

## **18. ПОДОБРЯВАНЕ НА ДИСПЕРСНИ ПОЧВИ ЧРЕЗ ИНЖЕКТИРАНЕ**

### 1. Уводни бележки.

Приложението на инжекционното заздравяване на дисперсните почви се разширява през последните години благодарение на навлизането на нови технологии и на автоматизирани системи за управление и контрол на инжекционния процес. Това особено се отнася при изграждане на съоръженията на подземната градска инфраструктура.

Инжекционното уплътняване и заздравяване на дисперсните почви се прилага със следните цели:

- намаляване на водопропускливостта на почвата;
- изграждане на бариери или завеси срещу проникването на вода или на замърсители в почвата;
- заздравяване на почвата под фундаментите;
- за подобряване на устойчивостта на изкопи;
- уплътняване на почвата срещу втечняване;
- заздравяване на съществуващи фундаменти;
- за улесняване на прокарането на тунели;
- за ограничаване на деформациите в масива, предизвикани от прокопаването на тунели и шахти;
- за запълване на естествени и изкуствени празнини в близост до подземните съоръжения.

За постигане на описаните цели се използва циментацията, инжектирането на силикатни и полимерни разтвори, както и на глинеста суспензия, които са предмет на по-нататъшното изложение.

### 2. Циментация

Както беше споменато по-напред, инжектирането чрез пропиване, което в миналото се използваше по-често, сега се прилага само за най-грубодисперсните почви, незаглинени чакъли, едрозърнести склонови насипи, моренни материали и др.п. При пясъчните почви проникването на суспензиите в поровото пространство се затруднява от бърза колматацията на зоната разположена непосредствено около инжектора. Извършени са много изследвания за увеличаване на проникващата способност на суспензиите чрез допълнително смилане на цимента, чрез ултразвукова обработка на суспензиите и добавка на различни повърхностно активни вещества и пластификатори. Въпреки това, сега много рядко се заздравява пясъчна почва с пропиване, което е изместено от инжектирането чрез разрушаване с помощта на маншетни тръби.

Проектирането и технологичните схеми на инжектирането на несвързани почви с маншетни тръби зависят извънредно много от геометричните характеристики на заздравената зона и от изискванията, които се предявяват към нея. Инжектираната зона може да бъде под формата на свод, служещ за безкрепежно прокопаване и за облекчаване на работата на облицовката. Тя може да обгръща цялото светло сечение на галерията при наличие на голям водоприток или да представлява масив

с по-големи размери, в който се прокарва изработка близо до повърхността в застроена територия. Инжектирането в последния случай се извършва от повърхността, а в останалите два - от забоя. Това налага големи различия в цялостната организация на работата.

След известно време инжектираната почва се превръща в материал, чиято якост на едноосен натиск може да надхвърли 2,0 МРа, а коефициентът на филтрация да достигне под  $10^{-5} - 10^{-6}$  m/s.

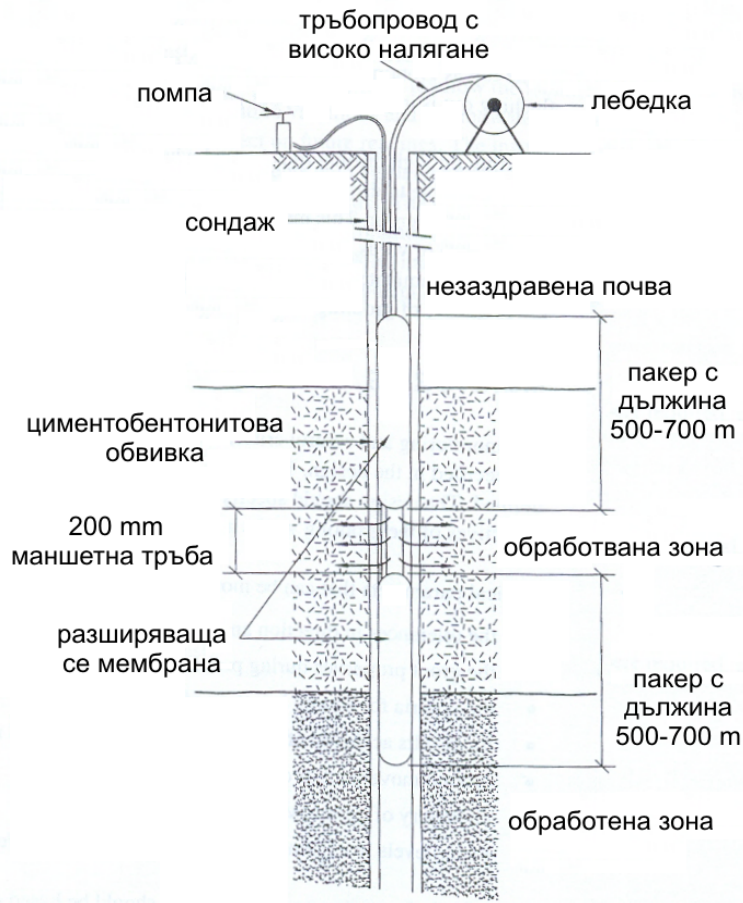
Инжектирането на несвързани почви е трудна задача, особено когато се изпълнява стриктно и се изисква да не се изразходват ненужно големи количества циментова суспензия. Трудностите се увеличават, когато почвата съдържа фини фракции и при наличие на съоръжения, които трябва да не се засягат .

При голям обем на заздравяваната почва се инжектират едновременно много сондажи, като се изгражда автоматизирана инжекционна централа, даваща възможност стриктно да се спазват рецептурите и да се записва количеството на суспензията, нагнетено в отделните инжектори. Автоматизацията на всички технологични операции е достигнала до такава степен, че централа с 10 инжектора се обслужва от двама работника. Голям принос за това имат автоматичните смесители-дозатори, с които се регулира точно състава на многокомпонентните циментови суспензии.

За нагнетяване в Европа се използват двупистонни помпи, чиито дебит не е много голям (2-3 m<sup>3</sup>/h), но предават голямо налягане – до 12 МРа. В Съединените щати се употребяват и центрофугални помпи, имащи противоположни характеристики, които са много подходящи за редки суспензии.

Както беше посочено по-напред за борба с филтрацията и за подобряване на якостно-деформационните свойства при дисперсни почви широко се използва инжектирането с маншетни тръби (tube à manchette). Една от принципните схеми на този метод е представена на фиг. 18.1.

При инжектиране с маншетни тръби съществено значение за успеха на заздравяването има качеството на циментобентонитовия запълнител между тръбата и стените на сондажа. При несвързани почви с голяма водопропускливост съществува опасност циментобентонитовата суспензия да се поглъща от стените на сондажа и да не достигне до горната му част. В такъв случай суспензията се подава с прекъсвания. Обвивката е предназначена да не допуска придвижване на инжекционната суспензия нагоре по ствола на сондажа, а да се разпространява само в зоната около маншета. Това позволява равномерно разпространение на суспензията дори ако масивът съдържа слоеве с различна водопропускливост. Обикновено отношението на цимента към водата е 0,5. Бентонитът се добавя, за да осигури хомогенност и подвижност на суспензията.

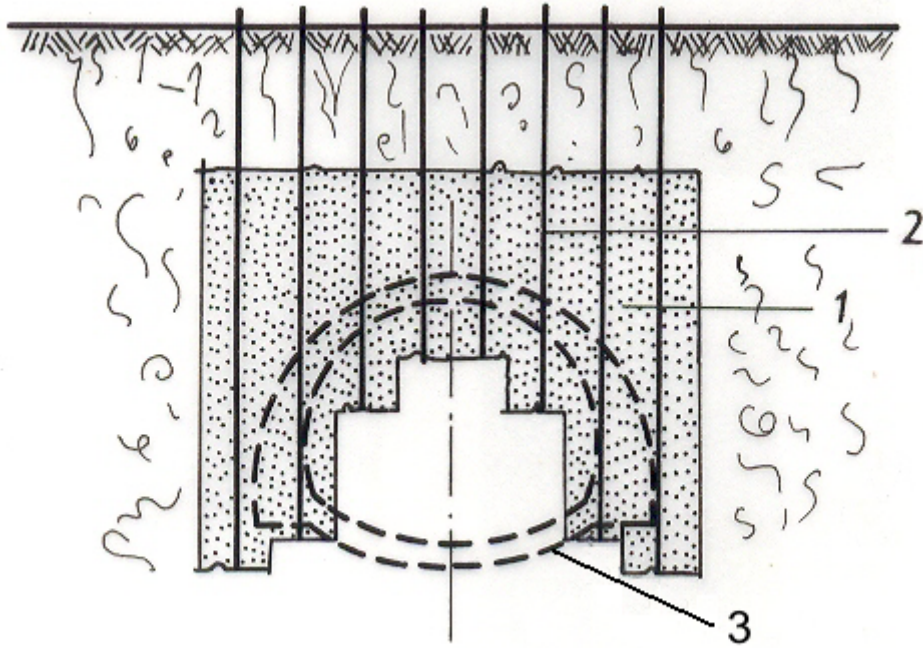


Фиг. 18.1. Принципна схема на инжектирането с маншетни тръби (CIRIA по AFTES, 1991)

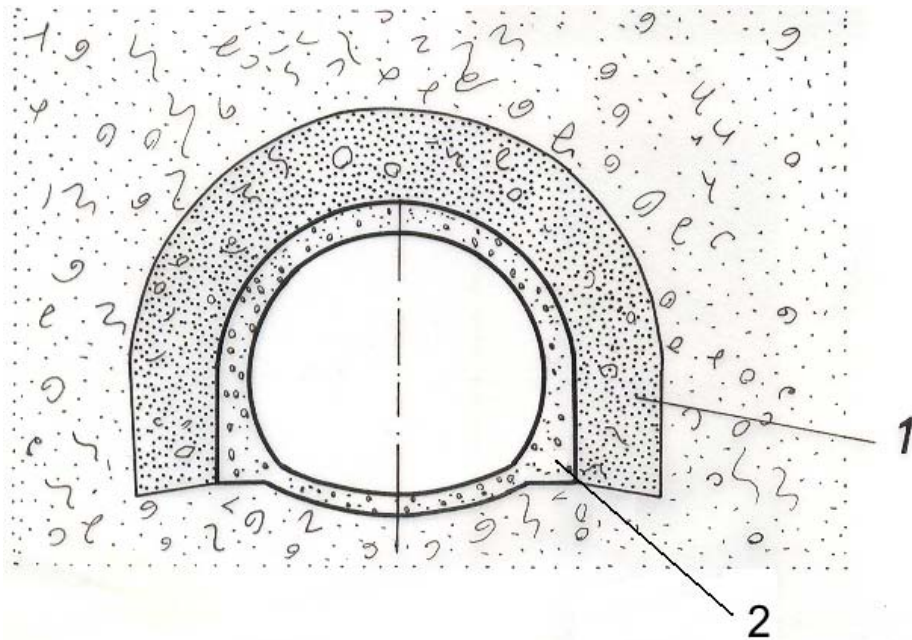
### 3. Циментация на дисперсни почви при строителство на метрополитени

През последните десетилетия инжектирането на дисперсни почви намери широко приложение при изграждане на метрополитени. То може да се прави от повърхността, като се заздравява свода на тунела и пространството около стените му (фиг. 18.2.). Този случай се използва при тунели плитко прокарани под уличното платно, като освен околотунелното пространство се заздравява и земната основа на съществуващи сгради.

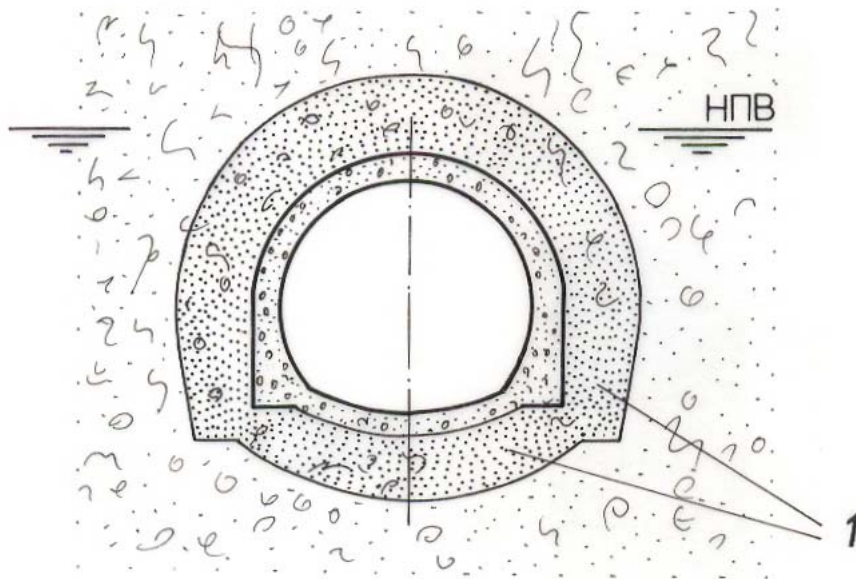
В практиката широко се използва и инжектирането на зона от почвения масив с ограничена дебелина около бъдещото светло сечение на тунела. При прокарване на тунела над нивото над подземната вода тя може да има в разрез куполовидна форма (фиг. 18.3.) или да обхване цялото сечение при високо ниво на водата (фиг.18.4.). Заздравената зона има пръстеновидна форма и освен за ограничаване на водопритока при строителство на тунела, служи още като временен крепеж преди изграждане на постоянната облицовка. Работата на последната много се облекчава от намаляването на земния натиск.



Фиг. 18.2. Инжектиране на масива около тунела от повърхността  
 1 - инжектиран масив, 2 – инжекционен сондаж, 3 – облицовка на тунела



Фиг. 18.3. Заздравена зона около тунела при прокарването му над нивото на подземната вода: 1 – заздравена почва; 2 - стоманобетонна облицовка



Фиг. 18.4. Заздравена зона при тунел, прокарван под водното ниво.  
1 – заздравена почва

Инжектирането се извършва от временна пионерна галерия с по-малък диаметър (фиг. 18.5. и фиг. 18.6.). За пробиването на сондажите се използва ударно-въртеливо сондиране. Инжектират се едновременно голям брой сондажи при компютризиран контрол на всички технологички операции.



Фиг. 18.5. Прокопаване на тунел с фреза след образуване на свод от заздравена почва чрез инжектиране от пионерна галерия



Фиг. 18.6. Изграждане на постоянната облицовка на тунела

*Виждат се пионерната галерия, инжекторите, инжектираната зона с пръстеновидна форма, в дъното - помпата за нагнетяване на циментовата суспензия, арматурата на постоянната облицовка и ивиците от циментов разтвор, които се разпространяват по повърхнините на насляване.*

#### 4. Изграждане на циментационни завеси

Циментационни завеси в дисперсни почви с алувиален произход са изградени и функционират успешно на голям брой земнонаситни язовирни стени: „Сер-Понсон” във Франция, „Зилвенщайн” в Германия, „Мишон Дем” – Канада, „Матмарк” – Швейцария и др.

У нас циментационна завеса посредством инжектиране с маншетни тръби е изградена на яз. Тешел.

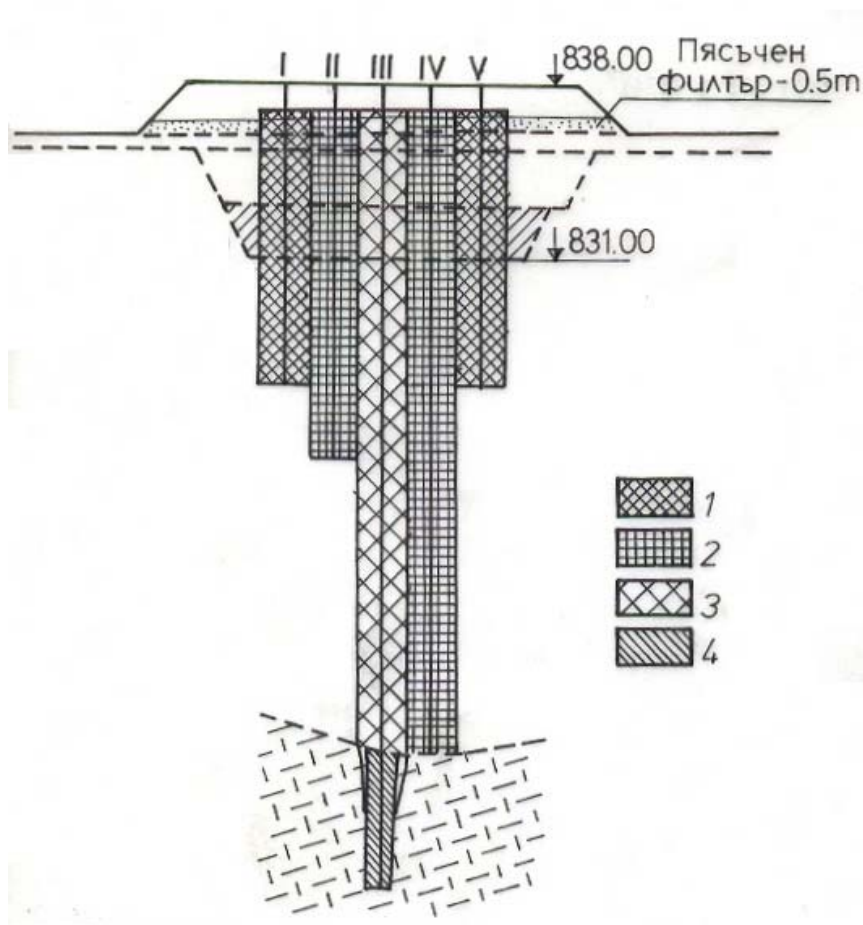
##### *Изравнител “Тешел”*

Високата 30 m каменно-наситна стена с глинено ядро е построена върху алувиални наслаги с дебелина от 26 m. Под тях в левия склон се разкриват водоплътни амфибол-цоизит-хлоритови шисти, а по десния – палеогенски седименти и туфобрекчи.

Уплътняването на алувия е осъществено посредством инжектиране чрез разрушаване с помощта на маншетни тръби. Сондажите са пробити със сонда ЗИФ-300. Суспензиите са приготвяни в специално изградена инжекционна станция, включваща помпи и високотурболентни бъркалки, осигуряващи производителност 70 l/min. Максималното налягане е променяно в зависимост от дълбочината, като е достигало до 38 atm (3,8 MPa).

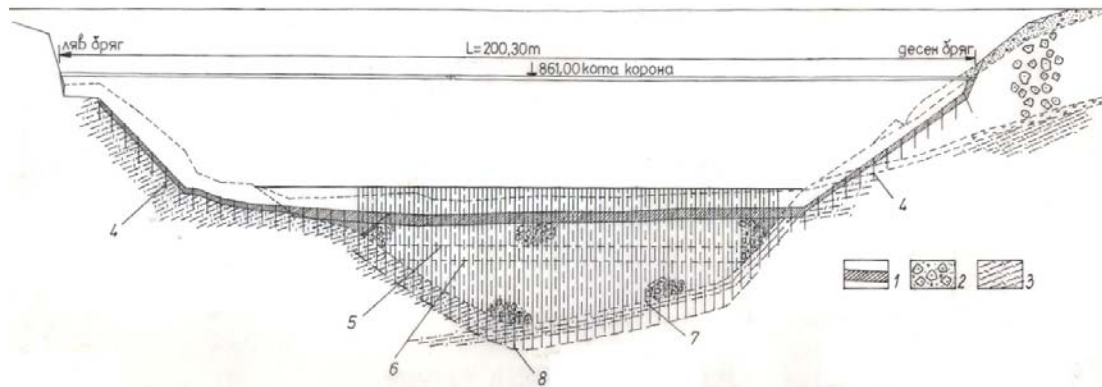
На изравнител “Тешел” за първи път в нашата практика са използвани глинено-циментови суспензии с пластификатори и химични

добавки (фиг. 18.7), чиито състав и свойства са определени с лабораторни изследвания.

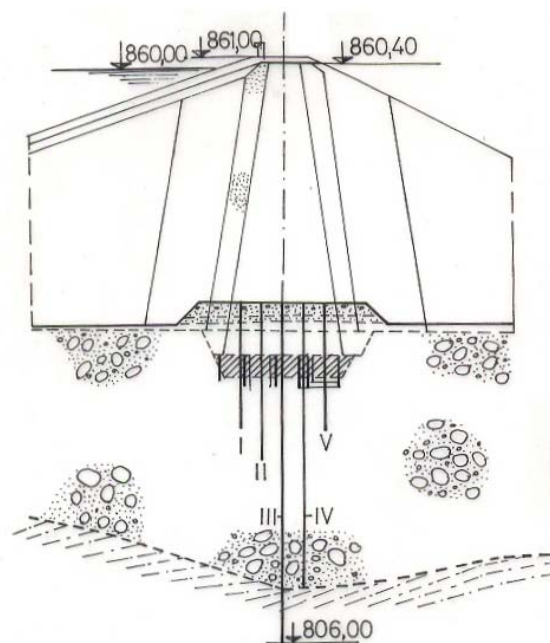


Фиг. 18.7. Състав на суспензията в инжекционните редове на завесата на изравнителя "Тешел". 1 – цимент 75%, глина 20%, бентонит 5%, повърхностно-активно вещество ССБ – 0,3% от цимента, NaOH 0,05% от цимента и глината; 2 – цимент 50%, глина 45%, бентонит 5%, ССБ 0,3% от цимента, NaOH 2% от цимента и глината; 3 – предварително инжектиране на водно стъкло и след това на състав 2; 4 циментова суспензия с бентонит до 5%.

Завесата е петредова, с дължина 95 m, като нейната дълбочина се увеличава от склоновете към долината, пресичайки алувиалните наслаги (фиг. 18.8.). Основният, третият ред е с дълбочина 32 m и навлиза с няколко метра в основната скала (фиг. 18.9.). Разстоянието между редовете и сондажите е 2 m, което е по-малко в сравнение с използваното в чужбина.



Фиг. 18.8. Надлъжен разрез на циментацияната завеса на изравнителя "Тешел". 1- бетонова плоча; 2- алувиална и делувиална почва; 3 – основна скала; 4 – плътна циментация; 5 – контур на I и V ред на завесата; 6 – контур на II ред; 7 – контур на IV ред; 8 – контур на III ред



Фиг. 18.9. Напречен разрез на циментацияната завеса на изравнителя "Тешел" (обозначенията са както при фиг. 18.8.)

За изграждане на завесата на изравнителя "Тешел" са използвани 3780 m сондажи в алувия и 235 m в скалата, около 5300 t цимент, 3400 t глина, 450 t бентонит, 295 t водно стъкло, 39 t сулфитноспиртова каша (ССБ) и 77 t NaOH.

##### 5. Уплътняване чрез инжектиране на глинеста суспензия

Зърнометричният състав на дисперсните почви в дълбочина може да се изменя чрез добавка на по-дребни фракции (прахови и глинести) във вид на водна суспензия. Този процес се нарича колматация т.е. запълване на порите на по-грубодисперсните почви с по-фини-фракции, в резултат



на което намалява обема на порите, понижава се водопропускливостта, а при някои почви се увеличава и носещата способност. Колматацията в миналото се разглеждаше предимно като механичен процес, но сега повечето изследователи отдават значение и на физикохимичното абсорбционно взаимодействие на по-дребните, обикновено колоидни фракции с повърхността на пясъчните частици.

Глинестите частици могат да колматират пясъчна почва, ако диаметърът им е 10-50 пъти по-малък от диаметъра на пясъчните зърна при хидравличен градиент, превишаващ 5. Максималният размер на частиците, които могат да се вмиват в пясъчна среда може да се определи по следната формула (Воронкевич, 1981):

$$d = D \sqrt{\frac{C.I. \left(\frac{1}{n} - 1\right)}{\varepsilon(\gamma - \gamma_B)g}}$$

където: D – ефективният диаметър на порите на пясъка;

C – коефициент, зависещ от порестостта и плътността на пясъка;

I – напорен градиент;

n – обем на порите;

ε – коефициент зависещ от формата на частиците;

g – ускорението на силата на тежестта;

(γ-γ<sub>B</sub>) – теглото на частиците във водата;

Зърнометричният състав на пясъка има определящо влияние върху колматационния процес. Това се вижда от данните на табл. 1.

Таблица 18.1. Дълбочина на колматиране на пясъка според зърнометричния му състав и коефициента на филтрация

Пясък d, mm	Прах или глина, d, mm	Дълбочина на колматиране, cm	Коефициент на филтрация, cm/s	
			Преди колматиране	След колматиране
1-0,5	0,01	>30	0,24	0,012
1-0,5	0,05	20		
0,5-0,25	0,05	14	0,045	0,0003
0,5-0,25	0,01	10		
0,25-0,1	0,01	5	0,0275	0,00005
0,25-0,1	0,05	3		

Минералният и химичен състав на пясъка също оказва влияние на проникването на суспензията. То е по-голямо, когато в него се съдържат водоразтворими соли (Банник, 1976).

Колматацията на пясъците може да се извършва от повърхността при свободно проникване на глинестия разтвор. В този случай

дълбочината на проникване не е много голяма (табл.18.1). Този начин е използван за намаляване на водните загуби от водоеми, изградени в пясъчна почва без облицовка. Неблагоприятно обстоятелство е, че ефектът от колматацията се губи, ако колматираният слой се остави на действието на атмосферните фактори.

Колматацията е значително по-ефикасна, когато се провежда с глинен разтвор под налягане. Този начин е използван за колматиране на пясъци в хидротехническото строителство и за унищожаване на пропадъчността на лъоса в промишленото и гражданското строителство. Интерес за нашата страна представляват опитите за колматиране на пропадъчен лъос, извършени през втората половина на миналия век в Одеския инженерно-строителен институт. Колматирането е осъществено чрез сондажи под налягане 1,5-2,0 atm т.е. 150-200 kPa с помощта на инжектори. Използувана е суспензия на бентонитова глина. Радиусът на проникване на суспензията зависи от коефициента на филтрация на лъоса (табл. 18.2.), от нейната гъстота и дисперсност и от налягането.

Таблица 18.2. Зависимост на радиуса на проникване  $r$  от коефициента на филтрация  $k_f$  на лъоса

$k_f$ m/24 h	радиус на проникване, m
0,1-0,3	0,3-0,4
0,3-0,5	0,4-0,5
0,5-1,0	0,5-0,6
1,0-2,0	0,6-0,7

Глинзацията у нас е перспективна при праховите и пясъчливи лъосови разновидности, които имат сравнително големи коефициенти на филтрация (табл. 18.3.). При тях радиусът на проникване може да надхвърли 0,6-0,7 m.

Таблица 18.3. Коефициенти на филтрация на основните лъосови разновидности в България

Лъосова разновидност	$k_f$ , m/24h
Лъосовиден пясък	3-3,5
Пясъчлив пясък	2,5-1
Типичен лъос	0,8-0,25

Плътноста на нагнетяваната суспензия се определя в зависимост от порестостта на лъоса (Табл. 18.4.)

Таблица 18.4. Плътност на суспензията в зависимост от обема на порите на лъоса

Обем на порите, %	43	44	45	46	47	48	49	50	51
Плътност на суспензията, g/cm <sup>3</sup>	1,08	1,09	1,10	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16

Количеството глина, необходимо за заздравяване на 1 m<sup>3</sup> лъос се определя по формулата:

$$G = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{(1 + \varepsilon_0)(1 + \varepsilon_1)} \cdot \frac{\gamma}{(1 + \varepsilon_1)} \cdot (1 + 0,01.W)$$

където:

$\varepsilon_0$  – порен коефициент на лъоса;

$\varepsilon_1$  – порен коефициент след колматиране (приема се за 0,67);

$\gamma$  – обемно тегло на глината;

w – водно съдържание на глината, от която се прави суспензията

Обемът на суспензията за заздравяване на 1 m<sup>3</sup> лъос е:

$$V = \frac{G}{\gamma_c - \gamma_b},$$

където:

$G$  – количеството на глината;

$\gamma_c$  – обемна плътност на суспензията;

$\gamma_b$  – обемна плътност на водата;

Нагнетяването на праховоглинести суспензии с цел борба с пропадането е използвано в щата Небраска (САЩ), а в щата Калифорния в началото на шестдесетте години на миналия век е прилагано със същата цел при пясъчливи материали. Инжекционните суспензии са нагнетявани при налягане 350 kPa.

В бившия Съветски съюз глинизация на лъоса е прилагана в Одеса за борба с пропадането на местния театър. Извършено е инжектиране със суспензия от бентонитова глина в количество 8-10% от теглото на лъоса. Порестостта на лъоса е намаляла до 37-38%, а  $k_f$  от 0,45 m/24 h на 0,001 m/24 h. Непосредствено след инжектиране водното съдържание на лъоса се е повишило до към 26%, но в продължение на 1 месец то се изравнява с водното съдържание на останалия масив. Деформационният модул на глинизирания лъос е 3,0-3,5 пъти по-голям от модула на естествения лъос във водонапито състояние, а пропадъчността му се ликвидира напълно.

Когато лъосът е сух е целесъобразно в началото да се намокри.

Тъй като нашата страна не разполага с находища на бентонитова глина в близост с лъосовата област представляват интерес възможностите за приготвяне на суспензии след механична и физикохимична обработка на обикновена глина.

## 6. Заздравяване на дисперсна почва чрез инжектиране на смола

В гл. 13 са описани видовете смола, които се използват за инжектиране на дисперсна почва в съвременното строителство. Патентовани са стотици комбинации от такива смоли, приложими при различни почви и строителни условия. Най-широко прилаганите от тях са посочени на табл. 18.1.

Както беше посочено в гл. 13, най-голямото преимущество на разтвора от смола е, че прониква и в почва с малка пропускливост.

Други смоли подходящи за инжекционни разтвори са фенолформалдехидната, резорцинформалдехидната, калциевоакрилатова и полиакриламидна смола. Всички те притежават добри инжекционни параметри и след полимеризация дават твърди, обемнопостоянни и неразтворими продукти в почвата.

В САЩ и Япония широко се използват инжекционни разтвори на базата на акриламид и метиленакриламид с наименования АМ -9, сумисойл и други, които се произвеждат и прилагат в големи обеми.

Таблица 18.5. Приложимост на разтворите на смола (според Европейския стандарт, 1996г )

<b>Вид смола</b>	<b>Вид почва</b>	<b>Предназначение</b>
акрилова	Зърнеста почва, финонапукана скала	Намаление на проницаемостта, подобряване на якостта
полиуретанова	Широки празнини или наличие на течаща вода	Образуване на пяна за спиране на водния приток (смоли взаимодействащи с водата )
фенолна	Фини пясъци и пясъчлив чакъл	Водоуплътняване и заздравяване
епоксидна	Фини пукнатини в зидария и бетон, зърнеста почва	Подобряване на якостта на зърнести и фрагментирани материали