

## **23. ЗАЗДРАВЯВАНЕ ЧРЕЗ ЗАМРАЗЯВАНЕ И ИЗПИЧАНЕ**

### 1. Уводни бележки

В настоящата глава се описват два метода за заздравяване на строителните почви, почиващи на различен физичен принцип. При първия третирането на почвата се постига чрез замразяване на водата в нейните пори, при което се постига формиране на ледени кохезионни контакти, временно увеличаване на якостта и силно намаляване на водопропускливостта. Този метод получи голямо развитие през последните десетилетия, отразено в трудовете на Международните конференции, посветени на него и провеждани на всеки две години от 1978 г. насам. Той се използва в много страни при строителство на подземни съоръжения, във фундаването, в хидротехническото строителство и др.

Счита се, че замразяването е един от най-екологичните методи.

Заздравяването чрез изпичане има по-ограничено приложение. При него полезният ефект се постига чрез изгаряне в почвата на горливи реагенти посредством специално приспособени сондажи. В резултат се получават трайни кристализационни контакти, които увеличават якостта на почвата и намаляват нейната слегваемост.

Методът е използван предимно за заздравяване на пропадъчен лъос под съществуващи съоръжения и за предстроителна подготовка на основата на високи стройни сгради.

### 2. Заздравяване чрез замразяване

Посредством замразяване се изгражда временна ледопочвена стена около подземните съоръжения, която ги защитава от проникване на вода и изпълнява функция на временно укрепване до изграждане на постоянната облицовка. Използува се добре известния процес на поглъщане на топлина от околната среда при преминаване на хладилните реагенти от течно в газообразно състояние. В основата на този процес работят хладилниците.

По време на проучването и проектирането се определят: формата и размерите на замразеното тяло; механичните характеристики, които то трябва да притежава; термофизичните показатели на почвата и технологията на замразяването.

Замразеното тяло има различна форма според вида на съоръжението. При строителството на тунели, както при инжекционните методи, замразяването около светлото сечение на подземната изработка се извършва чрез специално оборудвани сондажи, прокарани от повърхността или от галерия с малки размери.

Характерът на сцеплението в замразените почви се различава от естествените. При тях освен съществуващите връзки действуват още сили на сцепление, обусловени от циментационните контакти между ледените кристали и минералните частици на почвата. Тъй като количеството на леда в почвата и механическите му свойства зависят от температурата, с нейната промяна се изменя и якостта на циментиращите връзки. Например, при понижаване на температурата на една глина от  $-30^{\circ}$  на  $-40^{\circ}$  якостта на опън нараства от  $25 \cdot 10^5$  на  $50 \cdot 10^5$  Pa.

Механичните характеристики на замразените почви са били предмет на редица изследвания. Установено е, че те имат еластично-вискозно-пластично поведение и подчертана склонност към пълзене. Якостта им зависи освен от температурата на изстудяването, още от зърнометричния и химичен състав на почвата, от водното съдържание  $w$  и от обема на порите  $n$ .

Якостта нараства от глинестите към грубозърнестите почви. Във валуните и чакълите студът се разпространява около 2 пъти по-бързо отколкото при глините.

При глините не замръзва всичката вода, тъй като е по-високо съдържанието на водоразтворими соли и част от водата е в свързано състояние. Това намалява относителното количество на свързващата субстанция т.е. на ледените кристали. И обратно, колкото е по-високо  $w$ , толкова ледът е в по-голямо количество и е по-равномерно разпределен между частиците на почвата.

През втората половина на миналото столетие беше постигнат напредък в методите на изчисляване на параметрите на процеса на замразяването и проектирането на замразените почвени елементи (Трупак, 1970, Банник, 1976, Воронкевич, ред. 1981, Callavresi, 1982 и др.).

За ориентировачно изчисляване на необходимата дебелина на замразения слой около прокараното съоръжение при неголеми изработки с  $d < 10-12$  m може да се използва формулата:

$$z = a \left( \sqrt{\frac{\sigma_{\text{доп}}}{\sigma_{\text{доп}} - 2p}} - 1 \right)$$

или формулата:

$$z = a \left[ 0,29 \cdot \frac{p}{\sigma_H} + 2,3 \cdot \left( \frac{p}{\sigma_H} \right)^2 \right],$$

където:

$z$  – дебелина на стената на ледопочвения пръстен, cm;

$a$  – вътрешен диаметър на ледопочвения пръстен, cm;

$p$  – максималното налягане по външната повърхност на пръстена, създавано от околната почва  $-10^5$  Pa;

$\sigma_H$  – якост на натиск на замразената почва  $-10^5$  Pa;

$\sigma_{\text{доп}}$  – допустимо натоварване на замразената почва  $-10^5$  Pa;

Получените дебелини по тези прости формули се умножават с голям коефициент на сигурност. Съществуват и по-точни решения, които отчитат особеностите в текстурата на замразявания масив и якостно-деформационното му състояние, които могат да се намерят в цитираните по-горе източници.

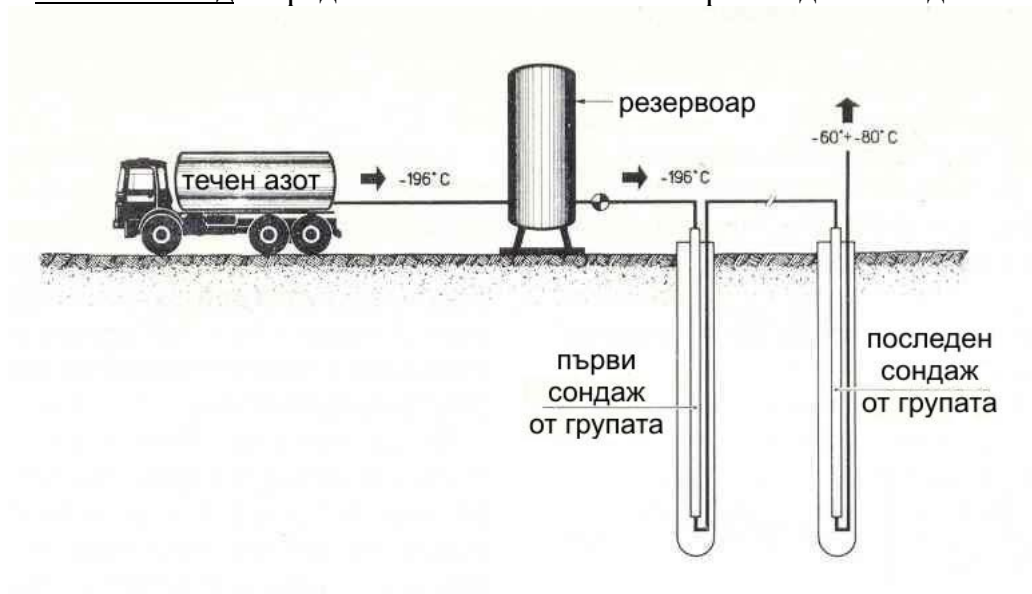
Замразяването на почвата се осъществява по три начина:

- директно замразяване (отворена схема). При този начин се използва хладилен агент с много ниска температура на изпарение (течен азот), който се изпарява в хладилните сондажи и след това се разсейва в атмосферата (фиг. 23.1.);

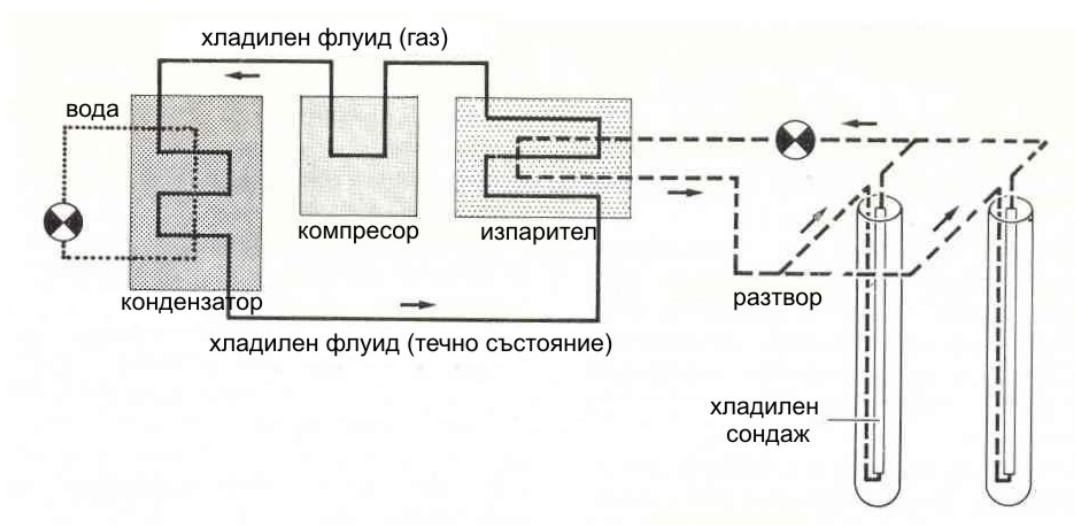
- индиректно замразяване (затворена схема), при която охлаждането не става непосредствено от източника на мраз, а с охладен с него разтвор, който

циркулира по тръбопроводите и след повишаване на температурата му се връща в станцията за изстудяване (фиг. 23.2.);

- смесен метод – представлява съчетание на горните два метода.



Фиг. 23.1. Принцилна схема на заздравяването чрез директно замразяване (по Callavresi, 1982).



Фиг. 23.2. Принцилна схема на индиректното замразяване (по Callavresi, 1982).

Директно замразяване. Използува се течен азот, получен от въздух чрез фракционна дестилация. Той се транспортира до обекта със цистерна, в която се поддържа налягане до 10 атм. и температура  $-196^{\circ}$  (след превишаване на тази температура азотът преминава от течно в газообразно състояние).

На обекта течният азот се съхранява в стоманен двустенен резервоар. Поддържането на вакуум между двете стени запазва посочените по-горе характеристики на течния азот (фиг. 23.1.).

Включването на азота в схемата на изстудяване става под действие на налягането в резервоара (което се регулира с изпарител). Посредством тръбопровод азотът достига до хладилните сондажи, които са свързани на серии от групи. Последният сондаж от групата има изпускател, снабден с клапан, през който изпареният азот се освобождава в атмосферата.

Хладилният сондаж съдържа две коаксиални метални тръби, свързани помежду си със специална глава, която прави възможно постъпващия от тръбопровода течен азот да постъпи във вътрешната тръба, след това да навлезе в пространството между двете тръби, да се отправи към следващия сондаж или да се освободи в атмосферата, ако този сондаж е последен във веригата.

Пространството между външната замразителна тръба, която е херметично затворена и направена от издръжлива на студ стомана, е запълнено със смес с висока топлинна проводимост.

Постъпването на течния азот във всяка група хладилни сондажи, свързани паралелно, се регулира с издръжливи на студ кранове, позволяващи регулиране на дебита.

Между хладилните сондажи са прокарани други сондажи, снабдени с устройства за измерване на температурата на почвата. Замразителната система трябва да бъде достатъчно гъвкава, за да може да се управлява разпределението на студа съобразно достигнатото понижение на температурата в почвата и по този начин да се гарантира хомогенност на замразяването. Допълнителен контрол на ефекта на охлаждането се постига чрез измерване на температурата на азота, който се освобождава в атмосферата.

Големият криогенен ефект на течния азот позволява бързо замразяване на почвата - от 2 до 4 дни и преодоляване на неблагоприятни обстоятелства, например движение на подземната вода.

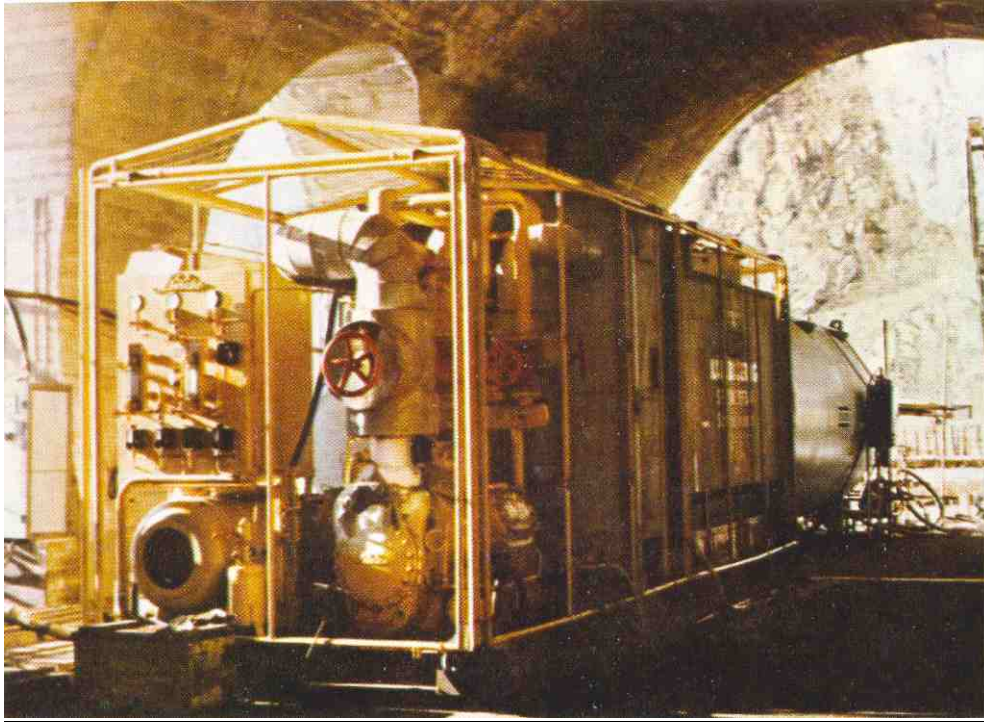
След като почвата бъде замразена, следващата фаза е поддържане на това нейно състояние до завършване на изкопните работи и на постоянното укрепване.

Непрекъснатият запис на измерванията и неговото графично представяне позволява да се добива представа за състоянието на замразения масив във всеки момент и при необходимост да се възстановява нарушеното равновесие.

Индиректно замразяване. Както беше посочено по-горе (фиг. 23.2.), при този метод между хладилните сондажи и хладилната станция циркулира охладен разтвор на сол (например  $\text{CaCl}_2$ ) с ниска температура на замръзване (фиг. 23.3.). Хладилната станция охлажда разтвора от  $-25^{\circ}$  до  $-35^{\circ}$  чрез изпаряване на течен амоняк или на фреон. Напоследък се прилагат разтвори, които имат температура на замръзване до  $-60^{\circ}$ .

Замразяващата тръба има конструкция както при предишния метод, но е с по-голям диаметър. Времето за замразяване по този метод за една серия сондажи е от 3 до 4 седмици.

Смесена система. В отделни случаи в практиката двата метода се използват и комбинирани. Първо се прави директно замразяване с течен азот, а след това с индиректния метод се поддържа замразеното състояние.



Фиг. 23.3. Изглед на хладилна станция

#### По избора на метод за замразяване

Приложението на описаните методи преминава през следните основни фази:

- монтиране и приготвяне за пускане в действие на източника на замразяване ( хладилна станция или резервоар за складиране на течен азот);
- монтиране на разпределителните тръбопроводи и оборудване на хладилните сондажи;
- провеждане на замразяването и на контролните работи;
- поддържане на равновесието на замразения масив.

Различията между методите са по отношение на броя на персонала, времето за изпълнение и производствените разходи.

Методът с течен азот изисква не голям на брой, но квалифициран персонал, който трябва да поддържа системата при работа с много ниска температура, да контролира непрекъснато разпределението на студа в сондажите и да коригира подаването на азота, така че да се получи равномерност на замразяването.

Индиректният метод изисква значителен брой специалисти за работа на хладилната станция, за наблюдения на мрежата, по която циркулира охладения разтвор, за отстраняване на аварии и всичко това в продължение на няколко седмици.

Сравнителната съпоставка на разходите по основните дейности на двата метода показва, че при първия метод близо два пъти повече средства се изразходват за самото замразяване, отколкото при втория (фиг.23.4.). Например за замразяване на 1 m<sup>3</sup> почва с водно съдържание 30% се изразходват около 1000 l течен азот.



Фиг. 23.4. Съпоставка на средствата необходими за основните дейности по двата метода

При втория метод повече от два пъти са по-големи средствата, които отиват за сондиране, оборудване на сондажите и изграждане на разпределителната мрежа.

Общо взето, индиректният метод е по-икономичен (разходите за изпълнение са 2-3 пъти по-малки), но изисква по-големи капиталовложения (главно за хладилната станция) и по-продължително време. За избора на този метод не е без значение големият опит от дългогодишното му използване.

В същото време директният метод често се прилага в практиката заради неговата гъвкавост и по-голям криогенен ефект. Той е предпочитан при по-малък обем на замразяваната почва, когато се налага бърза интервенция, при движеща се подземна вода и т.н.

Смесеният метод се предпочита, когато се замразяват хетерогенни почви и в случаи, когато е необходимо продължително замразяване. Най-напред се извършва бързо заздравяване с течен азот, а след това замразеното състояние се поддържа с циркулация на охладен разтвор.

### 3. Приложение в практиката

До 1960 г е използван само индиректният метод. Първите му приложения в минното дело са били при прокарване на галерии и шахти под вода. След това в практиката бързо навлиза директното замразяване поради неговата гъвкавост и бърз ефект. Но поради високата цена на този метод индиректното замразяване не е изоставено.

В страните на Европейския съюз разглежданите методи имат широко приложение в практиката. Големи обеми замразена почва са използвани при строителството на метрополитените в Париж, Штутгарт, Есен, Франкфурт, Дуизбург, Лондон, Осло, Хелзинки, Цюрих и Барселона. Те намират чести приложения в Белгия в минната експлоатация. Използвани са при строителство на дълбоки изкопи и във фундаментно-строителните работи. В Италия приложението на директният метод започва през 1970 г. при изграждане на мостови опори и устои на виадукт, за противифилтрационна завеса на дълбоки

изкопи във водоносен алувий. Понякога е комбинирано с циментови инжекции. Прилаган е смесения метод.

В СССР приложението на метода започва преди Втората световна война. Използван е при изграждането на метрополитените в Москва, Киев, Ленинград, Тбилиси, Краков и др.

При метрото в Москва и Киев при 90 наклонени тунела с обща дължина 4500 m е приложено замразяване на водоносна почва.

Замразяването е широко използвано и при строителство на помпени станции под земята за водоснабдяване и хидромелиоративно строителство покрай реките Волга, Ангара, Западна Двина и др.

В хидротехническото строителство то е прилагано при строителство на язовирни стени и докове по реките Долгая, Певек, в района Мирний и др. До 1976 г са били прокарани 500 шахти с обща дълбочина 43 km с използване на замразяване на водоносна почва.

#### 4. Заздравяване чрез изпичане

Заздравяването чрез изпичане се извършва с помощта на специално приспособени сондажи. Дълбочината на обработката е до 10-15 m. Отначало са правени опити с нагнетяване на въздух, нагорещен до 500-700°, но впоследствие практическо приложение е получило изгарянето на горивни смеси в самия сондаж под налягане 0,15- 0,5 .10<sup>5</sup> Pa. Газовете отделени при изгарянето, нагreti до висока температура се разпространяват под налягане в порите, нагряват почвата и излизат на повърхостта охладени. Използват се горящи естествени и изкуствено получени газове, соларно масло, нефт, бензин и газ.

Течното или газообразното гориво се впръсква през специални дюзи и се изгаря в сондажи с диаметър 100-200 mm. В резултат на термичната обработка се получава заздравен стълб около сондажа, който придобива цилиндрична форма при равномерна проницаемост в дълбочина. Когато обаче проницаемостта в дълбочина намалява вместо цилиндър се получава конично тяло, което е нежелателно. В такъв случай се увеличава термичната обработка в долния край на сондажа.

Най-много методът е използван за заздравяване на фундаменти на сгради и съоръжения при пропадане на льос. Тук методът е развит от професор И. М. Литвинов от Киев непосредствено след Втората световна война. В продължение на десетилетия се използва широко в СССР. Освен това е прилаган успешно в Унгария, Чехия, Словакия, САЩ, Индия и други страни.

Приложението на метода е технико-икономически целесъобразно в следните случаи:

- за заздравяване на основите на високи и стройни новостроящи се съоръжения върху льос (високи комини, доменни пещи, водонапорни кули, многоетажни сгради и др.);
- за преустановяване на деформациите на пропаднали сгради и съоръжения;

Изгарянето на различните газове и горливи смеси се извършва в затворени сондажи под налягане. Разходът на въздуха за изгаряне на един килограм гориво е 25 m<sup>3</sup> , а при газово гориво 10 m<sup>3</sup> въздух - 1 m<sup>3</sup> изгорен газ. При льосовите почви чрез сондаж с диаметър 0,15-0,2 m в течение на 8 -10 дни може да се

създаде здравен почвен стълб с диаметър 1,5-2 m и дълбочина 8-10 m. Обикновено заздравяването се прави едновременно на група сондажи (12-15 броя). Изпичането на лъса се извършва при температура 800-1000°. Обикновено се закрепват 33-36 % от площта и обема на пропадъчната основа.

Около един сондаж, в който се изгаря горивна смес се образуват няколко термозони (отвън на вътре): нагрятата зона; зона на начало на дехидратация; зона на дехидратация; зона на разлагане на минерали и зона на разтопяване и спичане.

В първата зона температурата е до 100-105° и единственото изменение в почвата е загубата на свободна вода. Във втората зона температурата е от 100-300° и характерно за нея е загубата на свързаната вода и на пластичността на почвата. В третата зона (температура 300-700°) се извършва пълна дехидратация на глинестите минерали и разрушаване на кристалната решетка на повечето от тях. Това се отразява силно на физикомеханичните свойства на строителните почви. От изпитвания е установено, че след 350° лъсът започва да губи забележимо пропадъчността си. Якостта на едноосен натиск нараства до 4-6. 10<sup>5</sup> Pa.

Още по-сложни и дълбоки преобразувания се извършват в почвата в четвъртата термозона при температура от 700-1000° C. При около 800° калцитът започва да се разлага, радикални изменения претърпява и кристалната решетка на глинестите минерали. Образуват се нови вещества, притежаващи хидравлична свързваща способност. Почвата получава тухлен цвят, висока водоустойчивост, загубва напълно такива качества като пропадъчност и набъбване и нейната якост на едноосен натиск нараства до 4,0 MPa.

При повишаване на температурата над 1200° настъпва стопяване на почвата и образуване на нови минерали. След изстиване зоната се превръща в скала.

За приложението на метода в СССР бе изготвена специална инструкция. У нас методът е познат отдавна (Стефанов и Кремакова, 1960) но засега не е прилаган.

Изпичането на строителните почви може да стане и чрез поставяне в тях на проводници – нагреватели, които се загряват с електрически ток. По този начин са заздравявани плаващи пясъци. Например – при изграждане на спомагателни шахти на комбината Тулаугол в Русия. Шахтата е имала размери 4,2 на 4,6 m. При преминаване на плаващия пясък на забоя е била поставена дъска с дебелина 20 cm и отвори за 30 нагреватели. Нагревателите са поставени по контура на шахтата на 50 cm един от друг в сондажи достигащи до глинестия пласт, разположен под плаващия пясък. В действие е имало едновременно по 3 нагревателя.