завіс біля насосних станцій. У зв'язку з будівництвом висотних дамб, в основі яких залягали ґрунти з різними коефіцієнтами фільтрації, в 1960-ті роки розробили ряд рецептур способу однорозчинної силікатизації, що дозволяють закріплювати ґрунти з коефіцієнтом фільтрації 0,5 м/доб і більше. Прикладами застосування вказаних способів закріплення ґрунтів для створення водонепроникних завіс можуть служити два випадки.

**Водонепроникна завіса в основі стояна греблі.** У районі правобережного стояна залізобетонної багатоаркової греблі, зведеної на піщано-гравелистому ґрунті, виникла небезпечна для

споруди фільтрація. Металева шпунтова стінка не забезпечувала значного зниження фільтрації, і вода із водосховища дуже інтенсивно надходила в дренажні отвори флютбета греблі. Рух ґрунтових вод в основі стояна зі швидкістю до 4,5 м/год призводив до винесення піщаних частинок і створення пустот під флютбетом греблі. Щоб звести небезпечну фільтрацію до мінімуму, необхідно було закріпити піщано-гравелистий ґрунт в основі правобережного стояна і уздовж шпунтової стінки (рис. 3.32).

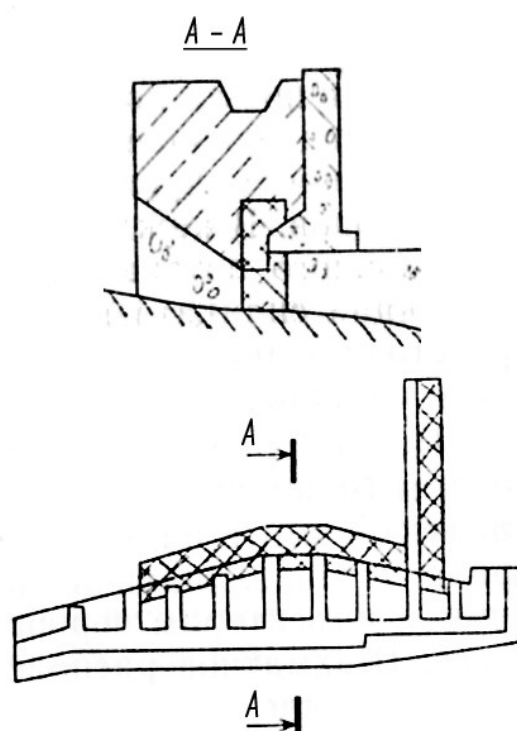


Рис. 3.32. Закріплення способом дворозчинної силікатизації піщано-гравелистого ґрунту в основі стояна греблі

В основі стояна закріплений масив слідував у плані за контуром бетонної фундаментної плити, йдучи під нею мінімум на 0,5 м. Довжина цього масиву склала 17,0 м, ширина – 2,5 м і висота – 5,8 м. Закріплення ґрунту уздовж верхнього шпунта було проведено від стояна у бік берега на 13 м. Закріплення починалося з глибини 7,8 м, тобто на 0,2 м вище за верхню границю гравелистих ґрунтів, і закінчувалося на покрівлі порфірової скелі на глибині 14,3 м. Таким чином, воно охоплювало всю товщу

піщано-гравелистого ґрунту. Закріплений масив шириною 2 м примикав впритул до верхового шпунта. Площа перерізу цього масиву складала 26 м<sup>2</sup> при його об'ємі 169 м<sup>3</sup>. Загальний об'єм закріплення по стояну і шпунту склав 416 м<sup>3</sup>.

Унаслідок наявності значних швидкостей ґрунтового потоку закріплення здійснювали за спеціально розробленим і випробуваним у лабораторних умовах методом, що моделював природні умови. Лабораторні дослідження показали, що при одночасному введенні хімічних розчинів у ґрунт можна добитися тільки водонепроникності ґрунту. Міцності ґрунту можна добитися подальшим його закріпленням звичайним способом, тобто почерговим нагнітанням розчинів. На підставі цього закріплення гравелистого ґрунту було проведено в два прийоми: спочатку ліквідували фільтрацію в закріплюваних зонах, а потім збільшували міцність ґрунту. Роботи проводили в такому порядку. У ґрунт, що підлягає закріпленню, забивали два ряди спарених ін'єкторів. У кожній парі передні за течією фільтраційного потоку ін'єктори призначалися для ін'єктування силікату натрію, а задні, розташовані на відстані 0,25 м від передніх, – для ін'єктування хлористого кальцію.

Перший ряд ін'єкторів розташовували на відстані 0,75 м від шпунта (або плити стояна). Відстань між ін'єкторами в ряду складала 1 м. Ін'єктори другого ряду встановлювали в шаховому порядку відносно ін'єкторів першого ряду на відстані 0,75 м від нього. Шахове розташування ін'єкторів першого і другого рядів було прийнято з розрахунком деякого знесення першого розчину. Ін'єктори другого ряду, через які проводилося ін'єктування хлористого кальцію, були дещо зсунуті і знаходилися на одній лінії руху фільтраційного потоку з ін'єкторами першого ряду. Загальна кількість ін'єкторів по шпунту складала 50 шт., по стояну – 70 шт. Спочатку ін'єктування проводили через перший ряд ін'єкторів, а потім (після його закінчення) через другий – основний – ряд.

Ін'єктори забивали в ґрунт за допомогою пневматичних молотків СР-116 масою 25 кг, кожний з яких обслуговували два-три робітники. Одночасно працювали два-три молотки. Для полегшення забивання ін'єкторів через верхній шар суглинку перед початком робіт була вирита траншея глибиною 2 м.

Забивання ін'єкторів вели з дна траншеї. У верхньому суглинному шарі потужністю 6 м швидкість забивання ін'єктора складала 20 м/год. При переході в зону піщано-гравелистого ґрунту швидкість різко знижувалася і не перевищувала 3 м/змін. Це значною мірою може бути пояснено наявністю крупного галечнику і уламків скелі.

Розчини нагнітали одночасно в чотирі-вісім ін'єкторів. Перед ін'єкцією розчин силікату натрію нагрівали до  $60 \div 70$  °С, а розчин хлористого кальцію – до  $15 \div 20$  °С. Тиск при нагнітанні силікату натрію не перевищував  $1,2 \div 2,5$  МПа, а хлористого кальцію –  $0,6 \div 1,0$  МПа. При проведенні робіт уздовж шпунта в кожен західку, щоб закріпити  $1 \text{ м}^3$  ґрунту, нагнітали 128 л силікату натрію і 152 л хлористого кальцію. Роботи вели в три зміни. Змінна продуктивність дорівнювала в середньому  $5 \div 6 \text{ м}^3$  закріплення. Контроль за результатами робіт здійснювали шляхом спостереження за режимом потоку на правому березі в районі примикання греблі і за витратою води через дренажні отвори у флутбеті греблі. Після закінчення робіт була побудована карта ізогіпс. Рух ґрунтових вод до силікатизації був направлений у бік нижнього б'єфа і під правобережний стоян. Після силікатизації ґрунтовий потік змінив свій напрям на паралельний стояну. Проведення робіт із силікатизації піщано-гравелистого ґрунту призвело до таких результатів: фільтраційний потік змінив свій напрям; швидкість фільтраційного потоку значно зменшилася; витрати фільтраційного потоку по найближчому прогону греблі скоротилися в 12 разів; рівні води в п'єзометрах нижнього б'єфа знизилися.

**Противільтраційна завіса в основі висотної Асуанської греблі, Єгипет.** Води р. Нілу є основою розвитку сільського господарства і єдиним джерелом водопостачання Єгипту, тому в минулому, до спорудження висотної Асуанської греблі, у маловодні роки від засухи страждали цілі провінції, а в роки багатоводні, коли стік ріки досягав величезних розмірів, відбувалися катастрофічні повені, що приносили величезний збиток усьому господарству країни. Регулювання стоку р. Нілу шляхом спорудження великої греблі вирішувало багато проблем. У зв'язку з цим після ретельного розгляду технічної і економічної

можливості будівництва такої греблі уряд Єгипту прийняв постанову про її зведення. У 1958÷1960 рр. колишнім Радянським Союзом була надана технічна допомога Єгипту для будівництва 1-ої черги висотної Асуанської греблі з постачанням необхідного устаткування і матеріалів.

Висотна Асуанська гребля створила найбільше в світі водосховище об'ємом більше 150 млрд м<sup>3</sup>, яке дозволяє збільшити на одну третину загальну площу поливних земель, поліпшити судноплавство р. Нілу і виробляти більше 10 млрд кВт·год дешевої електроенергії на рік. Висотна Асуанська дамба – одна з найбільших гідротехнічних споруд у світі. Ширина греблі по основі 980 м, по гребеню 40 м, висота 110 м, напір 75 м (рис. 3.33).

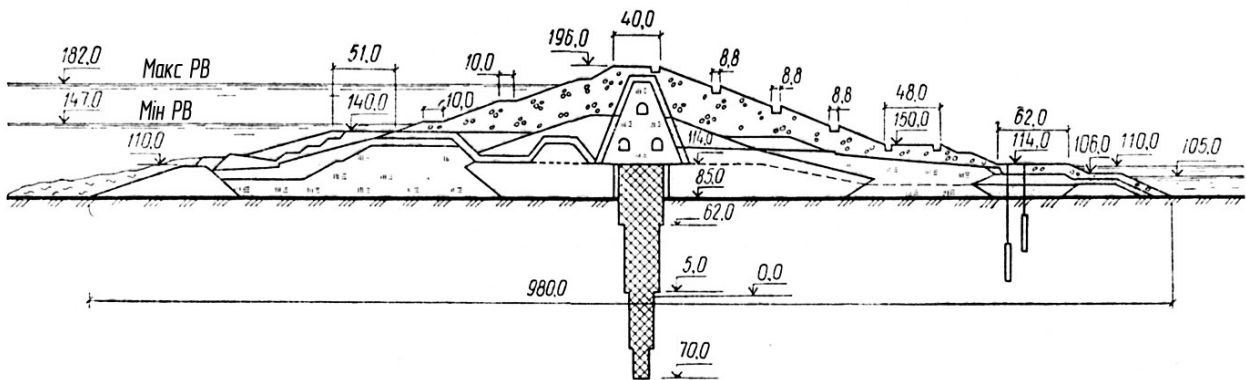


Рис. 3.33. Висотна Асуанська гребля (розріз)

Довжина руслової частини кам'яно-накиданої греблі 560 м, загальна довжина 3800 м. До комплексу протифільтраційних пристроїв входять глиняне ядро, глиняний понур, система дренажних свердловин з боку нижнього б'єфа і руслова протифільтраційна завіса глибиною близько 170 м. На цій протифільтраційній завісі необхідно було провести роботи з закріплення ґрунтів. Для її створення в основі греблі був вибраний метод ін'єктування розчинів. Основна частина завіси знаходилася в алювії, представленому надзвичайно різномірними за крупністю і фільтраційними властивостям пісками з прошарками гравію. Коефіцієнт фільтрації ґрунтів у зоні завіси складав від 5 до 400 м/доб. У зв'язку з цим ін'єкційні розчини, що закачуються в ґрунт, повинні були відповідати таким технічним

вимогам: мати здатність проникати в ґрунт, забезпечуючи йому водонепроникність; мати підвищену стійкість у порах ґрунту при діючих у процесі ін'єкційних робіт градієнтах фільтраційного потоку (для огороджуючих рядів); бути практично нерозчинними в нейтральних або слаболужних ґрунтових водах.

Для приготування розчинів були використані місцеві та високоякісні бентонітові глини, силікат натрію, алюмінат натрію і цемент. Об'єм ґрунту, що підлягав обробці ін'єкційними розчинами, складав 1,8 млн м<sup>3</sup>, а площа завіси по осі греблі дорівнювала 66 тис м<sup>2</sup>. Сумарний об'єм ін'єкційних розчинів за проектом складав 680 тис м<sup>3</sup>. До початку ін'єкційних робіт необхідно було виконати величезний обсяг підготовчих робіт. Сюди входили приготування майданчиків для баз матеріалів і трубопроводів, створення фундаментів під устаткування, улаштування підземних резервуарів, різних комунікацій, залізничних колій, господарських будівель та ін. Приготування ін'єкційних розчинів було централізовано. У лабораторії закріплення ґрунтів НДІ основ спеціально розробили тампонажні ін'єкційні розчини на основі бентонітових і місцевих глин, а також силікатно-алюмінатні гелеутворюючі розчини. Склад розчину призначався залежно від коефіцієнта фільтрації закріплюваного ґрунту. Закачування розчинів проводили через спеціальні манжетні колони, опущені в пробурені свердловини

Завісу створювали під ядром у піщаному насипу і в товщі алювію, і разом з ядром вона складала основну конструкцію протифільтраційного захисту. За глибиною завіса була розбита на три яруси (рис. 3.34). Розрахунковий крок свердловин на підставі дослідних робіт був прийнятий 5 м, але у зв'язку з тим, що при створенні завіси діяли високі напори, крок у першому ярусі зменшили до 2,5 м шляхом введення додаткових шести рядів свердловин. Таким чином, перший ярус завіси створювали з 15 рядів свердловин, з яких сім було заглиблено в другий ярус і п'ять – у третій. Середня глибина завіси складала 100 м при мінімальній 36 м і максимальній 180 м. До квітня 1968 р. роботи з ін'єктування розчинів були завершені. Було ін'єктовано 130,15 тис. м свердловин, оброблено 390,5 тис манжет, уведено 660 тис м<sup>3</sup> ін'єкційних розчинів, з них 302 тис м<sup>3</sup> глиноцементних, 231 тис. м<sup>3</sup> глиносилікатних, 59 тис. м<sup>3</sup> бентонітосилікатних і



68 тис м<sup>3</sup> алюмосилікатних. До моменту закінчення робіт у 1969 р. напір на завісі складав 90 % діючого, який досяг до цього часу 46 м. Завіса працювала ефективніше, ніж передбачалося фільтраційними розрахунками.

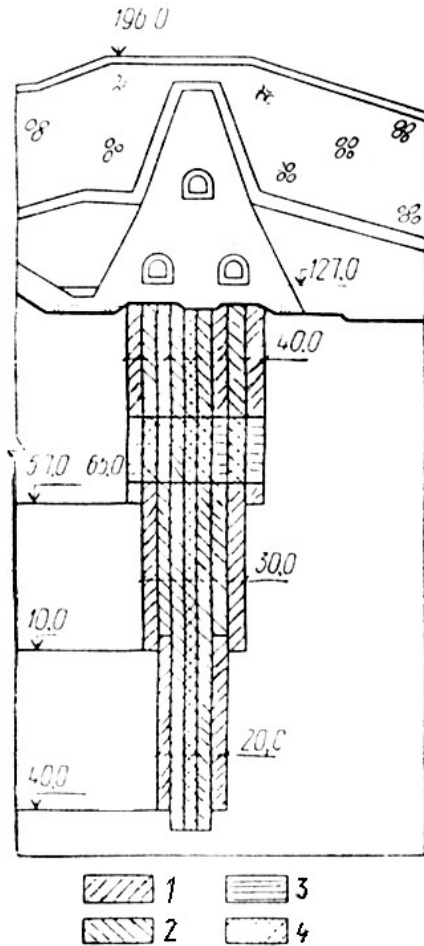


Рис. 3.34. Схема протифільтраційної завіси висотної Асуанської греблі:  
 1 – глиноцементні розчини; 2 – глиносилікатні розчини; 3 – бентонітосилікатні розчини; 4 – алюмосилікатні розчини

Наявність фільтраційного потоку під час ін'єктування тампонажних розчинів, особливо алюмосилікатного, що має найменшу в'язкість під час закачування, могло призвести до сильного зсуву тампонаженої зони. Однак спеціальними дослідженнями було встановлено, що навіть при найвищих градієнтах на завісі зсув не перевищував 0,5 м. У закачаному алюмосилікатному розчині знаходилася велика кількість  $\text{SiO}_2$  і  $\text{Na}_2\text{O}$ , що входять до рідкої фази гелю і здатних (на додачу до знесення розчину) переходити внаслідок дифузії в навколишнє водне середовище й утворювати гель. Не дивлячись на це, зменшення об'єму закріпленого масиву і збільшення його водопроникності не спостерігалось. Проведеними дослідженнями було також встановлено, що піски, закріплені алюмосилікатними гелями, мають високу стійкість

у водному середовищі, у розчинах кислот і солей і в лужних розчинах із значенням  $\text{pH} < 10$ , а тривала дія нільської води не руйнує твердої фракції гелю і, отже, не підвищує водопроникності пісків, закріплених алюмосилікатними

розчинами. Замулювання верхового клину греблі з боку водосховища збільшило ефективність роботи понура і дещо зменшило фільтраційні навантаження на завісу.

Після закінчення улаштування протифільтраційної завіси водосховище було заповнено до проектної відмітки. Одночасно було ухвалене рішення про організацію спостережень за п'єзометрами, встановленими в свердловинах, пробурених із тунелів, закладених у глиняному ядрі. Крім того, із свердловин, пробурених глибше протифільтраційної завіси вздовж її осі, відбирали проби води для хімічного аналізу. Розроблена лабораторією інструкція передбачала визначення кількості компонентів ін'єкційних розчинів, що вимиваються, і величини рН води. В інструкції вказано, що після винесення надлишку ін'єктованого силікату рН води має бути близько 10.

Якість виконаної завіси контролювали шляхом визначення її коефіцієнта фільтрації і однорідності. Цей контроль здійснювали за допомогою електрокаротажу і визначення коефіцієнта фільтрації в окремих точках завіси. Після закінчення 5 років експлуатації завіси на прохання "Гідроспецпроекту" і представників АРЕ була перевірена її робота і встановлено, що водопроникність і хімічний склад завіси гарантують її довговічність.

### **3.2. Хімічне закріплення ґрунтів за кордоном**

Зарубіжні дослідження у галузі хімічного закріплення ґрунтів нараховують багато десятиліть. За цей час накопичений досвід практичного застосування розроблених способів закріплення ґрунтів у різних галузях будівництва: фундаментабудуванні, гірничій справі і гідротехніці. Нижче наводиться короткий огляд основних експериментальних і практичних робіт, виконаних за кордоном.

**Німеччина.** Перша заявка на патент із закріплення ґрунтів була зроблена у 1886 р. І.Е. Єзерським. У 1906 р. Мехнером був запатентований спосіб закріплення незв'язних ґрунтів за допомогою різних вапнистих речовин, а в 1926 р. Іостеном – спосіб дворозчинної силікатизації. Дворозчинна силікатизація як

метод закріплення ґрунтів уперше була застосована в Німеччині в 1930-ті роки на будівельних об'єктах у різних цілях:

а) для зміцнення фундаментів при надбудові будівлі поштамту головного вокзалу в Кенігсберзі (нині Калінінград);

б) зміцнення основи при спорудженні будівлі в Шпандау (Берлін) з метою скорочення довжини бетонних паль, на які опирався фундамент будівлі;

в) улаштування підпірних стін при спорудженні в Берліні Університетської очної лікарні.

Нині при закріпленні ґрунтів користуються методом Йоді – способом однорозчинної силікатизації. Як коагулянт використовують цементний шлак, а також фосфорну кислоту. Досить широко тут застосовують також ін'єкційні розчини типу цементноглинистих, силікатноцементних і силікатноглинистих. При проходці тунелів і при інших видах підземного будівництва застосовують полімерні матеріали – політіксон FU і споріднені йому політіксоны FR, FRN, FRW. Вони складаються з олефінових кислот та аліфатичних і ароматичних ізомерів, не змішуються з водою, але можуть приєднувати до 150 % інших речовин, утворюючи при цьому еластичні матеріали. У первинному стані політіксоны залежно від вихідних продуктів мають в'язкість від 30 до 300 мПа·с, проте добавки, що вводяться в них, знижують її до 10 мПа·с, що робить їх придатними для ін'єктування в ґрунт. Час гелеутворення політіксонов регулюється добавками і може бути незначним у разі закріплення крупних пісків і розтягнутим до 36 год у разі закріплення дрібних пісків. На місце робіт їх доставляють у вигляді двох компонентів, що змішуються безпосередньо перед ін'єктуванням.

Політіксоны проявляють велику стійкість до агресивних середовищ. Вони абсолютно нетоксичні, що і зумовило їх застосування при проходці підземних виробок. У 1966÷1967 рр. вони були застосовані при будівництві нових ліній метрополітену для закріплення ґрунту з метою проходки тунелю без осідань. Для закріплення гірських порід застосовують і епоксидні смоли. Так, у 1962 р. на шахті «Амалія» за допомогою епоксидної смоли (2 част.) і отверджувача форзаміду (1 част.) був закріплений сильно порушений в результаті аварій вугільний масив. Загальна довжина ділянки закріплення склала 23 м, об'єм закріпленого

масиву дорівнював 270 м<sup>3</sup>. Було витрачено 798 кг смоли. Масив набув міцності 3÷5 МПа і водонепроникності, чим і були забезпечені умови для нормальної проходки шахти.

**Велика Британія.** У Лондоні при проходці тунелів метрополітену застосовувався спосіб дворозчинної силікатизації для закріплення повного перерізу виробок, а також для закріплення ґрунту у верхній частині виробки (утворення міцного склепіння). Прикладом закріплення ґрунту служить проходка похилого ходу станції Найтсбридж. Цементация застосовується для закріплення дрібного гравію і крупного піску, хімічні розчини – силікатні і полімерні – для закріплення всіх ґрунтів, аж до дрібного піску. Проте основним методом закріплення до теперішнього часу залишається метод Іостена – дворозчинна силікатизація. У період реконструкції станції Майкл шляхом забивання ін'єкторів із тунелю і подальшого нагнітання розчину було отримане склепіння із закріпленого ґрунту, що забезпечило проходку тунелю без осідань. Хімічне закріплення застосовано також для посилення основи будівлі вокзалу Бені-Монюмент і для утворення склепінь із закріпленого ґрунту над новим залізничним тунелем.

На р. Сіті-Мілас (у східній частині Лондона) тунель, споруджений із застосуванням стиснутого повітря, проходив під існуючим залізничним насипом. Проходячи під річкою, повітря могло фільтруватися через піски і гравій русла річки. З метою запобігання цьому явищу було споруджено перекриття з хімічно закріпленого ґрунту над відповідним тунелем. При нагнітанні розчинів у ґрунт для кращого розповсюдження їх у порах застосовувалося стиснуте повітря.

**США.** Для закріплення ґрунтів у США застосовуються цементні, цементно-глинисті та силікатні ін'єкційні розчини, а також водні розчини смоли АМ-9. Наукові основи методів закріплення ґрунтів у США вперше були сформульовані і розвинені Ч.А. Хогентоглером. У 1946 р. у США був виданий патент Е.Ф. Хаузеру і Е.М. Даненбергу на приготування складів типу бентоніту з використанням акрилових смол; у 1951 р. була опублікована робота Лемба, в якій він детально зупинявся на застосуванні для закріплення ґрунтів акрилових сполук, зокрема акрилату кальцію.

У 1947 р. Р.В. Вінтеркорн опублікував результати лабораторних експериментів із зміцнення ґрунтів фурфуроланіліновою смолою (ФАС). Дослідження ці були початі ще під час другої світової війни, і завдяки їм у 1944 р. ФАС була застосована для закріплення піску морського узбережжя в Нормандії при висадці союзних військ. Проте широкого застосування надалі цей спосіб не отримав. Х. Лаутон в одній із статей (1947 р.) виклав результати досліджень властивостей карбамідних смол і практичного застосування їх для закріплення водоносних пісків у нафтових свердловинах. Для закріплення ґрунтів застосовувався також розчин такого складу: 1 част. (за масою) хлористого амонію, 1 част. Уротропіну, 100 част. сечовини і 263 част. 37 %-го розчину формальдегіду. Найкращий результат дала суміш з молярним відношенням формальдегіду до сечовини 1,95:1,0. У 1953 р. в США був виданий патент на застосування для стабілізації ґрунтів акрилату кальцію в поєднанні з каталізатором, що містить окислювальні і відновні реагенти.

Останніми роками широке застосування в США для глибинного закріплення отримали полімерні матеріали, створені на основі акрилатів. Акрилат кальцію  $(\text{CH}_2 = \text{CHCOO})_2\text{Ca}$  – білий порошок, розчинний у воді. З підвищенням температури розчинність його зростає. Отримують акрилат кальцію шляхом нейтралізації акрилової кислоти оксидами або гідрооксидами відповідних металів. Він полімеризується під дією перекисів, персульфату амонію і лужних металів. Найкращим каталізатором є персульфат амонію, оскільки він сприяє отриманню гелю у всьому обсязі гелеутворюючого розчину. Дія персульфату

амонію підсилюється у присутності відновника, наприклад тіосульфату натрію. Утворювана персульфатом амонію і тіосульфатом натрію редокс-система прискорює виникнення вільних радикалів, унаслідок чого при кімнатній температурі утворюється полімер з великою молекулярною масою. Акриламід  $\text{CH}_2=\text{CHCONH}_2$  так само, як і акрилат кальцію, є похідним акрилової кислоти, що утворюється в результаті заміщення кислотного радикала аміногрупою. Одержують його гідролізом акрилонітрилу сірчаної кислоти. Він добре розчинний у воді і здатний полімеризуватися при нормальній і зниженій температурі при дії на нього редокс-системи.

АМ-9 – запатентований закріплюючий розчин фірми «Американ Симнамід Компані», що складається з акриламідом і метилендіакриламідом. Час його гелеутворення регулюється від декількох хвилин до 2 год. В'язкість розчину близька до в'язкості води. Гель АМ-9 пружний з міцністю  $0,5 \div 0,6$  МПа у повітровологому середовищі. При висиханні гель дає велику усадку. Препарат АМ-9 був використаний для глибинного закріплення ґрунтів при створенні протифільтраційних завіс у дрібних пісках на дамбі Роккі-Пур (1960), Мальпасо на р. Гріхальво в Мексиці (1968), елементів завіси на ГЕС Хайборд у Канаді (1968) та ін. Широке застосування він одержав і в гірничій справі. При проходці гірничих виробок у США для закріплення слабких ґрунтів застосовується розчин АМ-9  $7 \div 10$  %-ої концентрації. Прикладом його застосування можуть служити такі об'єкти: гора Суліван, де при проходці ствола шахти був закріплений на глибині 350 м пласт водоносних пісковиків потужністю  $4,5 \div 6,0$  м, внаслідок чого приток води, що знаходиться під напором 220 м, знизився з 270 до 54 л/хв; копальня «Мерамськ», де при проходці вертикального стовбура шахти діаметром 6,3 м на глибині 1000 м були закріплені нестійкі водонасичені тонкотріщинуваті пісковики товщею  $5 \div 7$  м. Міцність породи зросла з 3,5 до 7,0 МПа.

**Японія.** Глибинне закріплення ґрунтів в Японії носить назву тампонування. Його застосовують у гірничій справі, у гідротехнічному, дорожньому і промисловому будівництві. Тампонажні (ті, що ін'єктуються) матеріали класифікують таким чином: цементи, бентоніти, хімічні матеріали на основі силікату

натрію, хромового лігніну і акриламідю. На основі акриламідю японська фірма «Сумітомо Кемікол Компані» розробила свій власний ін'єкційний матеріал під назвою сумісойл. Це водорозчинний порошок, який є сумішшю акриламідю і невеликої кількості агента поперечного зв'язку. Водний розчин сумісойлу, полімеризуючись під впливом каталізатора, утворює міцний гель. При приготуванні ін'єкційного розчину ініціатор додають у вигляді водного розчину в останню мить до іншого розчину, що містить всю решту компонентів. Орієнтовно для приготування 100 л 10 %-го розчину сумісойлу потрібна така кількість компонентів:

Розчин I:		Розчин II:	
- вода, кг -	40	- вода, кг -	50
- сумісойл, кг -	10	- ініціатор, кг -	0,5
- допоміжний агент, г -	60		
- сповільнювач, г -	50		

Утворення гелю відбувається після змішування цих двох розчинів. Водні розчини сумісойлу мають в'язкість, близьку до в'язкості води, і вона зберігається до моменту гелеутворення. Час гелеутворення регулюється від декількох секунд до десятків хвилин. Ґрунт, закріплений сумісойлом, за даними інституту при фірмі «Бульдозер Кодзі Компані», у початковий період набуває міцності 0,4÷0,5 МПа, яка потім зростає. Указана фірма займається практичним застосуванням сумісойлу. Прикладами цього можуть бути створення протифільтраційної завіси при будівництві греблі Івасі в префектурі Міязаки; захист котлована глибиною 7 м від припливу ґрунтових вод при зведенні будівлі в м. Осаці; омонолічування ґрунтів під будівлею фірми «Бульдозер Кодзі Компані» з метою боротьби з ґрунтовими водами, що підступають до підлоги першого поверху; створення протифільтраційної завіси глибиною 35 м в основі греблі Амагасі; проходка одного з шахтних стволів при будівництві метрополітену в Осаці; проходка перегінного тунелю метрополітену під руслом ріки. Хімічне закріплення ґрунтів застосовують в Японії і при щитовій проходці тунелів у нестійких породах і в міських умовах на невеликій глибині.

Японська фірма «Атака» запропонувала Радянському Союзу купити велику партію сумісойлу. Для визначення доцільності закупівлі дорогого препарату було проведено пробне закріплення

ним ґрунту в основі корпусу № 45 шовкового комбінату «Червона троянда» у м. Москві. Геологія ділянки характеризувалася піском з коефіцієнтом фільтрації від 1,73 до 5,3 м/доб. Для приготування і нагнітання розчинів використовували пневматичну установку. Паралельно проводилися роботи із закріплення того самого ґрунту способом смолизації. У результаті проведеного дослідного закріплення з'ясувалося, що практично потрібного закріплення сумісойл не дає, хоча весь об'єм ґрунту був просочений його розчином. Міцність просоченого розчином ґрунту склала 0,1 МПа (запроектована міцність 1,5 МПа). Ґрунти, закріплені карбамідною смолою, мали міцність від 1,5 до 3 МПа. Проведені досліді показали, що Радянський Союз мав у своєму розпорядженні набагато ефективніші способи закріплення ґрунтів, які забезпечують їх високу міцність. Необхідність у придбанні дорогого препарату (1 кг сумісойлу коштував 2 дол.) відпала.

**Франція.** Хімічне закріплення ґрунтів у Франції досягло високого рівня. Ця країна має у своєму розпорядженні спеціалізовану фірму із закріплення ґрунтів – «Солетанш» з добре оснащеною лабораторією і експериментальним полігоном. У 1967 р. у Франції опублікована капітальна праця Г. Камбефора «Принципи і методи ін'єкції ґрунтів», що узагальнювала теоретичні та експериментальні дослідження із закріплення ґрунтів у Франції, а також практичне застосування способів закріплення ґрунтів. Перший том цієї праці був виданий в СРСР. Г. Камбефор, розглядаючи питання про ін'єктування в ґрунти істинних розчинів, виділяє два методи ін'єкції. Один з них викликає миттєве утворення міцного гелю, який використовується для консолідації ґрунтів, – силікат і його реагент починають контактувати у ґрунті (метод Іостена). При другому методі первинна суміш силікату з реагентом у заздалегідь визначений термін утворює або еластичну масу, що дозволяє забезпечити тільки водонепроникність ґрунтів (методи Лемера, Дюмона, Гайрарда, Родіо), або міцний гель, призначений для консолідації ґрунтів (методи французьких фірм «Солетанш» і «Нобель-Бозель» і американської фірми «Алкалів»).



Метод Іостена автор називає методом роздільної ін'єкції. До неї належить і метод Франсуа, запатентований у 1911 р., за яким силікагель використовується для того, щоб поліпшити ін'єкцію цементу в пористі скельні породи. Як коагулянт розчину силікату натрію застосовується або сірчаноокислий алюміній, або фосфорна кислота. Сам Камбефор провів безліч досліджень силікатних гелеутворюючих розчинів з використанням як коагулянтів силікату натрію таких реагентів:  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{NaAlO}_2$ ,  $\text{NaHCO}_3$  і  $\text{HCl}+\text{CuSO}_4$ .

До 1957 р. лабораторії французьких фірм «Солетанш» і «Нобель-Бозель», а також американської фірми «Алкалів» розробили нову рецептуру силікатного розчину, засновану на застосуванні як коагулянта етилацетату («Солетанш»), гліксолу («Нобель-Бозель») і формаміду («Алкалів»). Найбільш дешевий і доступний розчин з етилацетатом, завдяки чому він одержав досить широке застосування в практиці. При введенні етилацетату відбувається реакція, що вивільняє кислоту і спирт, які і коагулюють силікат натрію. Міцність ґрунту, закріпленого цим розчином, складає 3 МПа. В'язкість розчину висока – 100 мПа·с, тому тиск при нагнітанні необхідний такий саме, як в методі Іостена. Однак в'язкість може бути знижена додаванням 30÷40 % води. Міцність при цьому зменшується до 1,6 МПа.

При виконанні невеликих обсягів робіт із закріплення ґрунту (реставрація бетону, що розтріскався в спорудах, закладання анкерів і т. п.) застосовують епоксидні смоли. Карону вдалося одержати розчини на основі цих смол з в'язкістю від 3 до 15 мПа·с. Час їх гелеутворення складає від декількох хвилин до 10 год. Значний внесок у розвиток теорії закріплення ґрунтів зробили роботи Карона, викладені в його книзі «Фізико-хімічні дослідження силікагелів». Автором вивчалися процеси повільного перетворення розчиненого силікату в стійкий гель під впливом мінеральних і органічних реагентів. Були вивчені чинники, що впливають на швидкість гелеутворення, хімічні і механічні властивості гелів і т. п.

М. Дюр'є в статті про нові методи підвищення стійкості і водонепроникності ґрунтів зазначає, що разом з методами тампонування у Франції застосовуються електроосмотичне осушення, електрохімічне закріплення і заморожування ґрунтів.

Як приклади практичного застосування тампонажних розчинів – алюмо- і глиносилікатних можна назвати створені за їх допомогою протифільтраційні завіси на греблях Сер-Пенсон (1952÷58), Фесенхейм (1958÷60), Нотр-Дам де Камье (1961÷1962 рр.), Лак-Наур і Гарстейм.

При проходці однієї з шахт для закріплення водонасиченого піщаного шару потужністю 10 м, що залягає на глибині 18÷28 м, були застосовані два розчини: силікат і смола. Закріплення силікатним розчином проводилося з відмітки 12 м і здійснювалося на глибину до 28 м, а нагнітання смоли здійснювалося у міру проходки шахти на рівнях 18 і 23 м. У результаті шахта була пройдена в міцно закріпленому водонепроникному ґрунті. Роботи велися фірмою «Солетанш».

Великий обсяг робіт із закріплення ґрунтів був виконаний у ході будівництва станції Обер у Парижі на швидкісній лінії Схід-Захід. Односклепінчаста станція Обер розташована в центрі Парижа і входить до пересадкового комплексу. Глибина закладання станції (17,6 м до шелиги склепіння) визначалася, з одного боку, положенням вищерозташованих виробок діючого метрополітену, а з іншого – необхідністю розташування опорних стін несучого склепіння на надійній ґрунтовій основі, представленій шарами міцного вапняку лютеційського ярусу середнього еоцену. Ці шари знаходилися на глибині 33÷35 м від поверхні землі. Вище за шари вапняку (18÷19 м) залягали слабкі водопроникні мергелі з окремими включеннями міцнішого матеріалу. Рівень ґрунтових вод розташовувався на глибині 18,2 м від поверхні землі. Таким чином, вся станція закладена в слабких водопроникних ґрунтах і нижче за рівень ґрунтових вод. Крім того, наявність великої кількості експлуатованих будівель і підземних комунікацій потребувала недопускання осідання земної поверхні. Все це зумовило необхідність застосування в процесі будівництва хімічного закріплення ґрунтів.

Значний інтерес являє не тільки конструкція станції, але і спосіб виробництва робіт. Хімічне закріплення ґрунтів виконувалося в такій послідовності. Спочатку була пройдена штольня II перерізом в світлі 2,6×3,2 м з металевим кріпленням (рис. 3.35). Штольня була закладена по осі станції вище за рівень ґрунтових вод, приблизно на позначці шелигі майбутнього

несучого склепіння. Потім з пройденої на всю довжину станції осьової штольні за допомогою спеціального устаткування були пробурені віялові свердловини у напрямі майбутніх п'ят склепіння і з них нагнітався глиноцементний розчин для закріплення й осушення ґрунту в областях III. Далі в закріпленому ґрунті споруджувалися дві бічні штольні IV також з металевим кріпленням і обтисканням «верхняків» у породу. З пройдених штолень проводилося пробурювання товщі ґрунту, що оточує станцію, і його закріплення.

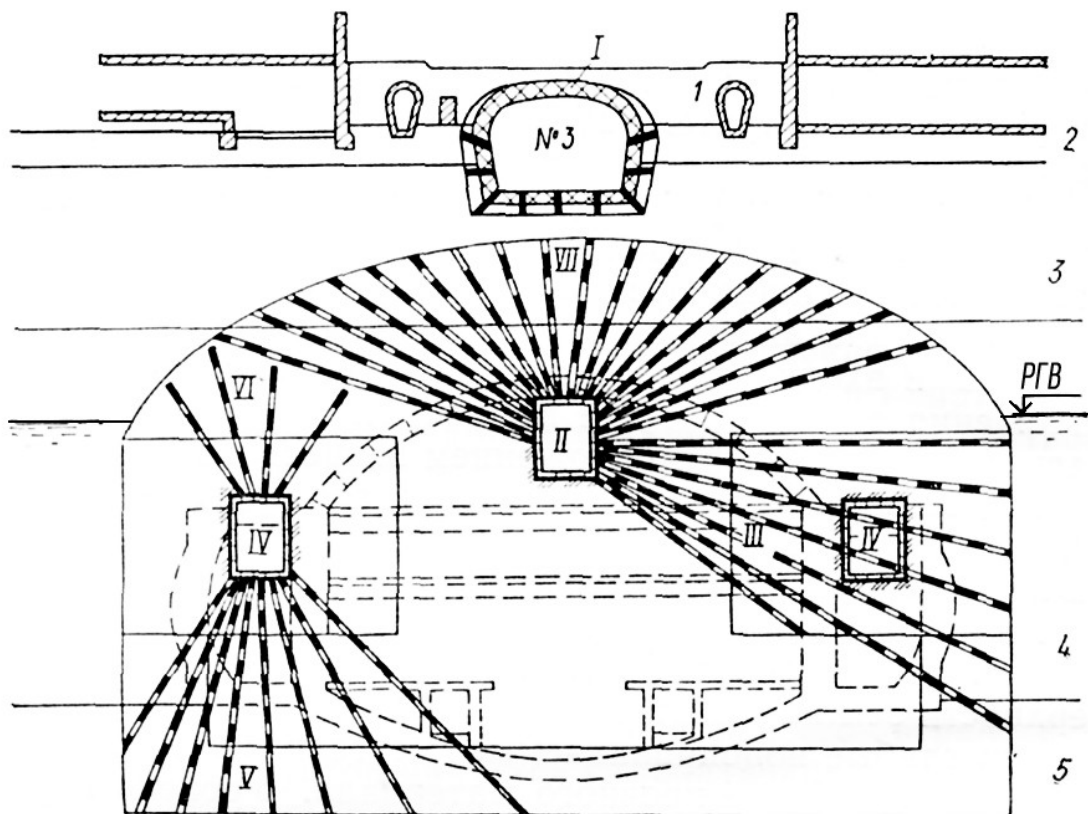


Рис. 3.35. Закріплення ґрунтів при будівництві станції Обер у Парижі:

- 1 – наносні відкладення; 2 – сучасні алювіальні відкладення;  
 3 – давньоалювіальні відкладення; 4 – мергелі з включенням щебеню;  
 5 – вапняки лютеційського ярусу

Надсклепінна частина VI–VII закріплювалася силікагелем з добавками синтетичних смол для отримання достатньо міцного несучого склепіння із закріпленого ґрунту (з міцністю 2,0–2,5 МПа), а в нижні шари міцного вапняку, розташованого

під подошвою опорних стін (область V), ін'єктувався тільки глинистий розчин для створення водонепроникної завіси. Штольня була закладена по осі станції вище за рівень ґрунтових вод, приблизно на позначці шелигі майбутнього несучого склепіння. Потім з пройденої на всю довжину станції осьової штольні за допомогою спеціального устаткування були пробурені віялові свердловини у напрямі майбутніх п'ят склепіння і з них нагнітався глиноцементний розчин для закріплення й осушення ґрунту в областях III. Далі в закріпленому ґрунті споруджувалися дві бічні штольні IV також з металевим кріпленням і обтисканням «верхняків» у породу. З пройдених штолень проводилося пробурювання товщі ґрунту, що оточує станцію, і його закріплення. Надсклепінна частина VI–VII закріплювалася силікагелем з добавками синтетичних смол для отримання достатньо міцного несучого склепіння із закріпленого ґрунту (з міцністю 2,0–2,5 МПа), а в нижні шари міцного вапняку, розташованого під подошвою опорних стін (область V), ін'єктувався тільки глинистий розчин для створення водонепроникної завіси. Таким чином, у результаті комплексу підготовчих робіт, що здійснювалися протягом 1,5 років, ґрунт навколо майбутньої станції був надійно закріплений. Це дозволило повністю виключити пониження існуючого рівня ґрунтових вод і запобігти осіданням поверхні землі. Ін'єктування в ґрунт хімічних розчинів під тиском дещо підняли поверхню землі (приблизно на 15 мм). Загальний термін будівництва станції Обер склав 5,5 років, включаючи підготовчі роботи із закріплення ґрунтів.

Виконані роботи характеризувалися такими показниками: об'єм закріпленого ґрунту - 180000 м<sup>3</sup>; загальна довжина ін'єкційних труб - 90000 м; об'єм введеної глиноцементної суміші - 16000 м<sup>3</sup>; об'єм силікагелю - 5500 м<sup>3</sup>; об'єм синтетичних смол - 2000 м<sup>3</sup>. Ін'єкційні роботи були автоматизовані.

**Угорщина.** Для закріплення ґрунтів в Угорщині широко використовують силікат натрію, для затвердіння якого застосовують вуглекислий газ, чотирифтористий кремній і кислий вуглекислий амоній. Прикладом практичного застосування рецептури силікату натрію і NH<sub>4</sub>НСО<sub>3</sub> може служити закріплення амонійно-силікатним розчином ґрунту при відновленні будапештського моста «Єлизавета». Один з робочих

котлованів був захищений з трьох боків забитим шпунтом, а з четвертого боку закріплений шляхом ін'єктування такого гелеутворюючого складу: 47,4 % розчину силікату натрію густиною 1,19 г/см<sup>3</sup>, 1,6 % кислого вуглекислого амонію, 51 % води (за об'ємом). Міцність закріпленого ґрунту склала 0,28 МПа. Коефіцієнт фільтрації в результаті закріплення знизився з 10<sup>-2</sup> до 2·10<sup>-5</sup> см/с, тобто в 500 разів. Останнім часом в Угорщині одержав застосування і спосіб газової силікатизації.

**Румунія і Польща.** У цих країнах досить широко застосовують метод електросилікатизації. Прикладами практичного застосування електросилікатизації в Румунії можуть служити:

- закріплення лесового ґрунту під фундаментами колон на одному з промислових підприємств у зв'язку з їх осіданням. Витрата силікату натрію густиною 1,11 г/см<sup>3</sup> склала 140 л/м<sup>3</sup>. Електричний струм пропускали протягом 24 год. Несуча здатність ґрунту після закріплення зростає більш ніж у 2 рази;

- закріплення лесу під водонапірною баштою, яка через одностороннє замочування ґрунту піддалася осіданням. Глибина закріплення під подошвою фундаменту - 4 м, тривалість електрообробки - 24÷48 год, витрата електроенергії - близько 20 кВт-год на 1 м<sup>3</sup> ґрунту;

- закріплення водонасиченого ґрунту при проходці похилої шахти. Робота проводилася в надто скрутних ґрунтових умовах при натиску води до 30 м.

У Польщі електросилікатизацією закріплюють дрібні піски і мулисті ґрунти. Прикладами виробничого застосування цього способу тут можуть служити:

- закріплення ґрунту під фундаментами старовинного замку, побудованого у XV ст. Об'єм закріплення склав 2600 м<sup>3</sup>, витрата силікату натрію – 190 т, витрата розчину хлористого кальцію – 40 т;

- електросилікатизація ґрунтів для забезпечення стійкості промислової будівлі, усередині якої потрібно було відрити котлован і закласти фундамент на глибину, значно більше глибини існуючого фундаменту. Об'єм закріплення склав 2200 м<sup>3</sup>. На 1 м<sup>3</sup> закріпленого ґрунту було витрачено 175 л розчину силікату натрію, стільки ж хлористого кальцію і 32 кВт-год електроенергії;

- закріплення ґрунту на декількох ділянках траси метрополітену у Варшаві при проходці через різномірні дрібнозернисті ґрунти. Загальний об'єм закріплення склав 2500 м<sup>3</sup>.

### **3.3. Застосування високонапірної ін'єкції**

Опис технології методу найдоцільніше подати на конкретному прикладі. Одним з них є забезпечення безпеки подальшої експлуатації чотирьох житлових будинків у м. Білефельді (Німеччина), де при прокладенні під цими будівлями транспортної магістралі у вигляді подвійного тунелю шириною 25 м і висотою 6 м був успішно застосований метод високонапірної ін'єкції (рис. 3.36). Внаслідок спорудження цієї транспортної магістралі під житловими будинками, враховуючи вид і стан ґрунту, осідання фундаментів у зоні проходження тунелю, за прогнозами, могли скласти від 40 до 50 мм. Нерівномірні осідання фундаментів у такому діапазоні могли призвести до істотних дефектів і пошкоджень розташованих вище будівель. Для забезпечення подальшої безпечної експлуатації цих будинків максимальне просідання сусідніх стін будівель не повинно було перевищувати 5 мм, що і було досягнуто за рахунок застосування фірмою KELLER, яка виконувала ці роботи, методу високонапірної ін'єкції.

При застосуванні високонапірної ін'єкції відбувається сильне розтиснення ґрунту в конкретних місцях за рахунок направленою цільового нагнітання в'язучого матеріалу з мережі ін'єкційних труб, який перед початком робіт «вдавлюється» в ґрунт з розташованої поряд з будівлею (і спеціально для цієї мети спорудженої) шахти. Розміри її дозволяють створити під будівлею з шахти мережу вентильних труб і забезпечити безпечну роботу в шахті обслуговуючого персоналу (рис. 3.37).

Кількість шахт для розміщення ін'єкційного устаткування визначається залежно від розмірів будівлі або групи будівель. У випадку, що розглядається як приклад, для виробництва робіт було споруджено дві шахти. З однієї з них здійснювалися роботи з ін'єктування ґрунту під будинками № 21 і 25 по August-Bebel-Strasse, а з іншої – під будинками № 20 і 22 (рис. 3.38). Для установки ін'єкційних труб з шахти і подальшого розкочування пакерного шланга використовується спеціальне устаткування (рис. 3.39).

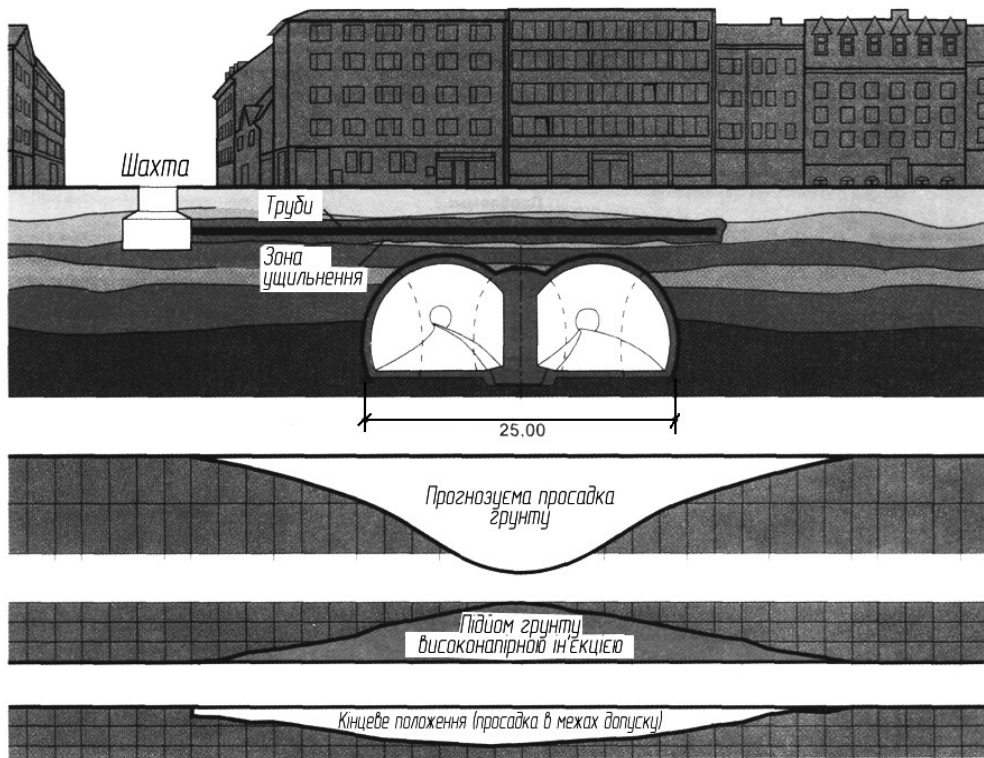


Рис. 3.36. Застосування методу високонапірної ін'єкції при прокладенні транспортного тунелю під житловими будинками у м. Білефельді



Рис. 3.37. Спорудження мережі ін'єкційних труб під будівлею із спорудженої шахти

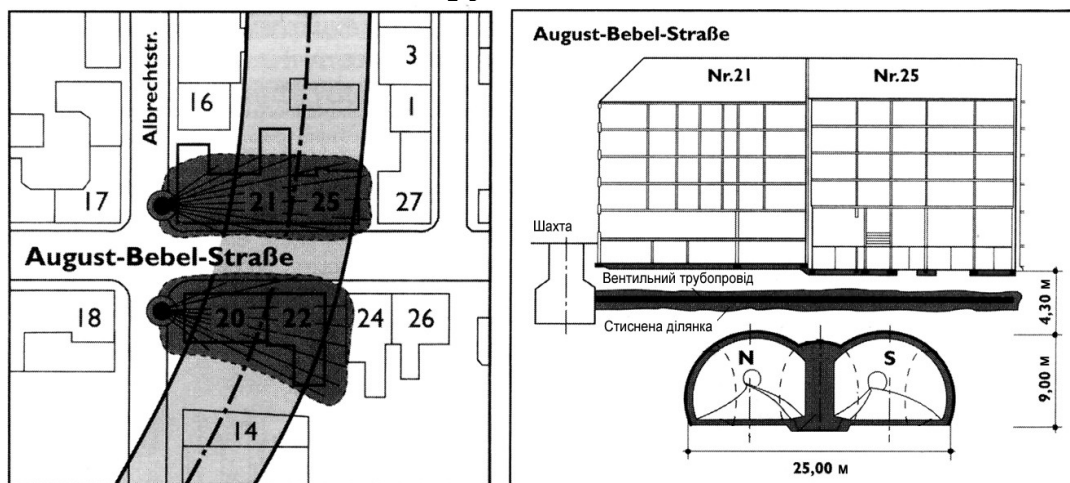


Рис. 3.38. Схема розташування шахт і мережі труб для ін'єкції і схематичне розташування тунелю під будинками №№ 21 і 25

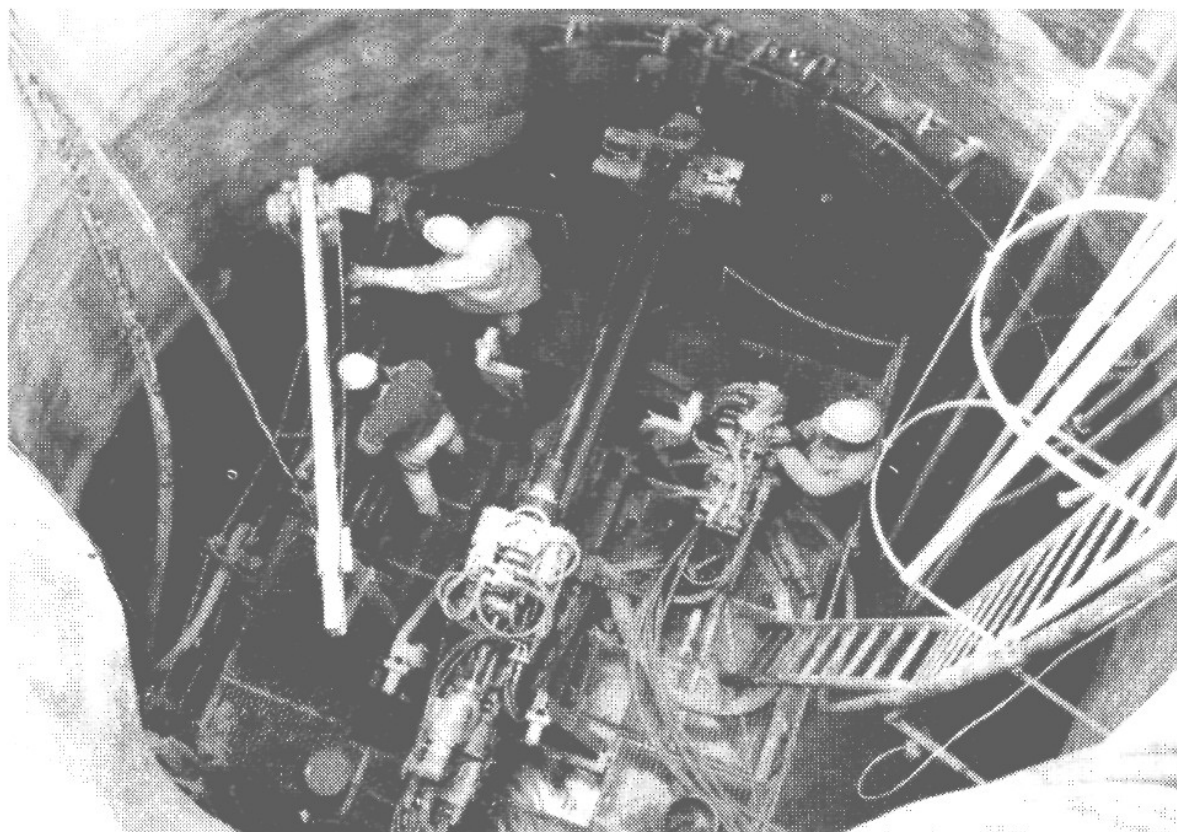


Рис. 3.39. Встановлення сталевих манжетних труб завдовжки 46 м з шахти поряд з будинком № 20



Після спорудження допоміжної шахти поряд з будівлями з шахти в ґрунті споруджується мережа сталевих або пластикових труб різної довжини, які через кожні 33-50 см обладнані вентиляними отворами (рис. 3.40). Ці труби споруджують так, щоб на кожен квадратний метр у площині, що ін'єктується, була достатня кількість вентиляних отворів (рис. 3.41).

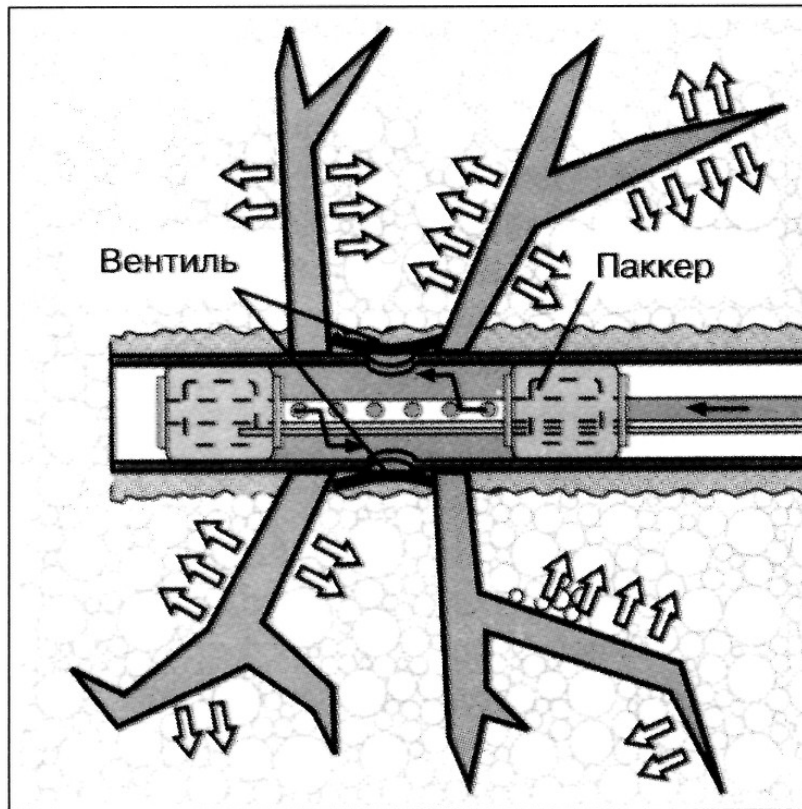


Рис. 3.40. Схема роботи пакера, що здійснює цільову ін'єкцію у визначеному місці через обладнану вентилями трубу

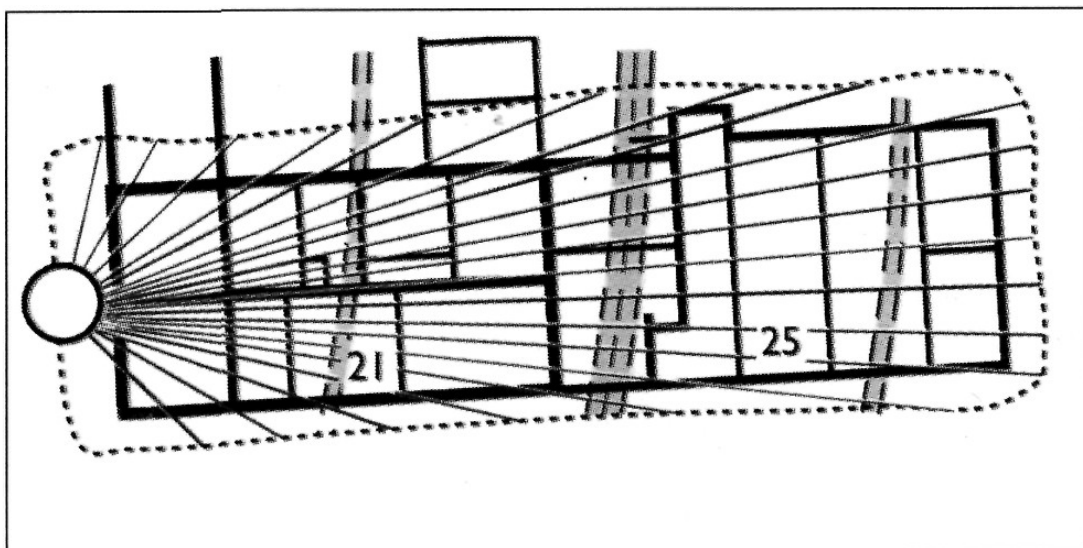


Рис. 3.41. Спорудження мережі ін'єкційних труб для забезпечення  
 можливості направленої подачі матеріалу, що ін'єктується,  
 у необхідному місці в площині розташування мережі труб

Після спорудження мережі труб для ін'єкції пакер, що  
 переміщається в тілі ін'єкційної труби під заданим тиском,  
 здійснює перший етап ін'єкції матеріалу в різних точках по всій  
 площині зміцнюваного масиву. Принципова схема подачі  
 матеріалу, що ін'єктується, у заданих певних точках показана на  
 рис. 3.42.

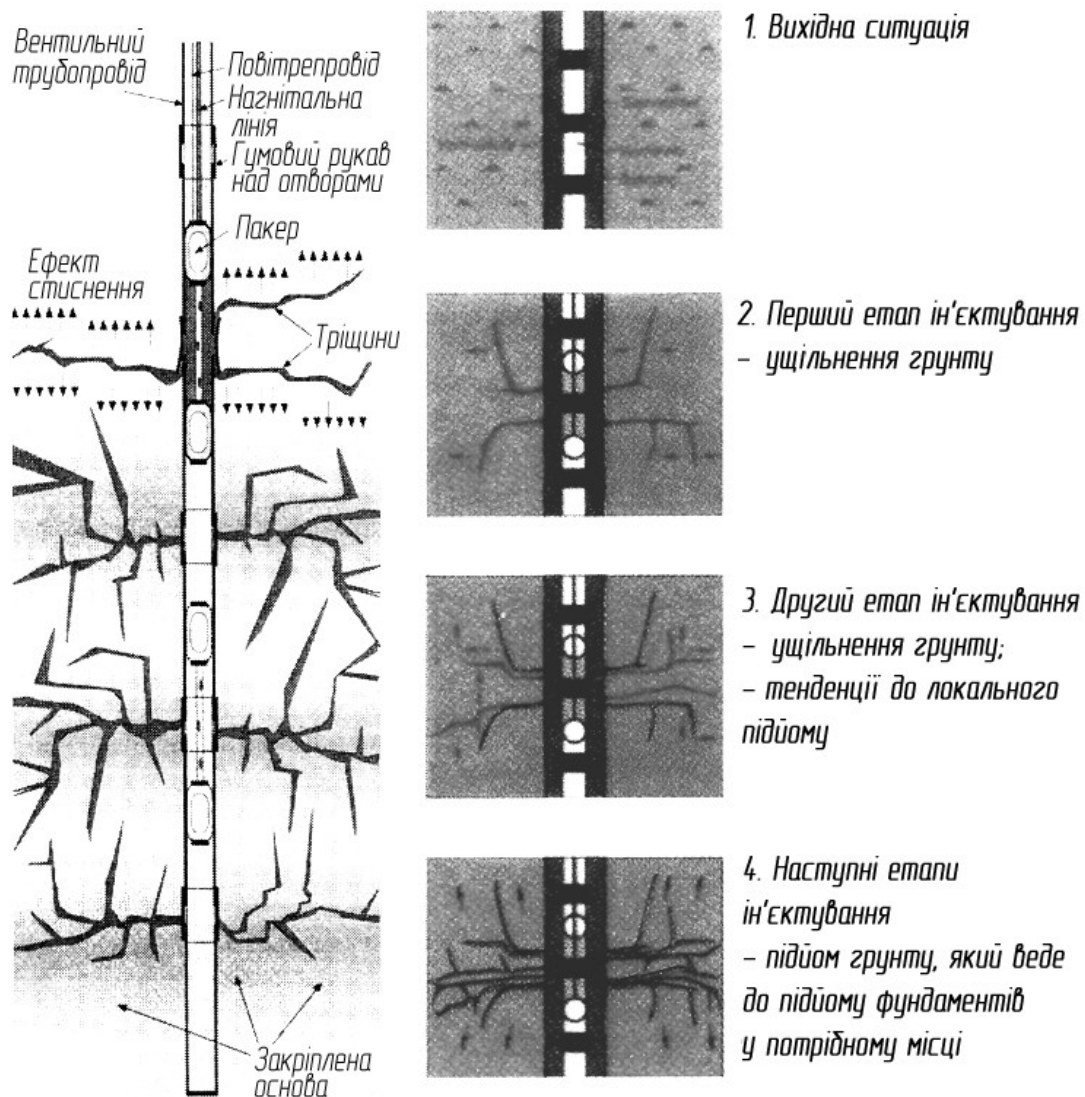


Рис. 3.42. Принципова схема методу  
 направленої високонапірної ін'єкції

Ін'єкція здійснюється звичайно в декілька етапів, що чергуються між собою паузами для тужавіння матеріалу, що ін'єктується. Тиск матеріалу, що ін'єктується, кількість і рецептура матеріалу, а також паузи між окремими етапами ін'єкції залежать від поставленого завдання, виду і стану ґрунту, а також від властивостей матеріалу, що ін'єктується. Для досягнення тенденції підняття вищерозташованого шару ґрунту ін'єктування здійснюється в 3 і більше етапів. Щоб контролювати процес ін'єктування і зміни положення окремих будівельних конструкцій, застосовують спеціальні електронні рівні, здатні реєструвати перекося 1/100 мм/м. Усі дані надходять до комп'ютера, який управляє процесом ін'єктування, результати вимірювань роздруковуються для їх контролю (рис. 3.43 і 3.44).

Максимальні осідання складають менше 10 мм, що в межах допустимого. Осідання ґрунту контролювалися на всіх етапах зведення тунелю і поетапного ін'єктування і тим самим було забезпечене збереження і безпека вищерозташованих будівель.

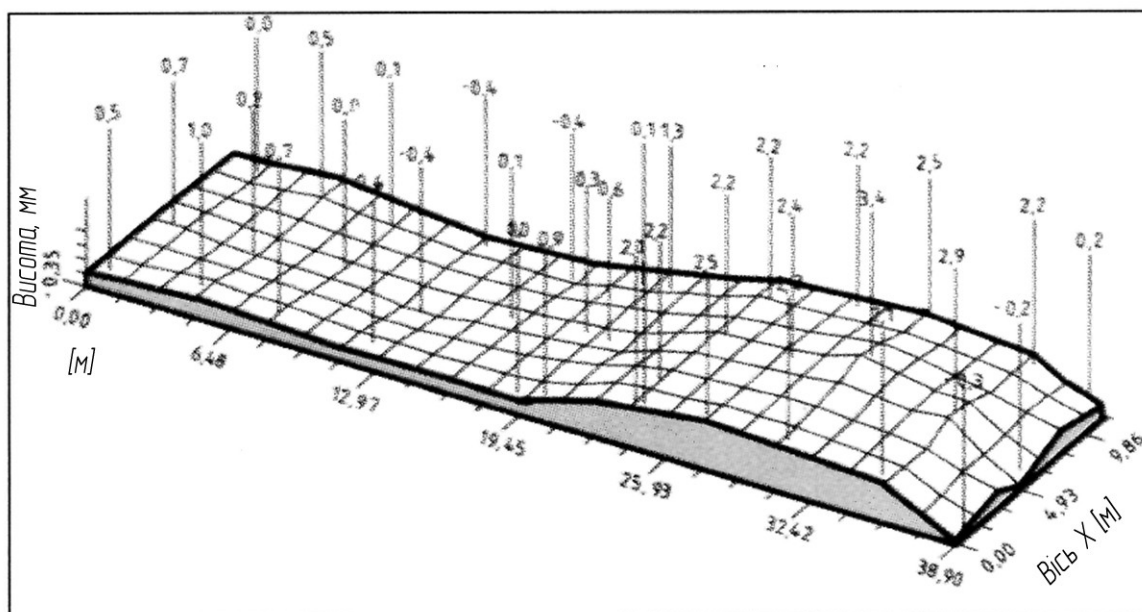


Рис. 3.43. Відносна зміна положення ґрунту після першого етапу ін'єктування (до початку робіт із прокладення тунелю)

під будинками №№ 21 і 25)

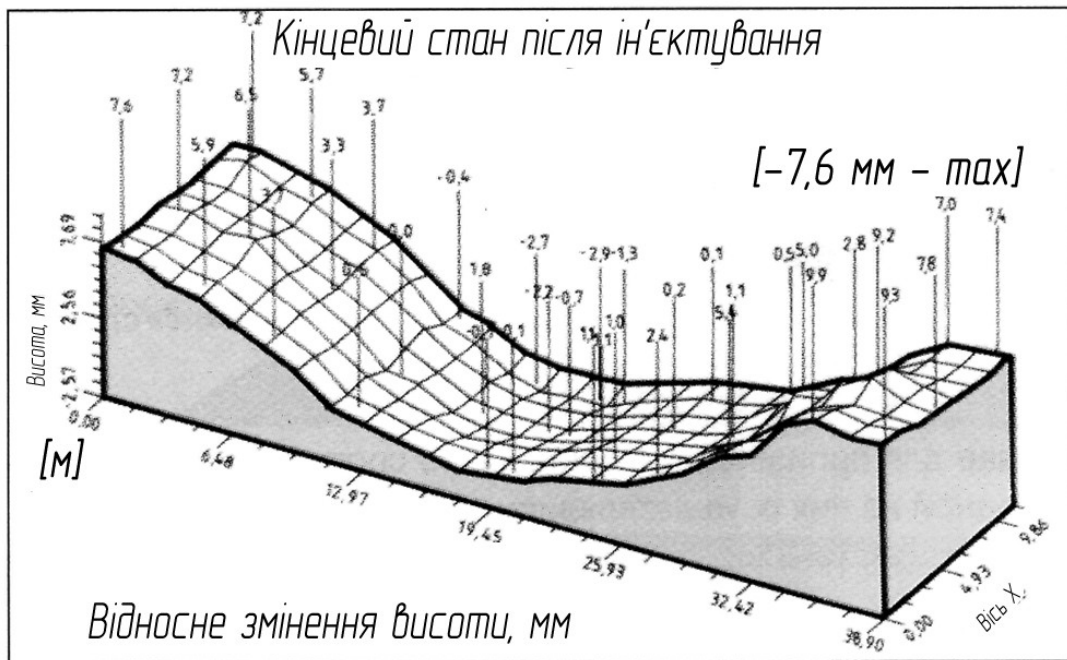


Рис. 3.44. Положення ґрунту після останнього етапу ін'єктування (після завершення робіт із прокладення тунелю під будинками №№ 21 і 25)

### 3.4. Застосування струминної технології зміцнення основ

#### 3.4.1. Досвід виробництва робіт

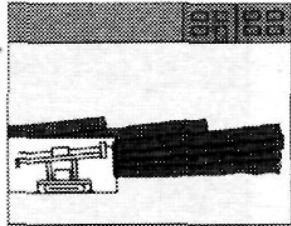
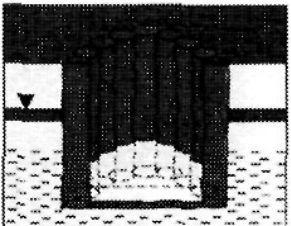
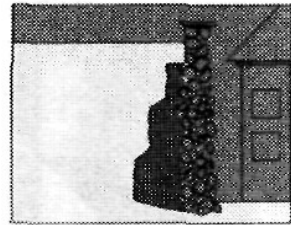
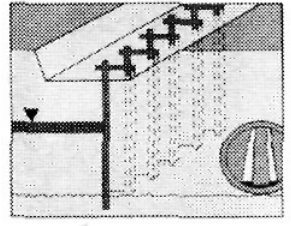
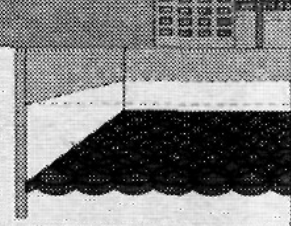
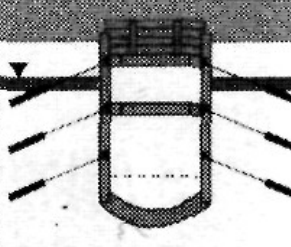
Досвід німецької фірми KELLER Grundbau GmbH нараховує більше 20 років. За допомогою методу струминної технології зміцнення ця фірма вирішує найрізноманітніші завдання (табл. 3.2).

Таблиця 3.2

Галузі застосування струминної технології із закріплення основ

<p><b>Безпечне спорудження основ тунелів в умовах міської забудови.</b> При прокладенні тунелів у ґрунтах з малою міцністю дозволяє створити міцну і водонепроникну основу. Незмінне положення тунелю в процесі його експлуатації дозволить уникнути просідань розташованих над ним будівель</p>	
--	--

Продовження табл. 3.2

<p><b>Прокладення тунелів під будівлями.</b> Створення ґрунтоцементних масивів у горизонтальній площині підвищує безпеку роботи в умовах міської забудови, виключає просідання розташованих вище будівель</p>	
<p><b>Спорудження шахт і котлованів в умовах міської забудови.</b> Спорудження шахт і котлованів, у тому числі значної глибини, із ґрунтоцементних паль найдоцільніше в умовах, коли необхідно забезпечити водонепроникність стінок без струсів при проведенні робіт</p>	
<p><b>Укріплення підпірних стін.</b> В умовах міської забудови укріпити підпірні стіни можна за допомогою статично розрахованого ґрунтоцементного масиву, розвантаживши стіну</p>	
<p><b>Створення водотривких стін.</b> В умовах міста – з численними перетинами різних комунікацій – при розробці ґрунту нижче за рівень ґрунтових вод часто вдаються до різних способів їх ізоляції, у тому числі створенням водотривких стін</p>	
<p><b>Спорудження водонепроникної підшови фундаменту.</b> Основу фундаменту будівлі можна виконати на визначеній розрахунками глибині із ґрунтоцементних масивів, які взаємоперетинаються і створюють під фундаментами суцільний водонепроникний шар</p>	
<p><b>Спорудження основи шахт.</b> При улаштуванні глибоких вузьких котлованів і шахт в умовах міської забудови необхідна міцна основа, щоб вона не тільки протидіяла тиску води, але і була водонепроникною. Ґрунтоцементний масив у вигляді перевернутого склепіння успішно виконує ці завдання</p>	

Продовження табл. 3.2

<p><b>Спорудження захисного горизонтального герметичного шару.</b> Будівництво будівель і споруд, експлуатація старих підземних комунікацій, звалища побутових і промислових відходів можуть являти собою серйозну небезпеку для ґрунтових вод. Герметичний ґрунтоцементний масив захистить ґрунтові води від забруднення</p>	
<p><b>Герметизація стиків між буронабивними палями.</b> При спорудженні котлованів з буронабивними палями по контуру виїмки герметизація стіни із палей досягається улаштуванням ґрунтоцементних палей відразу за буронабивними</p>	
<p><b>Улаштування отворів у водотривких стінах.</b> Водотривкі стіни – це споруди, які часто використовуються тимчасово. Пробивання «вікон» у них може бути здійснено устаткуванням, яке використовується для спорудження ґрунтоцементних масивів</p>	

### 3.4.2. Сутність технології проведення робіт

Комплект обладнання для улаштування ґрунтоцементних палей струминною технологією складається з установки, змішувача, насоса, ємності для води, компресора і необхідного бурильного устаткування. Умовно технологічний процес можна розділити на 4 етапи (рис. 3.45): 1 – буріння; 2 – різання; 3 – створення масиву; 4 – розширення масиву.

**1 етап.** Бурять свердловину діаметром 40 ÷ 89 мм на проектну глибину з одночасним зануренням устаткування. Спосіб буріння свердловини залежить від виду і стану ґрунту.

**2 етап.** За допомогою горизонтального ріжучого струменя води або суспензії з додаванням повітря (або без нього) під

високим тиском (100÷400 бар) і під кутом 90° до осі буріння здійснюється різання і спучення ґрунту навколо свердловини. Різання і спучення ґрунту починають з найглибшого місця. Частоту обертання форсунки і підйом регулюють залежно від поставленого завдання, параметрів ін'єкційного розчину і виду ґрунту. Спучений ґрунт, розрізаний струменем із суміші, може частково вимиватися на поверхню.

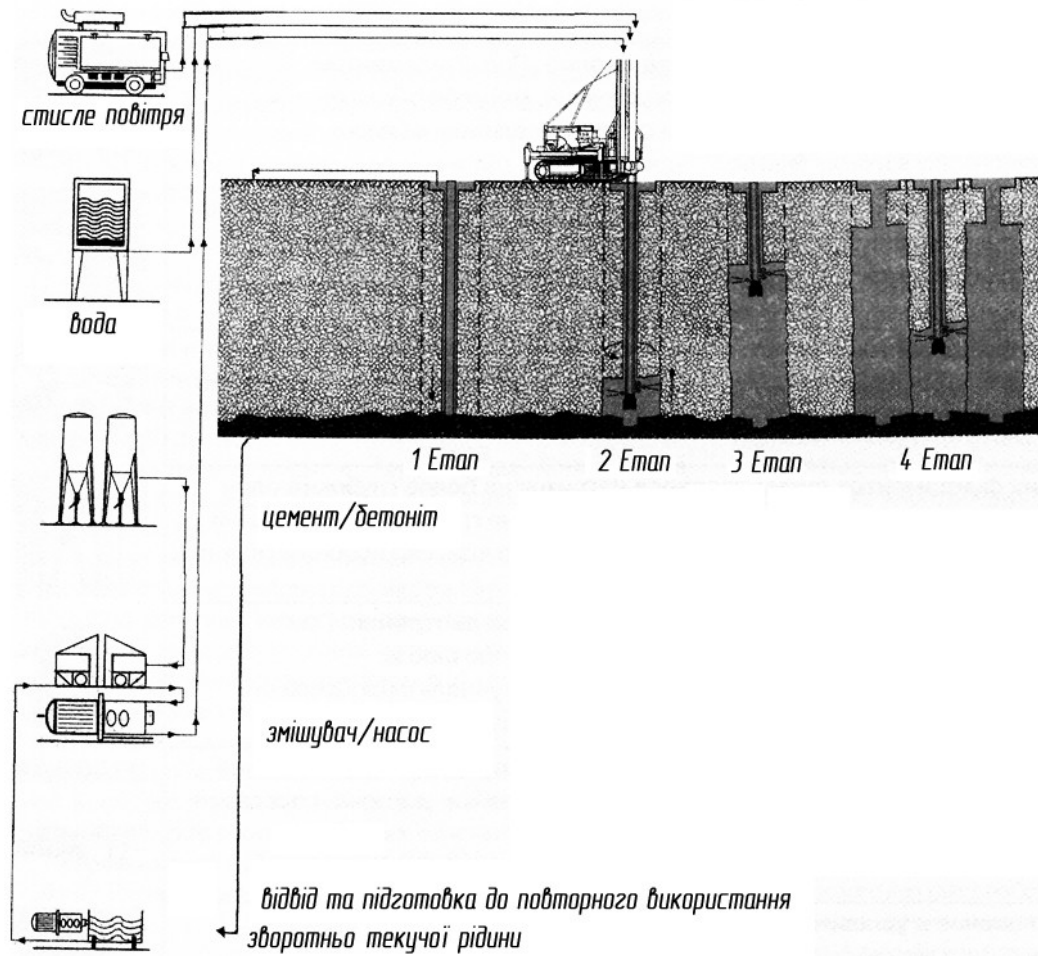


Рис. 3.45. Основні етапи струминної технології

**3 етап.** Одночасно з різанням і розмивом ґрунту здійснюється його змішування з цементною суспензією або цементно-глиняною суспензією (з добавками до 5 % від маси цементу бентонітового глинопорошку). При обертанні бурового інструменту відбувається інтенсивне перемішування, завдяки цьому після затвердіння утворюється однорідний

грунтоцементний масив у формі колони або палі щільністю  $1,4 \div 1,9 \text{ т/м}^3$ .

**4 етап.** Грунтоцементні масиви різної форми можуть з'єднуватися і комбінуватися між собою різним чином. Причому створення «сусіднього» масиву може здійснюватися як до набору міцності поряд розташованого масиву, так і після. Послідовність виготовлення елементів масиву залежить від виду споруди і поставлених завдань.

Цей метод має мало спільного з описаними в інших розділах ін'єкційними методами, хоча в деяких літературних джерелах цей метод інколи помилково називають високонапірною ін'єкцією. Ін'єкційні методи передбачають нагнітання розчинів у ґрунт під тиском в існуючі в ґрунті пори і пустоти або в пустоти, утворені за рахунок розриву шарів ґрунту при власне високонапірній ін'єкції (п. 3.3). При спорудженні ж ґрунтоцементних паль струминною технологією руйнується існуюча структура ґрунту, ґрунт спучується і змішується з цементною суспензією. Після тужавіння суспензії утворюється гомогенний ґрунтоцементний масив.

Грунтоцементні палі споруджуються трьох типів (рис. 3.46). Вибір одного з методів виробництва робіт залежить від властивостей і виду ґрунту, форми і необхідної якості ґрунтоцементного масиву.

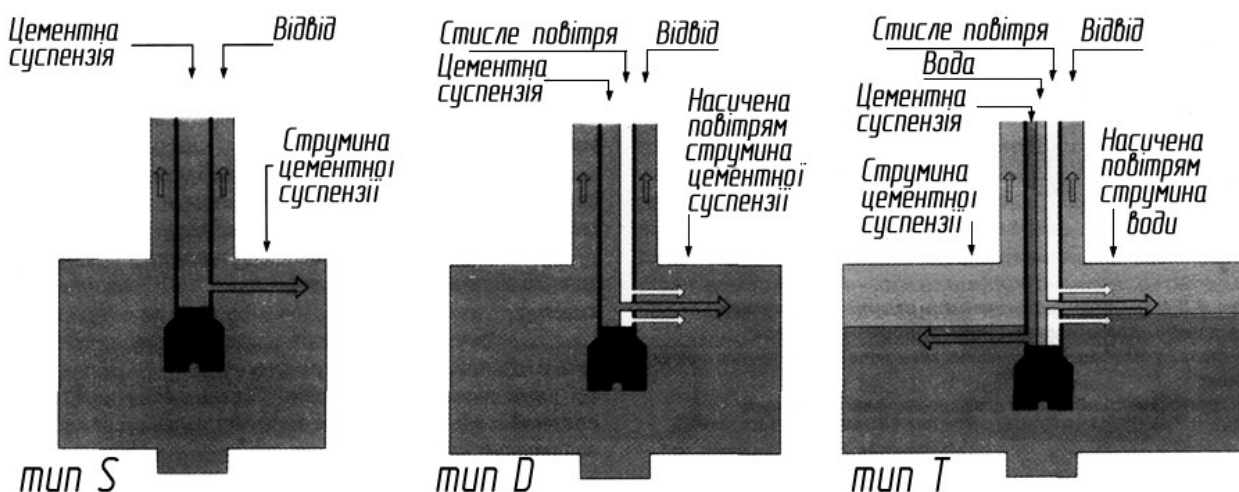


Рис. 3.46. Типи паль



1. **Тип S.** Цей тип ґрунтоцементних паль споруджується при одночасному розрізанні і спученні ґрунту і подачі струменя суспензії під тиском 200÷400 бар без подавання в свердловину стиснутого повітря. Цей принцип виготовлення ґрунтоцементних паль застосовується в тих типах ґрунтів, які легко розмиваються, і при невеликих і середніх діаметрах споруджуваних паль.

2. **Тип D.** Цей тип ґрунтоцементних паль споруджується при одночасному розрізанні і спученні ґрунту і подачі струменя суспензії під тиском 200÷400 бар. Для збільшення сили розмивання ґрунту здійснюється додаткова подача в свердловину стиснутого повітря. Цей принцип виготовлення ґрунтоцементних паль застосовується при спорудженні «плоских» вертикальних стін, масивів для переобпирання фундаментів, а також при улаштуванні водонепроникної основи в слабко- і середньорозмиваних ґрунтах.

3. **Тип T.** При улаштуванні цього типу ґрунтоцементних паль ґрунт розмивається струменем води під тиском 300÷400 бар. Через додаткову форсунку, розташовану під водяною, одночасно подається цементна суспензія під тиском не менше 15 бар. Цей принцип виготовлення ґрунтоцементних паль застосовується при спорудженні масивів для переобпирання фундаментів, а також при улаштуванні водонепроникної основи і стін.

### ***3.4.3. Існуючі форми ґрунтоцементних масивів***

ґрунтоцементні палі залежно від певної швидкості і напрямку руху робочого ін'єкційного інструменту можуть мати такі форми (рис. 3.47):

1) піднімання ін'єкційного інструменту без його обертання дає вертикальний «плоский» ґрунтоцементний масив (при використанні одного сопла і двох «площин»; при використанні двох сопел);

2) піднімання і повороти ін'єкційного інструменту в певній площині дають «напівкруглу» форму перерізу ґрунтоцементного масиву;

3) піднімання й обертання ін'єкційного інструменту дають «круглий» переріз ґрунтоцементного масиву.

Комбінація цих форм може будь-яким чином перетинатися і мати будь-яку необхідну висоту. Таким чином, за рахунок перетину ґрунтоцементних паль можна створити ґрунтоцементний масив будь-якої форми і будь-яких розмірів.

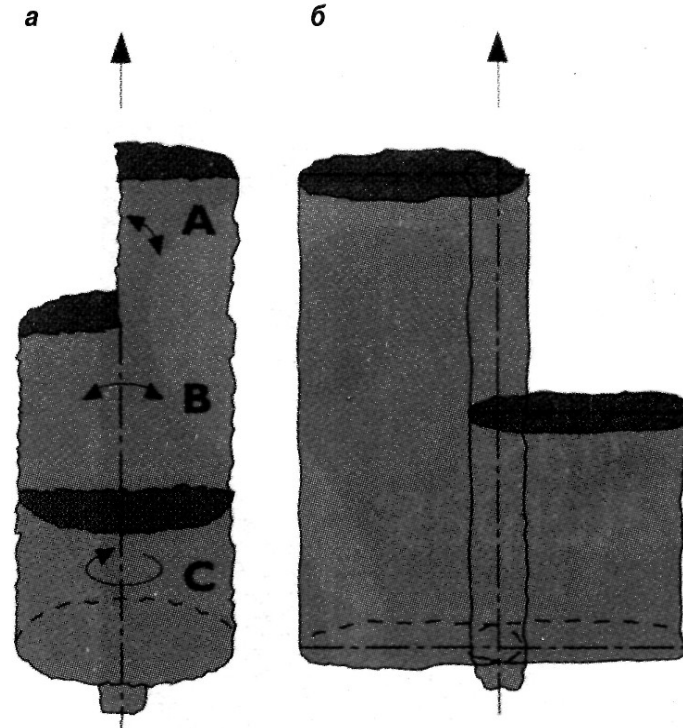


Рис. 3.47. Схема утворення різних перерізів ґрунтоцементного масиву:

*a* – палі; *б* – «плоскої» вертикальної стіни; А – переріз «чверть кола»; В – переріз «півколо»; С – переріз «коло»

### Контрольні питання

1. Коли виникає необхідність у закріпленні ґрунту під фундаментами існуючих будівель?
2. У чому полягає технологія підведення фундаменту з хімічно закріпленого ґрунту?
3. Описати сутність способу ліквідації обдимання ґрунтів.
4. Назвати мету створення водонепроникної стіни при розкритті котлованів.
5. Назвати мету закріплення ґрунтів перед проходкою підземних виробок.

6. Назвати мету електроосушення ґрунтів.
7. Описати принцип улаштування протифільтраційних завіс.
8. Описати сутність методу високонапірної ін'єкції.

## 4. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДСИЛЕННЯ ФУНДАМЕНТІВ

### 4.1. Удосконалені традиційні способи

Останніми роками відбувається обґрунтована відмова багатьох фахівців від використання більшої частини хімічних реагентів, за винятком традиційно вживаних силікатів (одно- і дворозчинна силікатизація). Багато в чому це визначається появою нових сучасних технологій підсилення основ і фундаментів. Традиційні технології, пов'язані з розширенням підшви фундаментів, на сучасному етапі можуть бути трансформовані таким чином. На рівні підвалу встановлюють залізобетонну плиту 2 (рис. 4.1), закріплену в тілі фундаменту. Щоб плита надійно включалася в роботу, під неї можна ін'єктувати цементний розчин для опресовування верхніх шарів ґрунту. Такий спосіб підсилення був успішно реалізований на житловому будинку по пров. Большеохтинському 31, слабкі ґрунти в основі якого не забезпечували сприйняття навантажень від існуючих фундаментів. Підведення плити дозволило запобігти розвитку нерівномірних осідань і зберегти будівлю. Якщо несучої здатності такої плити недостатньо, у ній можна залишити отвори і в них втиснути стиковані багатосекційні палі 8 (див. рис. 4.1, б).

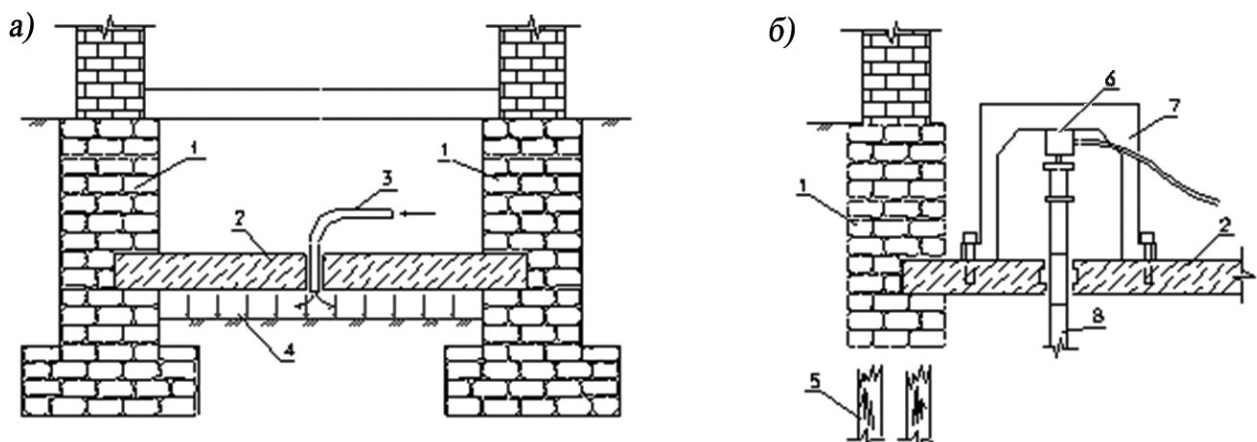


Рис. 4.1. Збільшення опорної площі за допомогою монолітної залізобетонної плити з опресовуванням ґрунту(а) і з підведенням багатосекційних паль втискування (б):

1 – існуючий фундамент; 2 – залізобетонна плита; 3 – труба для ін'єкції цементного розчину, який розширюється; 4 – цементний розчин між плитою і ґрунтом; 5 – дерев'яні палі, що прогнили; 6 – домкрат; 7 – опорне коромисло; 8 – вдавлювані палі

Описана ідея була реалізована у 1980 р. при посиленні фундаментів друкарського цеху у зв'язку з установленням офсетної машини «Планета» на Петербурзькій фабриці «Дитяча книга». Плита зводилася усередині будівлі дореволюційного спорудження з мінімальною глибиною закладання. Це виключало великий обсяг земляних робіт в обмежених умовах діючого виробництва. Спостереження показали, що, незважаючи на збільшення навантаження і зміну вібраційного режиму при роботі нової машини, додаткові осідання не виявлялися.

У ряді випадків опорну площу фундаментів можна збільшити за рахунок збірних плит, які влаштовуються в підвалах будівлі (рис. 4.2, а). При цьому навантаження на плити передаються через натискні рамні конструкції, що упираються в монолітне перекриття. Недоліком технології є велика кількість дрібних робіт в обмежених умовах підвалів. До того ж, як правило, мурування над обрізом фундаменту буває розструктуреним через постійне зволоження, пов'язане з підняттям культурного шару. Такі заходи повинні проводитися в комплексі з посиленням опорної частини мурування стіни. Перевагою технології є відсутність необхідності розкриття ґрунтів в основі фундаментів.

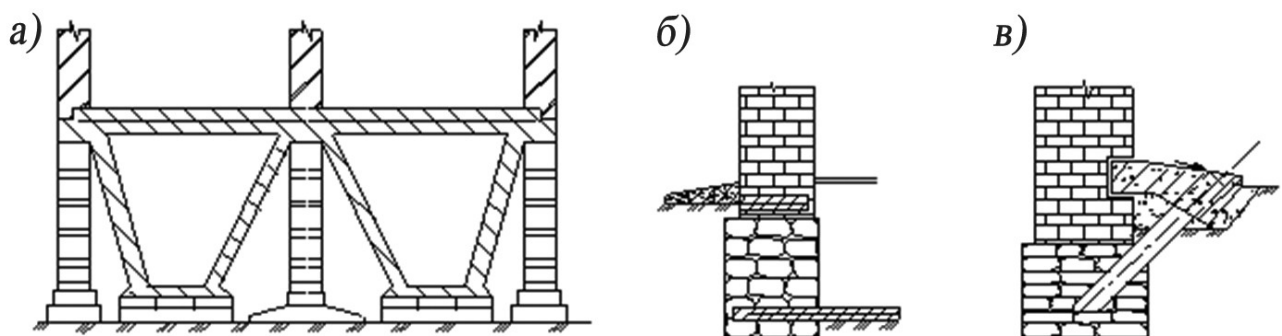


Рис. 4.2. Вдосконалені методи підсилення фундаментів на основі традиційних:

а – улаштування збірних або монолітних рам в підвалі; б, в – виносні консолі і плити

Запропоновані кількома авторами виносні консолі і залізобетонні плити (рис. 4.2, б, в) цікаві постановкою завдання, але також мають і недоліки:

- ребристі плити з анкерами в рівні вимощення схильні до дії нормальних сил морозного обдимання, які в умовах суворого клімату можуть досягати значних величин;

- при підніманні консолей руйнується мурування, а легкі будівлі можуть отримати нерівномірні підняття взимку і просідання влітку;

- у результаті міграції вологи в процесі промерзання ґрунт значно збільшується в об'ємі («роздувається»), а після його відтавання порушується структура і різко знижуються основні міцнісні й деформаційні характеристики.

Для підтвердження сказаного наведемо приклади підсилення виробничих і житлових будівель у м. Железногорськ-Ілімському Іркутської області. Глибина сезонного промерзання досягла  $2,9 \div 3,0$  м. Ґрунти сильно обдимуються за рахунок високого рівня підземних вод і наявності тонкодисперсних частинок супісків і суглинків. Дослідження, проведені Санкт-Петербурзьким державним архітектурно-будівельним університетом на початку 1060-х рр. у період закладення міста і гірничорудного комбінату, показали морозонебезпечність таких ґрунтів. Виконані в кінці 1980-х рр. підсилення з використанням консольних ребристих плит виявилися малоефективними, без надійного захисту від промерзання ґрунтів вони руйнувалися в першу ж сувору зиму. Була розроблена і реалізована конструкція підсилення буровими палями-шпорами з улаштуванням залізобетонної плити (рис. 4.3).

У даному випадку залізобетонну плиту можна включити в спільну роботу з фундаментом і ґрунтами основи. Промерзання

не впливає на конструкції, що підсилюються усередині будівлі. Подібна комплексна технологія була використана при підсиленні фундаментів театральної будівлі на Петроградському боці в Петербурзі.

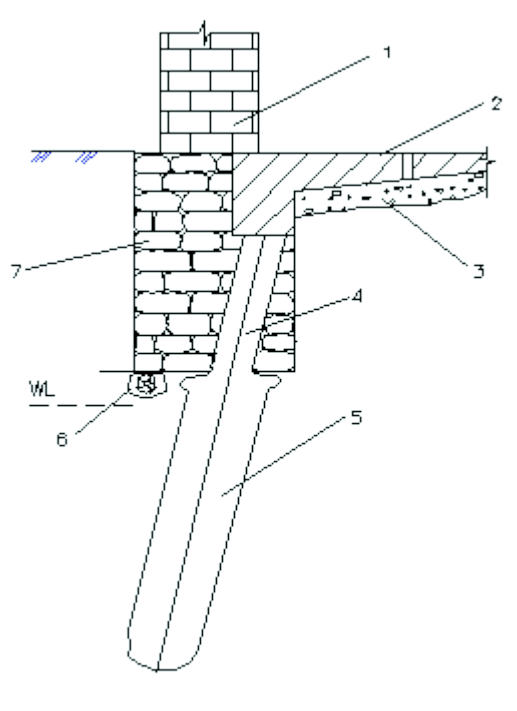
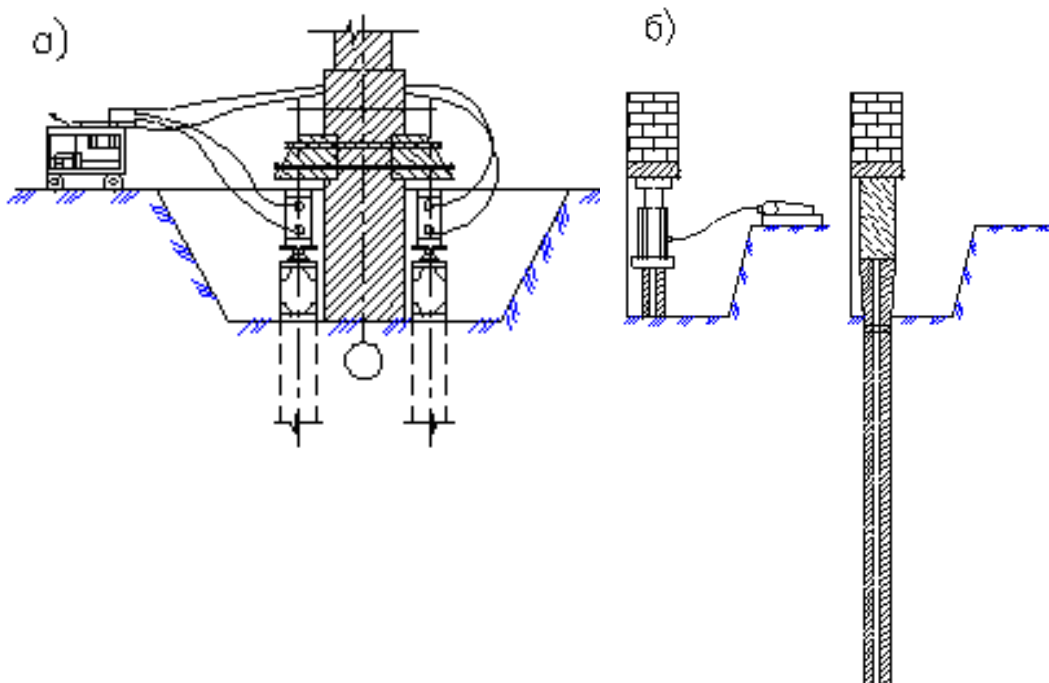


Рис. 4.3. Улаштування короткої палі-шпори і залізобетонної плити:  
 1 – стіна; 2 – залізобетонна плита; 3 – ін'єктований цементний розчин;  
 4 – паля в кондукторі; 5 – розширена частина палі; 6 – дерев'яний лежень;  
 7 – бутовий фундамент

Щоб виключити небажані для старих будівель і слабких ґрунтів динамічні дії, практикують занурення палі втискуванням. Враховуючи обмеженість існуючих приміщень, часто використовують багатосекційні палі. Уфімським НДІпромбудом розроблені нормативні документи, що регламентують технологічні особливості використання таких палі. У 1980-х рр. на об'єктах реконструкції почали широко впроваджувати набивні та буронабивні палі підсилення. ЛенжитлНДІпроектком були розроблені альбоми і типові норми з технології улаштування вказаних палі в умовах слабких ґрунтів. Технологічні особливості втискування багатосекційних палі у вигляді виносних опор наведені на рис. 4.4, а.

При використанні палів втискування необхідні надійні упори. Несучу здатність палі можна регулювати в процесі втискування багатосекційних елементів. Останні можуть бути виготовлені з залізобетону у вигляді секцій із спеціальними стиками, що дозволяють швидко виконувати з'єднання. Можна використовувати металеві труби, однак при цьому слід враховувати можливість їх корозії. У Петербурзі ця проблема вирішувалася двома шляхами: за допомогою устанавлення арматурного каркаса й армування всього об'єму труби і за допомогою використання готових трубобетонних елементів. Взагалі відомості про корозію дуже суперечливі. За даними японських дослідників, що широко використовують метал для підсилення при реконструкції, корозія металу не залежить від складу сталі, ґрунтових умов, наявності зварювання. При найсучаснішому антикорозійному захисті вона складає до 0,01 мм на рік. Не вдаючись у деталі цієї спеціальної проблеми, зазначимо лише, що в умовах міської забудови при блукаючих струмах, великій кількості солей у ґрунтових водах створюються найсприятливіші передумови для корозії металу.



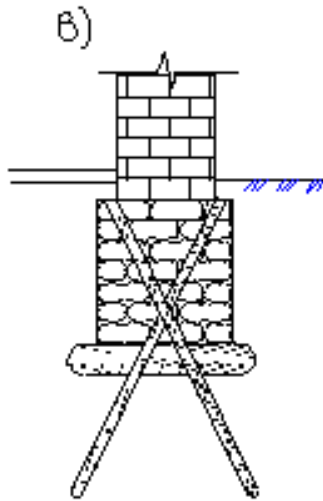


Рис. 4.4. Підсилення фундаментів з використанням паль:  
 а – багатосекційні палі втискування з двосторонньою балкою-упором;  
 б – втискування паль під стіну або підшву фундаменту; в – буроін'єкційні палі з контактним шаром

У Фінляндії, Швеції, Угорщині набули поширення багатосекційні палі типу «Меха». Вони були широко використані для посилення основ і фундаментів у Гельсінкі, Стокгольмі, Будапешті, Турку. У ряді випадків палі підводили безпосередньо під фундамент. Такі палі можуть бути круглого і квадратного перерізу, маса елемента до 100 кг. Палі виготовляли із залізобетонних трубчастих елементів завдовжки до 100 см, що дозволяло легко переміщати їх перекочуванням по майданчику. Послідовність робіт з втискування паль така (див. рис. 4.4, б). Нижній перший елемент з загостреним наконечником (у слабких ґрунтах без загострення) занурюється домкратом. Упором служить розподільна залізобетонна балка. Нарощування збірних стикованих елементів проводять до тих пір, поки вістря не досягне щільних ґрунтів, що забезпечить необхідну несучу здатність системи в цілому. Останнім встановлюють головний елемент, площа поперечного перерізу якого набагато більше від площі поперечного перерізу палі. Після занурення палі до проектної відмітки під навантаженням, що перевищує розрахункову в 1,5÷1,8 разу, її заклинюють спеціальними стійками. Сійки встановлюють між розподільною балкою і оголовком палі, а отриманий отвір заповнюють бетоном.

Фірни «Похьявахвістус» і «Весто» у Фінляндії і Швеції застосовували вдавлені палі з кільцевих залізобетонних



елементів. Стикування здійснювали за допомогою спеціального розтруба; внутрішню порожнину палі після занурення бетонували. Недоліком технологічних прийомів підсилення основ і фундаментів вдавленими палями є великий обсяг земляних робіт. При цьому розкриття шурфом (траншеєю) переобтяженого фундаменту до його підшви небезпечно, а в умовах слабких ґрунтів при високому рівні підземних вод майже нездійсненно. Окрім того, втискування паль може призвести до розструктурування (переминання) слабого глинистого ґрунту.

В останні 20 років у практиці підсилення все ширше використовують буроін'єкційні палі як вертикальні, так і похилі. Після спеціальних робіт з опресовування такі палі мають нерівну поверхню, тому за кордоном вони одержали назву «коренеподібних». Основними перевагами коренеподібних паль є те, що повністю виключаються ручні земляні роботи. Буріння свердловин ведеться безпосередньо через фундамент, не зачіпаючи комунікацій, що проходять біля будівель і в підвалах (див. рис. 4.4, в). Використовуючи малогабаритне устаткування, можна вести роботи з підвалу заввишки 2,0 ÷ 2,5 м. У разі потреби роботи можна вести з першого поверху будівлі. Абсолютно не змінюється зовнішній вигляд конструкції, що важливо при роботі на пам'ятниках архітектури. Можна вести роботи на діючих підприємствах без зупинки виробничого процесу. Витрати ручної праці на всіх технологічних операціях мінімальні; спосіб економічний, з низькою витратою матеріалів. Очевидна екологічна чистота способу порівняно з хімічними методами закріплення, що важливо в умовах жорсткого екологічного контролю.

Окремими недоліками вказаних паль є: недостатньо вивчена робота тонких паль у слабких ґрунтах; низька несуча здатність через невеликий діаметр і відповідно малу бічну поверхню і площу вістря; складність надійного закріплення голови палі в разі старого фундаменту, який у подальшому працює як ростверк; відсутність відповідного розрахунку; невизначеність у формуванні необхідного діаметра при улаштуванні буроін'єкційних паль у слабких ґрунтах; невивченість роботи тонкої довгої палі як елемента, що армує товщу слабого ґрунту; неможливість улаштування ствола палі з важкого бетону

(свердловину малого діаметра можна заповнити тільки цементними розчинами).

Незважаючи на всі відмічені недоліки в Італії, Німеччині, Франції, Швеції і Росії за допомогою таких паль успішно підсилені будівлі, у тому числі аварійно-деформовані пам'ятники, і навіть зведені нові фундаменти в складних умовах примикання нових будівель до старих на слабких ґрунтах. У Римі підсилений собор св. Андрія, у Венеції нахилена вежа «Бурано» на острові з цією самою назвою. Успішно працюють в цьому напрямі спеціалізовані фірми «Bauer», «Fondedile», «Keller», «Miver», «Fundex» та ін. У Москві підсилені будівлі унікальних пам'ятників Третяковської галереї, театру МХАТ, музею Андрія Рубльова та ін. У Петербурзі виконано оригінальне підсилення основи і фундаментів костюлу Св. Катерини (пр. Невський, 32) при загальній кількості паль більше 1200 шт. (найбільший за обсягами посилення об'єкт Росії), Пріоратського палацу в Гатчині. Ці роботи виконувалися силами фірм «Геореконструкція» і «Геоцит».

#### **4.2. Способи струминної технології і високонапірної ін'єкції**

Крім розглянутих вище методів, підсилення фундаментів проводять струминною технологією і високонапірною ін'єкцією.

Метод «jet grouting» – високонапірна ін'єкція тверднучого розчину в ґрунт, відомий також під назвою «струминна технологія», розроблений у середині 1970-х рр. у Японії і широко використовується у Німеччині, Італії, Франції. На рис. 4.5 наведена схема улаштування стінки з паль. Згідно з цією схемою роботи виконують у такій послідовності: спочатку проводять буріння свердловини 1; у свердловину занурюють ін'єктор 2 зі спеціальним соплом; подають під великим тиском (до 100 МПа) ін'єкційний розчин; здійснюють підйом ін'єктора одночасним його обертанням; формують палю потрібного діаметра або стінку з паль. Важливим чинником зміцнення масиву ґрунту або підсилення фундаментів з використанням струминної технології є можливість підтримування великого тиску (до 80 ÷ 100 МПа). Це потребує певних вимог до використовуваного устаткування, трубопроводів, які підводять, та ін.

Як приклад можна навести успішно реалізовані проекти підсилення основ і фундаментів берегового стояна моста через Дунай (рис. 4.6, а) і пам'ятника військової архітектури у Відні (казарми Россауер). Останній був побудований у 1870 р. на дерев'яних палях (рис. 4.6, б). Необхідність підсилення визначили 2 чинники: різке збільшення навантажень у зв'язку з заміною перекриттів і гниття голів паль через пониження горизонту підземних вод. Розроблялися конкурсні варіанти посилення основи і фундаментів. Була вибрана струминна технологія. Фактично прийнята технологія задовольняла всі розрахункові геотехнічні і конструктивні вимоги: виключення з роботи дерев'яних паль з головами, що згнили; передача тиску від масивної 5-поверхової будівлі з розмірами в плані 136×275 м на міцні гравійно-щебеністі ґрунти; виключення порушень у роботі комунікацій, що йдуть уздовж будівлі з зовнішнього боку; повна стабілізація всіх осідань при збільшеному навантаженні. Враховуючи незвичність такого роду підсилення і дискусивність окремих технологічних моментів, зупинимося на деталях, що мають відношення до подальшого аналізу. Для ін'єкції розчинів використовували бурову установку на гусеничному ході SC-1 фірми «Keller» (Німеччина). Габарити установки дозволяли їй переміщатися через отвір шириною 0,8 м і працювати в підвальному приміщенні при висоті 2,8 м.

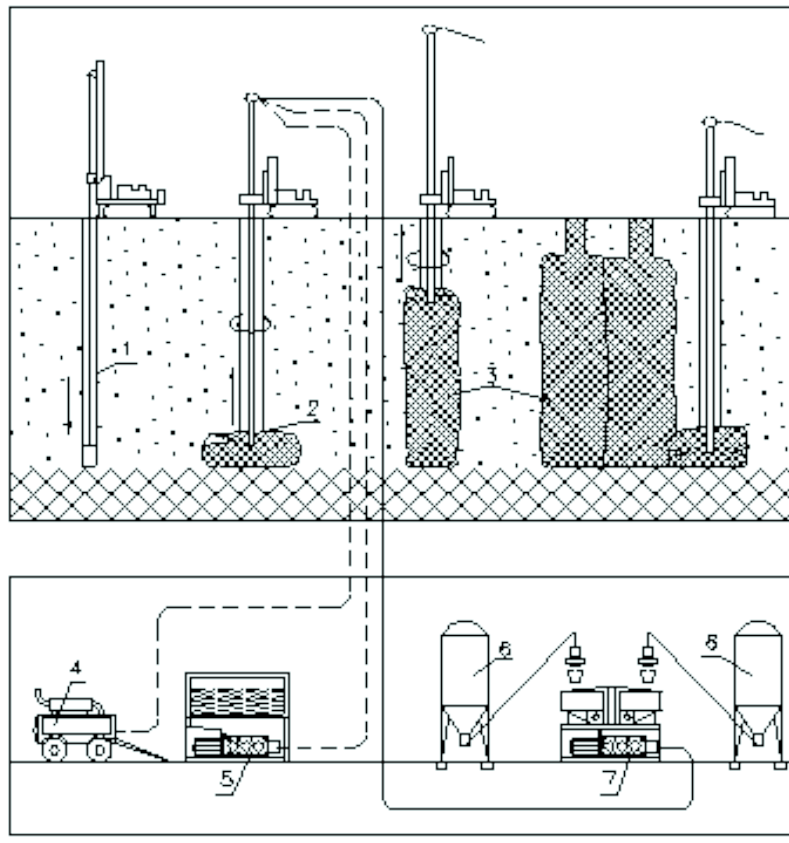


Рис. 4.5. Схема улаштування стінки з паль з використанням струминної технології (jet grouting):

1 – бурова свердловина до щільних ґрунтів; 2 – ін'єктор; 3 – формована паля; 4 – компресор; 5 – насос для подачі води; 6 – ємності цементу і піску; 7 – розчинонасос

а)

б)

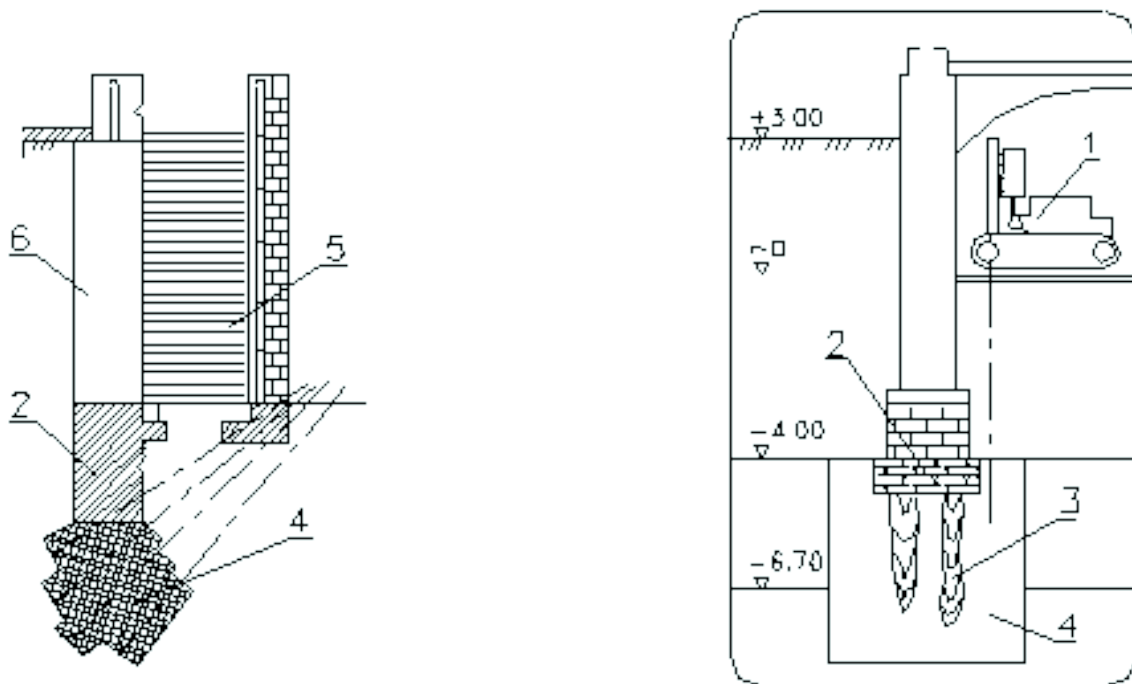


Рис. 4.6. Підсилення основ будівель і споруд з використанням струминної технології:

*a* – підпірна стіна берегового стояна моста через Дунай; *б* – пам'ятник військової архітектури у Відні; 1 – буровий верстат; 2 – існуючий фундамент; 3 – дерев'яні палі; 4 – зміцнені масиви ґрунту; 5 – рівні спуску; 6 – підпірна стіна каналу

Основні переваги струминної технології в умовах слабких ґрунтів: можливість ведення робіт у будь-яких несприятливих ґрунтових і обмежених умовах; екологічна чистота всіх технологічних операцій. Крім того, струминна технологія використовується і в інших випадках (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

## ГАЛУЗИ ЗАСТОСУВАННЯ СТРУМИННОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПРИ ПІДСИЛЕННІ ФУНДАМЕНТІВ

<p><b>Підведення нового ґрунтоцементного фундаменту під будівлю.</b> Під фундаментом існуючої будівлі у будь-яких, навіть дуже обмежених умовах, можуть бути зведені ґрунтоцементні масивні конструкції, у тому числі і стіни, що виконують також водоутримуючу функцію</p>	
<p><b>Ремонт існуючого фундаменту.</b> Фундаменти будівель старої споруди часто сильно пошкоджені. Ґрунтоцементний масив відновлює несучу здатність фундаменту. Під фундаментом і навколо нього утворюється однорідний міцний масив</p>	
<p><b>Змінення конструкцій фундаментів і спорудження нових.</b> Зміна призначення будівлі або її реконструкція часто пов'язані зі спорудженням нових або зміненням розташування старих фундаментів. Ґрунтоцементні масиви вирішують ці проблеми економічно, швидко і надійно</p>	
<p><b>Підсилення існуючих фундаментів шляхом перенесення навантажень на глибші шари ґрунту.</b> Споруджувані при ремонті і реконструкції будівлі окремі ґрунтоцементні палі приймають на себе навантаження і переносять їх на міцніші шари ґрунту. Це особливо важливо в обмежених умовах міської забудови</p>	

Проте струминна технологія має і ряд недоліків, основними з яких є: небезпека локальних деформацій у процесі тимчасового розмиву ґрунтового масиву під фундаментом до набору міцності; висока вартість і матеріаломісткість через великі об'єми закріплення ґрунту; підвищена небезпека при роботі з високим тиском. У будь-якому випадку струминні технології перспективні й успішно використовуються в дослідному порядку при підсиленні фундаментів, наприклад цеху пресування сухого залишку очисних споруд у с. Ольгине Ленінградської області та стоматологічної поліклініки у Невському районі Петербургу.

Дуже ефективним є використання технології високонапірних ін'єкцій у комплексі з іншими сучасними технологіями, прикладом чого є підсилення будинку № 6 на Кінногвардійському бульварі, біля якого здійснювалося будівництво підземного переходу. Аналіз показує, що при обґрунтованому виборі і реалізації сучасних технологій підсилення основ і фундаментів можна вирішувати реконструктивні проблеми будь-якої складності. Як приклад складної реконструкції можна навести будівництво нової 40-поверхової адміністративної будівлі в м. Бостоні (США). Фактично вона вбудовувалася в існуючу 10÷11-поверхову забудову історичних будівель кінця минулого століття. При цьому в рівні останніх поверхів старі будівлі з'єднувалися з новими спеціальними галереями, що зводилися. Через наявність великого шару слабких ґрунтів під існуючими будівлями і необхідності улаштування декількох підпірних стінок виникло багато геотехнічних проблем. Щоб вирішити ці проблеми і звести до мінімуму можливу різницю осідань будівель, були виконані такі роботи (рис. 4.7):

- ґрунт між будівлями армувався решітками з набивних паль, об'єднаних ростверком;
- для зміцнення схилу використано 2 ряди залізобетонних підпірних стін і пальові фундаменти з 14-метрових трубчастих паль, що заходять своїм вістрям у щільні льодовикові глини;
- фундамент самої будівлі був виконаний у вигляді потужної залізобетонної плити завтовшки 1,5 м, по контурах якої влаштовано 400 залізобетонних паль.

Тут успішно використано декілька технологічних прийомів, включаючи підсилення основ і анкерування підпірних стін ін'єкційними анкерами.

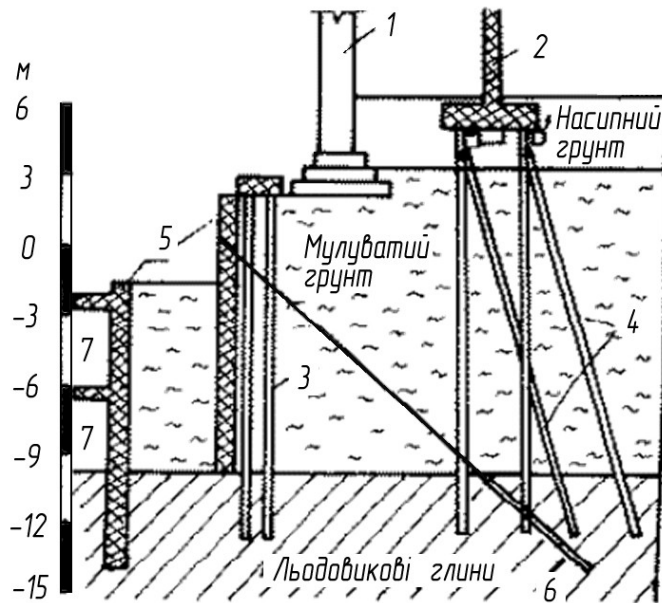


Рис. 4.7. Приклад складної реконструкції будівель на слабких ґрунтах:

1 – існуюча будівля на слабкому ґрунті; 2 – сталеві решітки; 3 – труобетонні палі; 4 – набивні палі; 5 – підпірні стінки; 6 – ґрунтові ін'єкційні анкери

Таким чином, у кожному конкретному випадку виникають багатопланові інженерні геотехнічні завдання, вирішення яких вимагає вичерпної інформації про ґрунти, зміну їх властивостей у процесі тривалої експлуатації, у процесі ведення робіт з улаштування поблизу них нових фундаментів або підземних споруд. Питання підсилення основ і фундаментів повинні вирішуватися в комплексі з питаннями підсилення надземних конструкцій. Прикладом може служити підсилення пам'ятника архітектури у м. Римі (рис. 4.8). Тут, поряд з підсиленням фундаментів коренеподібними палями, виконано підсилення основних надземних конструкцій, включаючи цегляне мурування стін. Необхідно враховувати, що анкеровання цегляних стін металевими стержнями з часом може виявитися неефективним і небезпечним через корозію металу, у результаті якої відбувається збільшення об'єму металу, який прокородував, і, отже, порушення цілісності укріплюваних конструкцій.



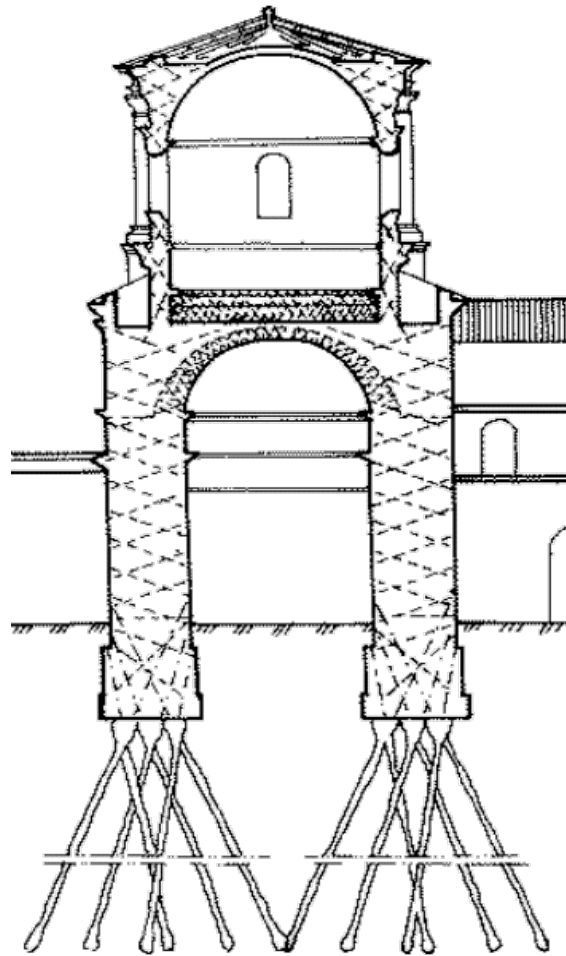


Рис. 4.8. Комплексне підсилення несучих конструкцій пам'ятника архітектури в Римі

Проте основним джерелом найбільш істотних деформацій залишаються неправильне врахування властивостей ґрунтів або недоврахування можливих наслідків, пов'язаних з їх розструктуруванням у процесі ведення реконструктивних робіт.

#### **4.3. Способи підсилення фундаментів за допомогою буроін'єкційних паль**

У багатьох випадках, як наголошувалося на міжнародних геотехнічних конгресах у м. Неаполі (1996) і м. Гамбурзі (1997), не існує реальної альтернативи застосуванню буроін'єкційних паль для порятунку історичних будівель. До теперішнього часу буроін'єкційними палями посилено більше тисячі значущих

пам'ятників архітектури. У ряді випадків проводилися ін'єкція і армування цегляного мурування будівель, що рятують (рис. 4.1). У результаті було вирішено декілька важливих реконструктивних завдань:

- відновлена міцність старого цегляного мурування і поліпшені умови статичної роботи будівлі за рахунок підвищення жорсткості;

- поліпшені умови передачі навантаження на ґрунти основи;

- відновлена протикапілярна ізоляція над фундаментом у комплексі з підсиленням опорної частини стіни.

Проте при значній товщі слабкого ґрунту (у Петербурзі її потужність досягає 25÷30 м) ефективність і економічність тонких довгих буроін'єкційних паль може виявитися дискусійною. Чисельне моделювання є єдиним інструментом, що дозволяє дати об'єктивну оцінку доцільності пропонованих реконструктивних заходів з використанням паль підсилення. Як показали чисельні дослідження і досвід реконструкції фундаментів, при використанні буроін'єкційних паль необхідно враховувати такі обставини.

1. Кут нахилу паль не дуже впливає на величину осідання посиленої конструкції, тому немає необхідності його збільшувати, що спрощує ведення робіт з їх улаштування.

2. Палі повинні бути надійно закріплені в фундаменті, для чого старий фундамент, що складається з окремих бутових каменів на розчині, повинен бути посилений ін'єкціями цементного розчину. Фундамент фактично перетворюється на ростверк і повинен за міцністю відповідати своєму призначенню. Якщо міцність фундаменту недостатня або закладення палі в тіло фундаменту здійснене менш ніж на 5 її діаметрів, необхідно створити додаткову конструкцію на контакті «фундамент-ґрунт», так званий «контактний шар». Для цього є досить прості технологічні прийоми.

3. Розрахунком встановлено, що збільшення нахилу значно підвищує внутрішні зусилля в палях. Ця обставина залежно від основних міцнісних і деформаційних властивостей ґрунту може бути врахована розрахунком і відповідно спеціальною системою об'ємного армування. У розрахунку буроін'єкційна паля розглядається як залізобетонна конструкція, тому при її

виготовленні, крім в'язучого цементу, необхідний інертний матеріал. Враховуючи технологічні особливості, як інертний матеріал можна використовувати пісок. Представляється, що цементні палі можуть застосовуватися при невеликих кутах нахилу для тимчасових підсилень і анкерних тимчасових кріплень (будівля в зоні будівництва підземних виробок та ін.).

4. При використанні арматурних каркасів повинні бути запроектовані і виконані рівноміцнісні стики. Можливо включення в конструкцію паль міцних труб, металевих профілів, спеціального скла. Останній варіант використовується в Італії і вимагає апробації в умовах роботи палі в слабких ґрунтах. У будь-якому випадку для буроін'єкційних паль, що влаштовуються в слабких ґрунтах, армування повинне проводитися залежно від фактично діючих моментів у різних перерізах. Так, типові конструктивні рішення і технологічні прийоми армування і бетонування буроін'єкційних паль, розроблені для міцних ґрунтів Москви і Києва, в умовах слабких ґрунтів Петербургу виявилися неефективними, а в окремих випадках небезпечними.

5. Технологія виготовлення буроін'єкційних паль, що забезпечує в умовах слабких ґрунтів необхідні розрахункові міцнісні параметри, досить складна і вимагає застосування комплексу спеціального устаткування. Щоб розробити такий комплекс, необхідно проаналізувати основні переваги і недоліки буроін'єкційної технології. Порівняно з іншими технологіями підсилення фундаментів вони розглядалися раніше. Зупинимося лише на основних реконструктивних випадках, коли буроін'єкційні палі та ін'єкційні технології успішно використовувалися у вітчизняній і зарубіжній практиці:

- підсилення основ і фундаментів при необхідності стабілізації незгасальних осідань;

- підсилення різних конструктивних елементів, включаючи фундаменти, цегляне мурування несучих стін, склепінь, перекриттів;

- зміна конструктивної схеми будівлі з перерозподілом навантажень на ґрунти або довантаження фундаментів;

- улаштування окремих і стрічкових палювих фундаментів у зоні примикання до існуючої будівлі у випадках, коли,

наприклад, очікується небезпечна динаміка від занурення готових паль;

- улаштування розділових безперервних стін між будівлями;
- улаштування стін неглибоких підземних споруд, поглиблення підвалів;
- анкерування підпірних стін, зокрема виконаних методом «стіна в ґрунті»;
- армування ґрунту для поліпшення його властивостей і підвищення несучої здатності масиву;
- превентивне підсилення існуючих будівель.

Така широка застосовність методу для підсилення будівель і успішна його реалізація в умовах слабких ґрунтів Петербургу, Архангельська, Вологди та інших міст вимагала вдосконалення технології, направленої на підвищення несучої здатності паль підсилення в умовах слабких ґрунтів. Технологічний цикл улаштування буроін'єкційних паль включає: буріння мурування фундаменту, встановлення труби-кондуктора і її тампонування; буріння свердловини до проектної відмітки під захистом обсадної труби або під глинистим розчином; заповнення свердловини тверднучим розчином; встановлення арматурного каркаса; опресовування заповненої розчином свердловини тиском  $0,2 \div 0,4$  МПа. Якщо міцність фундаменту недостатня, проводять ін'єкцію цементного розчину в його мурування. Буроін'єкційний комплекс з малогабаритним буровим верстатом наведений на рис. 4.9. Буріння в межах фундаменту ведеться через кондуктор, який є напрямною трубою. Кондуктор забезпечує надійність опресовування, запобігаючи випиранню зі свердловини цементного розчину. Арматурний каркас або одиночні стержні опускають у свердловини секціями, рівноміцнісний стик яких виконують за допомогою зварювання, що суттєво ускладнює роботу.

Важливим етапом формування тіла буроін'єкційної палі, що влаштовується в слабких ґрунтах під захистом глинистого розчину, є опресовування. Від тиску і часу опресовування залежать у подальшому опір тертю по бічній поверхні палі і відповідно її несуча здатність. Відбувається часткова цементація ґрунту на контакті «палія-ґрунт». У слабких ґрунтах при опресовуванні під тиском  $0,2 \div 0,4$  МПа ґрунт навколо палі ущільнюється, переріз палі збільшується, наявні порожнини

заповнюються розчином. На рис. 4.10 наводяться дані натурних випробувань буроін'єкційних паль діаметром 132 мм і довжиною 16 м, що прорізають товщу слабких ґрунтів. Як видно з цих даних, без опресовування несуча здатність палі незначна (крива 1 на рис. 4.10). Опресовування надмірним тиском підвищує несучу здатність палі у слабких ґрунтах (криві 2÷4 на рис. 4.10).

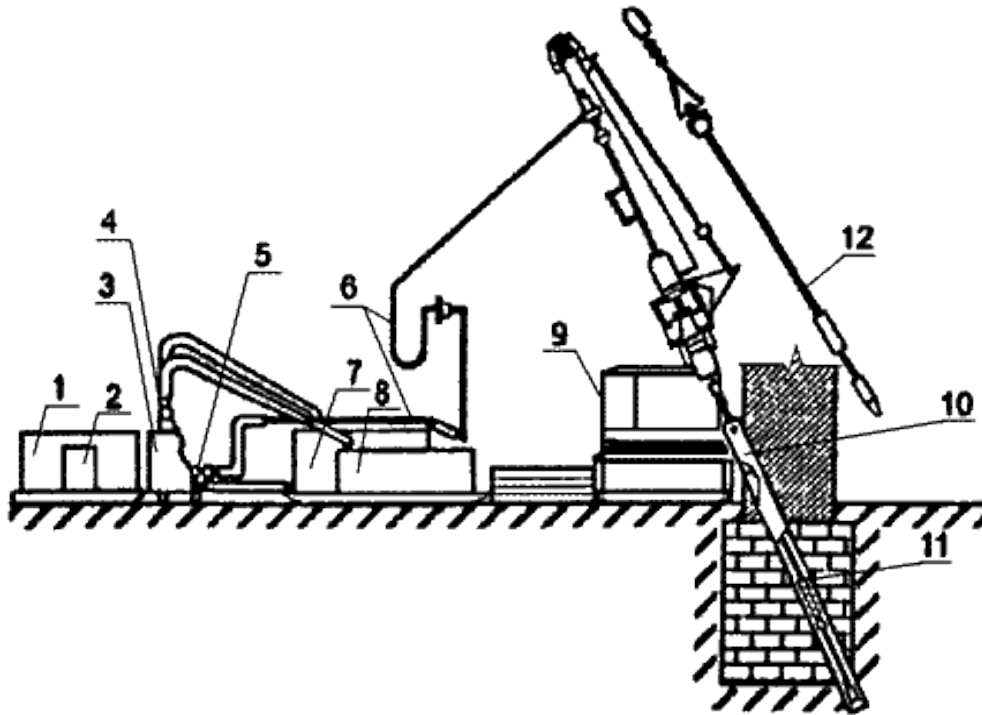


Рис. 4.9. Буроін'єкційний комплекс у процесі виготовлення палі:  
 1 – місткість для цементного розчину; 2 – глиномішалка; 3 – мірний бак;  
 4 – розчинонасос; 5 – промивальний насос; 6 – нагнітальний трубопровід;  
 7 – місткість для глиняного розчину; 8 – шламовідокремлювач; 9 – буровий  
 верстат; 10 – кондуктор; 11 – буровий інструмент; 12 – бурильна труба

У м. Архангельську при проведенні робіт з підсилення старовинної будівлі в заторфованих ґрунтах були розкриті буроін'єкційні палі. Їх фактичний діаметр склав 290÷300 мм при початковому діаметрі буріння 151 мм. Таким чином, за допомогою режиму опресовування і підбору цементного або піщано-цементного розчину можна формувати несучу здатність палі у слабких заторфованих ґрунтах. При виконанні робіт з підсилення основ і фундаментів буроін'єкційними палями використовувалися окремі технологічні прийоми, що сприяють поліпшенню спільної роботи системи «фундамент-паля підсилення-ґрунт основи».

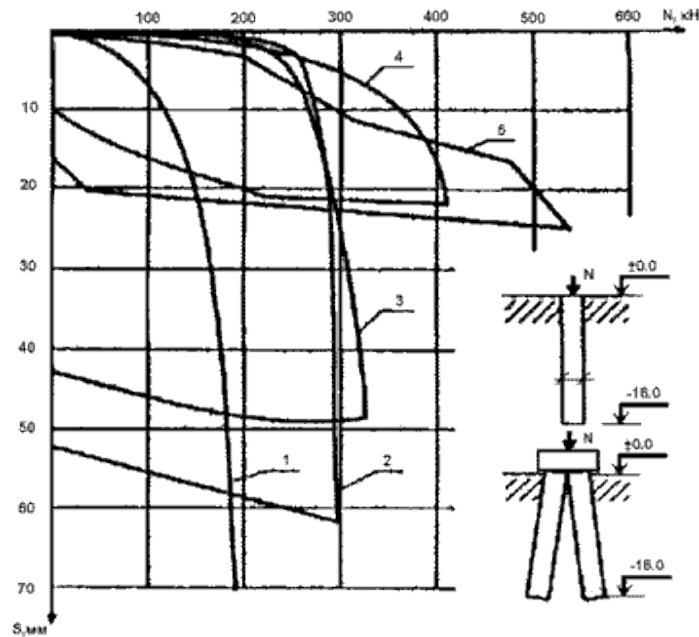


Рис. 4.10. Графіки випробувань буроін'єкційних паль:  
 1 – без опресовування; 2, 3 – з опресовуванням відповідно 0,2 і 0,4 МПа;  
 4 – з опресовуванням високовольтними розрядами; 5 – двох похилих паль

Так, при підсиленні окремих опор під колони костьолу Св. Катерини у Петербурзі (пр. Невський, 32) після ін'єктування мурування фундаменту проводили повторне ін'єктування контактного шару, яке дозволило виконати консервацію гниючих дерев'яних лежнів і сприяла ефективнішій роботі похилих паль підсилення. Контрольне буріння свердловин невеликим діаметром через тіло фундаменту дозволило оконтурити створений контактний шар бетону між подошвою фундаменту і ґрунтом. Товщина цього шару досягла 500 мм. Усі вищезгадані технологічні операції виконувалися за допомогою вітчизняного бурового устаткування. За первинним проектом підсилення основ і фундаментів костьолу Св. Катерини передбачалося здійснити за допомогою паль довжиною 26 м, що прорізають товщу слабких ґрунтів і спираються на міцні моренні ґрунти. Вартість робіт у даному випадку склала б 4,86 млн американських доларів. Чисельне моделювання різних варіантів підсилення дозволило зупинитися на коротких палях, встановлених у вигляді віяла. Завдяки їм були поліпшені умови передачі навантаження на відносно міцну товщу піщаних ґрунтів за рахунок її армування залізобетонними стержнями (тонкими буроін'єкційними палями).

Своєрідною перевіркою ефективності рекомендованого комплексного підходу став незвичний об'єкт – цегляна арка Штакеншнейдера (Петербург, наб. р. Мойки, 11), деформована в процесі будівництва 2-поверхового підземного гаража. Швидкість осідання фундаментів на момент укладення контракту з зарубіжною фірмою, що веде підрядні роботи, склала 4,5 мм за добу. Виконання всього обсягу підсилення, що включає цикл підготовчих, проектних робіт і власне виконання підсилення, при цілодобовій роботі 3-х бурових верстатів зайняло 6 діб. Обстеження і моделювання варіантів підсилення проводили за викладеною вище методикою. Таким чином, ця методика прийнятна і для аварійних випадків, коли осідання розвиваються лавиноподібно.

Останніми роками окремі фірми Москви і Петербургу застосовують буроін'єкційні вертикальні палі діаметром 250–300 мм для улаштування фундаментів нових будівель, що вбудовуються між тими, які вже існують, при ущільненні міської забудови. Такі палі при довжині понад 15 м є певною небезпекою для нормальної експлуатації вбудовань, пов'язаною з можливістю порушення вертикальності бурових свердловин і суцільності ствола палі. Палі необхідно армувати на всю глибину, що ускладнює процес їх виготовлення за буроін'єкційною технологією. У будь-якому випадку застосовність порівняно гнучких довгих палей підлягає перевірці спеціальними розрахунками. Ці палі повинні бути також піддані обов'язковій перевірці на суцільність ствола. У будь-якому випадку геотехнічне моделювання таких відповідальних конструкцій, як довгі буроін'єкційні палі, у товщі слабких ґрунтів є необхідним етапом проектування реконструкції цих палей. З цією метою може бути успішно реалізована методика числових досліджень.

На об'єктах Південної залізниці застосовувати буроін'єкційні палі при капітальному ремонті було запропоновано кафедрою будівельних матеріалів, конструкцій та споруд УкрДАЗТу у 2010 р. за результатами обстеження станційних будівель ст. Кислівка - поста ЕЦ і вокзалу. Виявлені пошкодження - тріщини в стінах внаслідок нерівномірних деформацій основи (рис. 4.11, 4.12). Осідання і розкриття тріщин, незважаючи на виконане раніше підсилення будівлі вокзалу контрфорсами та тяжами, на час обстеження тривали. Причина пошкоджень – наявність під подошвою фундаменту

глинистого ґрунту, що набухає (ІГЕ 4 на рис. 4.13), а під будівлею вокзалу, зокрема під стіною, підсиленою контрфорсами (рис. 4.12), ще й слабкого гумусованого ґрунту (ІГЕ 1 на рис. 4.13).

Для запобігання подальшого осідання і розкриття тріщин для будівлі поста ЕЦ запропоновано її підсилення поясами жорсткості (рис. 4.14) – монолітним залізобетонним поясом на рівні фундаменту по периметру будівлі (рис. 4.14, 4.15) у сполученні з металевим поясом поверху стін (рис. 4.14, 4.16). Пояси підвищуватимуть жорсткість будівлі і запобігатимуть утворенню тріщин.

Застосування способу наведено на прикладі одноповерхової будівлі малого вокзалу (рис. 4.12). Для запобігання подальшого осідання і розкриття тріщин для будівлі вокзалу передбачено підсилення основи виносними армованими буроін'єкційними палями у сполученні з поясами жорсткості (рис. 4.17, 4.18) - монолітним залізобетонним поясом на рівні фундаменту по периметру будівлі та металевим поясом поверху стін, аналогічним вказаному на рис. 4.14, 4.16. Виносні буроін'єкційні палі розташовуються ззовні фундаментів зовнішніх стін будівлі у два ряди: внутрішній ряд - опорні палі, зовнішній - анкерні палі. Ростверк палей об'єднується з монолітним залізобетонним поясом жорсткості, утворюючи горизонтально розташовану монолітну залізобетону раму (рис. 4.17, 4.19). Палі у сполученні з поясом жорсткості запобігатимуть осіданню й утворенню тріщин.

### **Контрольні питання**

1. Навести схему підсилення фундаментів за допомогою монолітної залізобетонної плити.
2. Навести схему підсилення фундаментів улаштуванням залізобетонної або монолітної рами у підвалі.
3. Навести схему підсилення фундаментів виносними консолями і рамами.
4. Навести схему улаштування короткої палі-шпори.
5. Навести схему підсилення фундаментів з використанням палей втискування.
6. Сутність струминної технології підсилення фундаментів.















## **БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК**

1. Справочник по земляному полотну эксплуатируемых железных дорог [Текст] / М.В. Аверочкина, С.С. Бабицкая, С.М. Большаков и др.; под ред. А.Ф. Подпалого, М.А. Чернышева, В.П. Титова. – М.: Транспорт, 1978. – 766 с.
2. Анализ существующих технологий усиления фундаментов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.fundator.ru/stat/1/analiz\\_teh.html](http://www.fundator.ru/stat/1/analiz_teh.html).
3. Бабушкина, М. Жидкое стекло в строительстве [Текст] / М. Бабушкина. – Кишинев: Картя Молдовеняске, 1971. – 223 с.
4. Батраков, В.Г. Основы модифицирования цементных систем и получения бетонов заданных строительно-технических свойств [Текст] : дисс. ... д-ра техн. наук: спец. 05.23.05 / Владимир Григорьевич Батраков. – М., 1984. – 443 с.
5. Укрепленные грунты [Текст] / В.М. Безрук, Н.Л. Гурячков, Т.М. Луканина, Р.А. Агапова. – М.: Транспорт, 1982. – 230 с.
6. Блескина, Н.А. Проникающая способность химических инъекционных растворов [Текст] // Материалы VII Всесоюзного совещания «Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве». – М.: Стройиздат, 1971. – С. 215-217.
7. Блескина, Н.А. Глубинное закрепление грунта синтетическими смолами [Текст] / Н.А. Блескина, Б.С. Федоров. – М.: Стройиздат, 1980. – 147 с.
8. Богов, С.Г. Опыт применения инъекционных геотехнологий в Санкт-Петербурге [Электронный ресурс] / С.Г. Богов, С.И. Алексеев // Интернет-журнал «Реконструкция городов и геотехническое строительство». – 1999. – № 1. – Режим доступа: <http://www.geores.spb.ru/journals/01/default.aspx>.
9. Бочко, Э.А. Электронно-микроскопические и технологические исследования силикатного геля [Текст] / Э.А. Бочко, Т.Т. Абрамова, В.М. Голоднов // Материалы VII Всесоюзного совещания «Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве». – М.: Стройиздат, 1971. – С.183-186.
10. Виды грунтовых оснований под фундаменты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gardenweb.ru/vidy-gruntovykh-osnovanii-pod-fundamenty>.
11. Грунтоведение [Текст] / Е.М. Сергеев, Г.А. Голодковская, Р.С. Зиангиров и др.; под ред. Е.М. Сергеева. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: МГУ, 1983. – 389 с.
12. Дерягин, Б.В. Поверхностные силы [Текст] / Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев, В.М. Муллер. – М.: Наука, 1987. – 399 с.



13. Дистлер, Г.И. Электрическая структура реальных поверхностей твердых тел и формирование граничных слоев с особыми свойствами, обеспечивающими передачу дальнего действия влияния твердых тел [Текст] / Г.И. Дистлер // IV конф. по поверхностным силам: сб. докладов. – М.: Наука, 1972. – С. 245–261.

14. Духин, С.С. Электрофорез [Текст] / С.С. Духин, Б.В. Дерягин. – М.: Наука, 1976. – 327 с.

15. Дяченко, Л.І. Інструкція з утримання земляного полотна залізниць України (ЦП 0072) [Текст] / Л.І. Дяченко, Г.П. Кислий, О.В. Курач. – Д.: АТЗТ ВКФ „Арт-Прес”, 2001. – 104 с.

16. Жидкое стекло натриевое [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.vakyla-master.ru / product/kley.shtml](http://www.vakyla-master.ru/product/kley.shtml).

17. Конструкційні матеріали нової генерації та технології їх впровадження в будівництво [Текст] / Р.Ф. Рунова, В.І. Гоц, І.І. Назаренко та ін. – К.: УВПК «ЕксОб», 2008. – 355 с.

18. Краткий справочник физико-химических величин: справочное издание [Текст] / Н.М. Барон, А.М. Пономарева, А.А. Равдель, З.Н. Тимофеева; под ред. А.А. Равделя, А.М. Пономаревой. – 10-е изд., испр. и доп. – СПб.: Изд-во «Иван Федоров», 2002. – 238 с.

19. Круглицкий, Н.Н. Укрепление глинистых грунтов силикатом калия [Текст] / Н.Н. Круглицкий, Р.С. Жукова, В.В. Беглецов // Материалы VIII Всесоюзного совещания «Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве». – К.: Будівельник, 1978. – С. 194-196.

20. Матвеев, М.А. О строении жидких стекол [Текст] / М.А. Матвеев, А.И. Рабухин // ЖВХО им. Д.И. Менделеева. – 1963. – № 2. – С. 205-211.

21. Михайлов, В. Клеевые технологии, используемые при подготовке оснований для зданий и сооружений [Электронный ресурс] / В. Михайлов // Интернет-журнал «Строительный Инжиниринг». – 2007. – №7. – Режим доступа: [www.stroing.ru](http://www.stroing.ru).

22. Наумов, С. Технологии реконструкции фундаментов [Электронный ресурс] / С. Наумов. – Режим доступа: <http://www.mediaterra.ru/materials/outer/foundations/foundation-reconstruction>.

23. Плуґін, А.А. Відновлення експлуатаційних властивостей основ, фундаментів, заглиблених і підземних споруд [Текст]: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / А.А. Плуґін, Л.В. Трикоз. –

Харків: УкрДАЗТ, 2004. – 117 с.

24. Плугин, А.Н. Электрогетерогенные взаимодействия при твердении цементных вяжущих [Текст]: дисс. ... д-ра хим. наук: спец. 02.00.11 / Аркадий Николаевич Плугин. – К., 1989. – 282 с.

25. Рамачандран, В. Наука о бетоне [Текст] / В. Рамачандран, Р. Фельдман, Дж. Бодуэн. – М.: Стройиздат, 1986. – 277 с.

26. Ребиндер, П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур [Текст] / П.А. Ребиндер // В кн.: Физико-химическая механика дисперсных структур. – М.: Наука, 1966. – С. 3-5.

27. Ржаницын, Б.А. Химическое закрепление грунтов в строительстве [Текст] / Б.А. Ржаницын. – М.: Стройиздат, 1986. – 264 с.

28. Сафрончик, В.И. Защита от коррозии строительных конструкций и технологического оборудования [Текст] / В.И. Сафрончик. – Л.: Стройиздат, 1988. – 255 с.

29. Сергеев, В.И. Влияние сорбции на искусственное закрепление грунтов силикатными растворами [Текст] / В.И. Сергеев, Т.Г. Мимко // Материалы IX Всесоюзного совещания «Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве». – М.: Стройиздат, 1978. – С. 78-81.

30. СНиП 3.03.01-87. Несущие и ограждающие конструкции [Текст] / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.

31. Соколович, В.Е. Химическое закрепление грунтов [Текст] / В.Е. Соколович. – М.: Стройиздат, 1980. – 119 с.

32. Сеньков, С.А. Сухие строительные смеси специального назначения на основе щелочесиликатных вяжущих [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.05 / Сергей Александрович Сеньков. – Пермь, 2005. – 219 с.

33. Тарасова, А.П. Жаростойкие вяжущие на жидком стекле и бетоны на их основе [Текст] / А.П. Тарасова. – М.: Стройиздат, 1982. – 133 с.

34. Токин, А.Н. Фундаменты из цементогрунта [Текст] / А.Н. Токин. – М.: Стройиздат, 1984. – 184 с.

35. Халикулов, А.И. Химия в строительстве [Текст] / А.И. Халикулов, М.Н. Ибрагимов. – Ташкент: Узбекистан, 1983. – 134 с.

36. Швецов, Г.И. Инженерная геология, механика грунтов, основания и фундаменты [Текст] / Г.И. Швецов. – М.: Высшая школа, 1987. – 296 с.

## **ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК**

Бітумування, 36

## Вода

- гравітаційна, 19
- міцнозв'язана, 15
- пухкозв'язана, 18

## Глинізація, 35

## Закріплення ґрунту

- електрохімічне, 29, 72
- бурозмішувальним способом, 34
- термічним способом, 32
- штучним заморожуванням, 32

## Огорожа шпунтова, 22

## Осушення електроосмотичне, 29, 65

## Подушки ґрунтові, 21

## Привантаження насипів, 23

## Силікатизація, 28

## Смолизація, 31

## Ущільнення ґрунту

- водозниженням, 27
- глибинне, 26
- камуфлетними вибухами, 26
- поверхневе, 23
- статичним навантаженням, 27
- улаштуванням піщаних і ґрунтових паль, 26

## Цементация, 28

Таблиця 1.1

Границі застосування способів закріплення ґрунту основ експлуатованих будівель  
і досяжні значення міцності закріпленого ґрунту

Способи закріплення ґрунту	Застосовність і досяжні значення міцності закріпленого ґрунту з коефіцієнтом фільтрації, м/доб												
	Гравій	Пісок					Супісок		Лес		Суглинок	Глина	Погано ущільнений насипний ґрунт
	500	100	80	50	20	5	1	0,5	2	0,2	0,05	0,005	
Цементація	1 ÷ 4 МПа	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
Глинзація	0,4 ÷ 0,5 МПа					-	-	-	-	-	-	-	-
Дворозчинна силікатизація	-	2 ÷ 8 МПа					0,4 ÷ 0,5 МПа						
Однорозчинна силікатизація	-	-	-	-	-	0,5 ÷ 4 МПа		+	+	-	-	-	
Те саме модифікованим силікатним розчином	-	-	-	-	-	2 ÷ 5 МПа		+	+	+	-	+	
Газова силікатизація	-	-	1 ÷ 5 МПа			-	-	0,5 ÷ 4 МПа		-	-	-	
Смолизація	-	-	-	-	2 ÷ 8 МПа			-	-	-	-	-	
Електрохімічне закріплення	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,4 ÷ 0,8 МПа		-
Підсилення бурин'єкційними палями	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
Те саме при бурінні з обсадною трубою або під захистом розчину	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-

Умовні позначення: «0,4 ÷ 8 МПа» – застосування способу доцільне, підвищується водонепроникність, досягається міцність на стиск від 0,4 до 8 МПа;  
«+» – застосування способу доцільне, підвищується водонепроникність та міцність;

«→» – застосування способу недоцільне або неможливе.

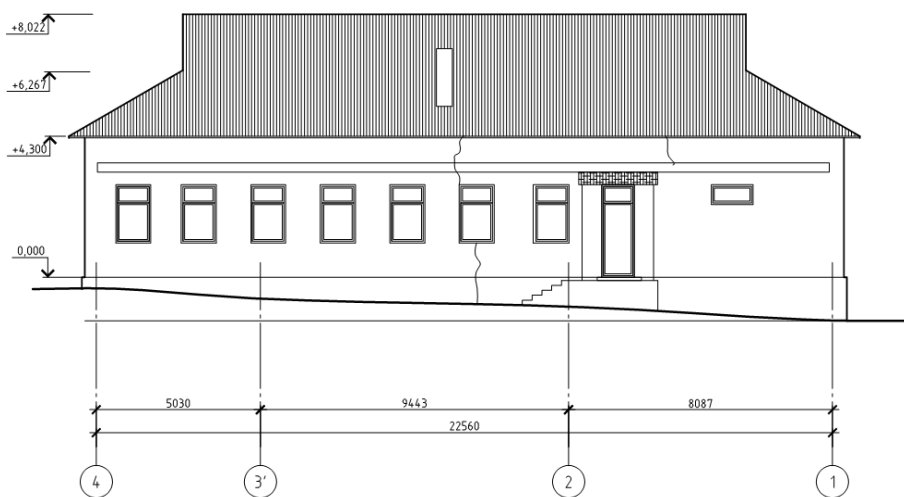
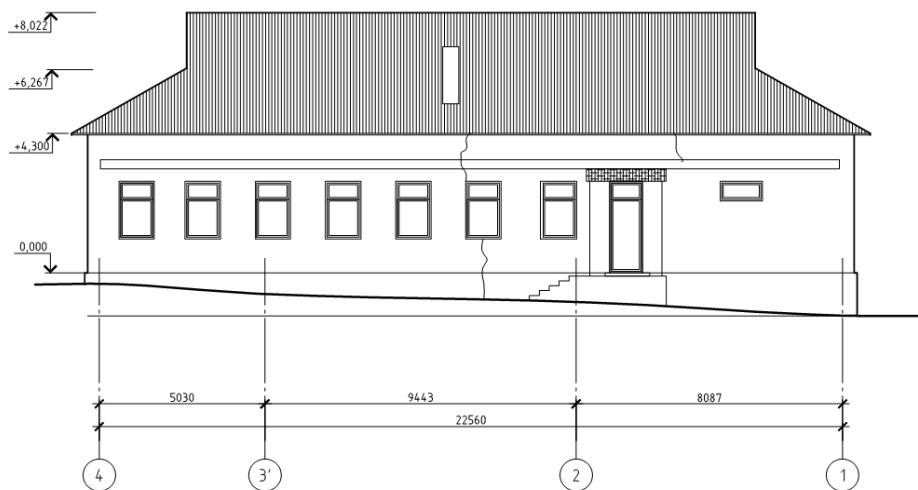


Рис. 4.11. Тріщини в стінах будівлі поста ЕЦ

на ст. Кислівка Південної залізниці





## УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

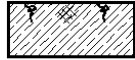
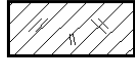

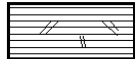

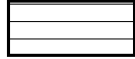
- 1  – Гумусові суглинки важкі, чорного кольору, пластичні
- 2  – Суглинки жовтувато-бурі, важкі, напівтвердої консистенції з вапняними включеннями
- 3  – Глина буре, легка пілувата, твердої консистенції, набухаюча з великою кількістю вапняних включень у формі гнізд та прошарків
- 4  – Глина буре важка, твердої консистенції, набухаюча місцями з вапняними включеннями у вигляді твердих шматочків
- 5  – Глина червоно-буре легка пілувата, твердої консистенції
- 6  – Глина червона легка піщаниста, твердої консистенції

Рис. 4.13. Геологічний розріз  
площадки ст. Кислівка  
Південної залізниці



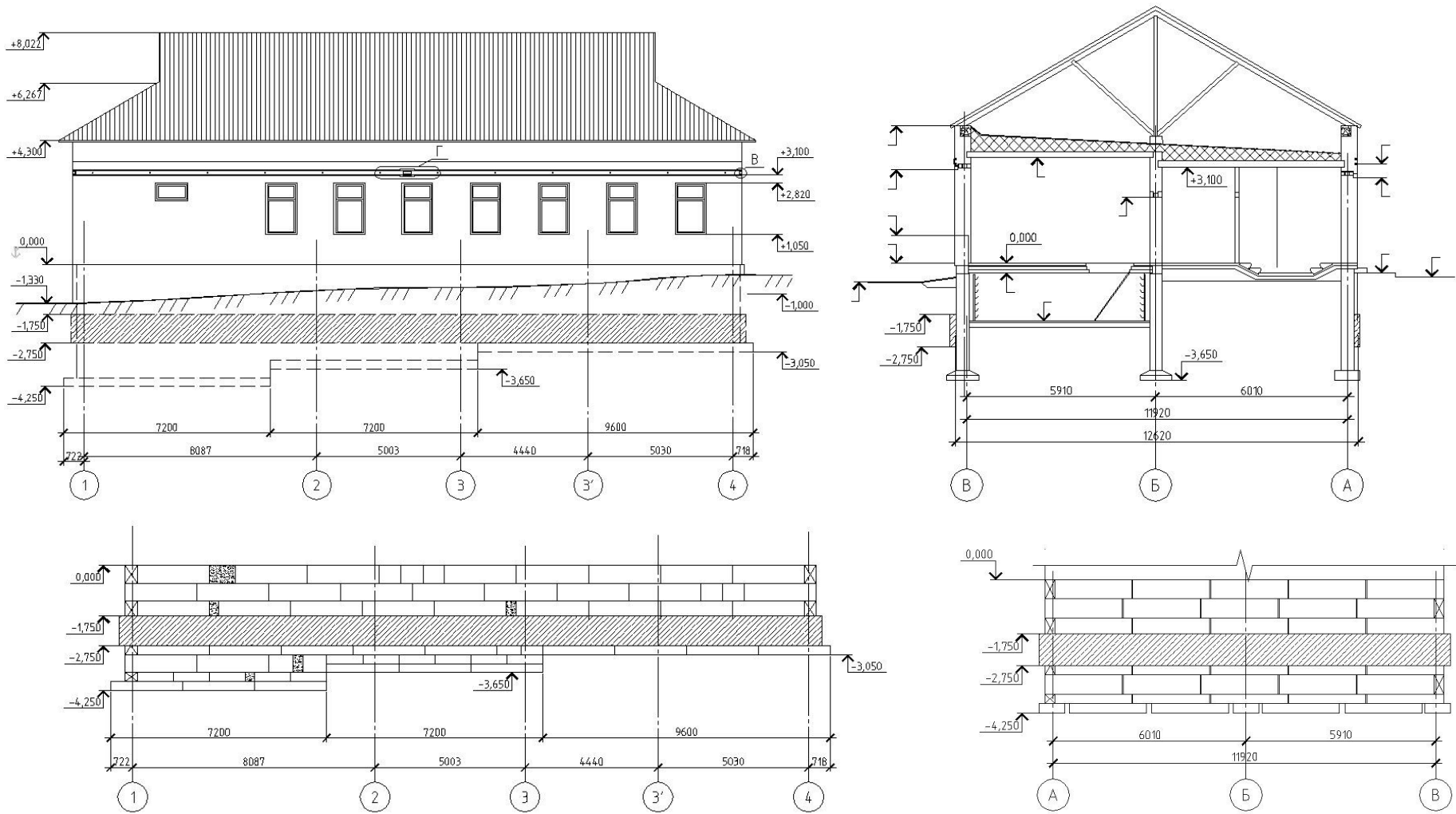


Рис. 4.14. Підсилення будівлі поста ЕЦ залізобетонним і металевим поясами

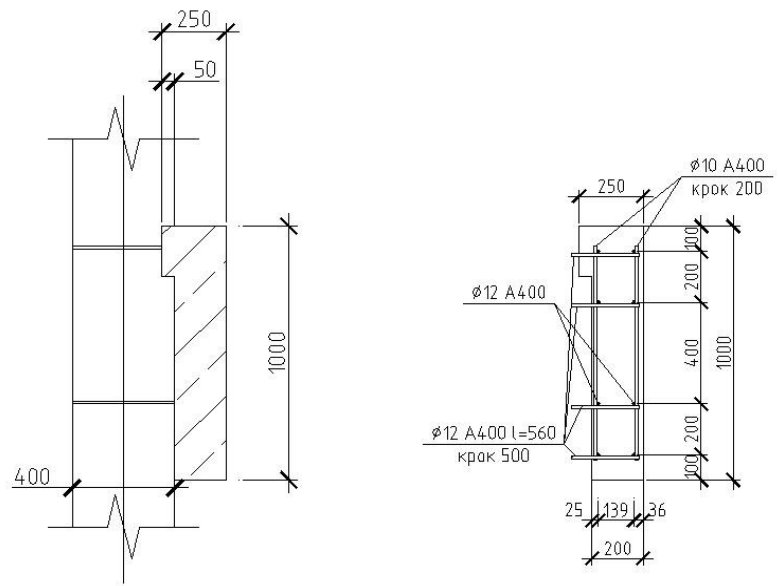


Рис. 4.15. Конструкція залізобетонного пояса

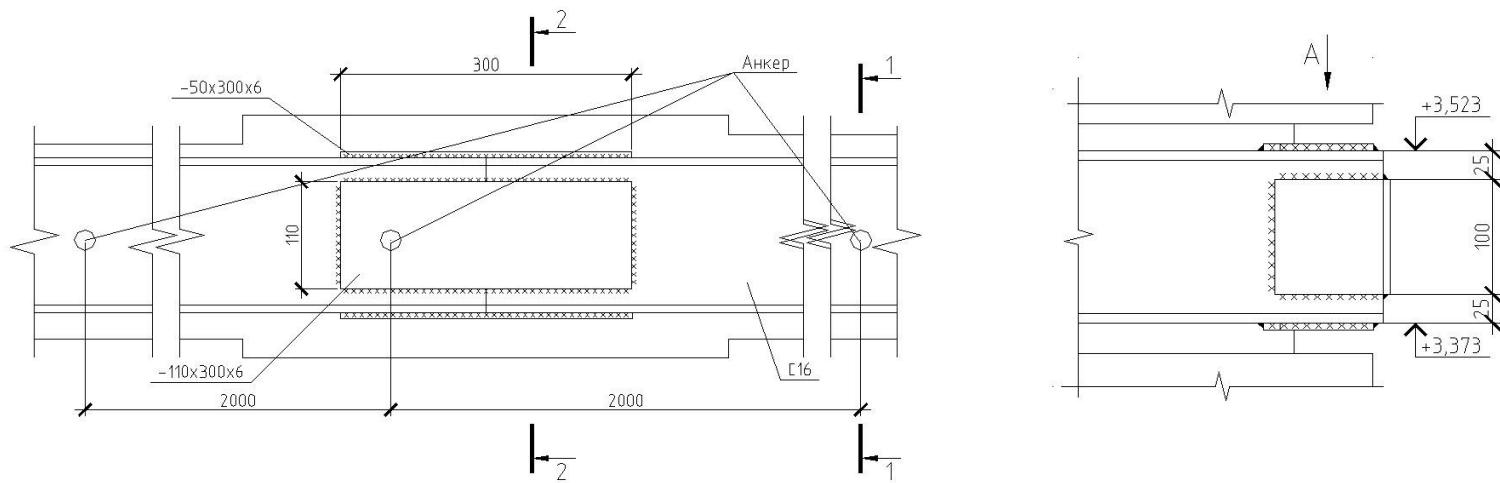


Рис. 4.16. Конструкція металевго пояса



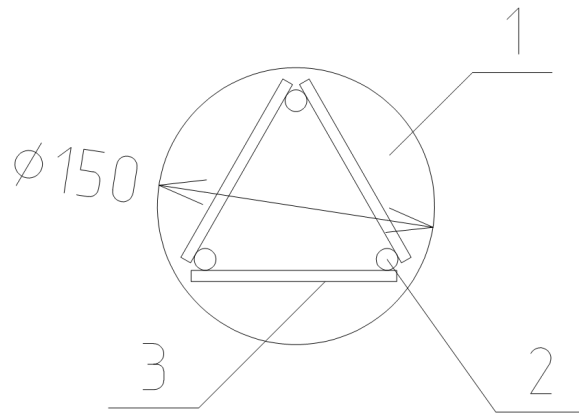


Рис. 4.18. Поперечний переріз буроін'єкційної палі:  
 1 – дрібнозернистий бетон; 2 – подовжня арматура;  
 3 – поперечна арматура

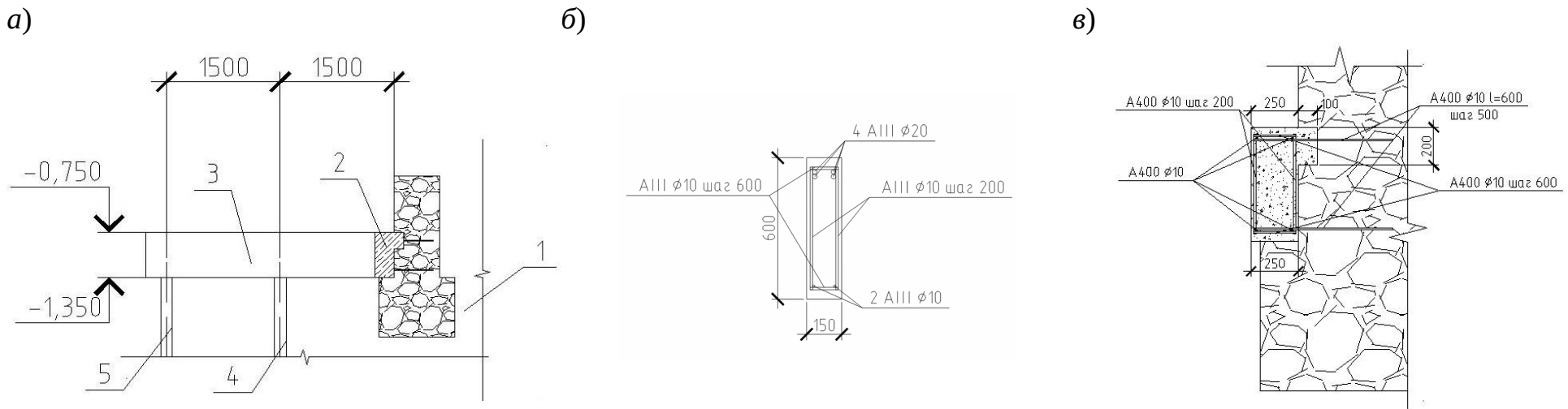


Рис. 4.19. Конструкція залізобетонного ростверку у вигляді горизонтальної рами: а – схема конструкції: 1 – існуючий фундамент; 2 – подовжній ригель рами, суміщений з монолітним залізобетонним поясом; 3 – поперечний

ригель – залізобетонний ростверк пари паль; 4 – основна паля; 5 – паля-анкер; б – переріз поперечного ригеля; в – переріз подовжнього ригеля

