

16. ПРИЛОЖЕНИЕ НА ИНЖЕКЦИОННОТО ЗАЗДРАВЯВАНЕ НА СКАЛИ В ХИДРОТЕХНИЧЕСКОТО СТРОИТЕЛСТВО

1. Уводни бележки

Инжекционното здравяване на скали (предимно чрез циментация) е намерило най-широко приложение в хидротехническото строителство. Прилага се при изграждане на противофилтрационни завеси на язовирни стени, чието основно предназначение е уплътняване на скалната основа и намаляване на нейната водопропускливост. Освен това се използва за повишаване на якостта на скалата и намаляване на нейната деформируемост. За решаване на тези задачи се изпълнява голям обем инжекционни работи. При язовирната стена „Санта Джустина” в Италия дълбочината на противофилтрационната завеса е 200 m. За уплътняване на основата на стената Камароса в Испания са изразходвани 41 000 t цимент и около 150 000 t инертни материали.

Освен при строителството на язовирни стени инжекционното здравяване се използва при прокарване на хидротехнически тунели и изграждане на други спомагателни съоръжения.

Голям обем циментационни работи са изпълнени и в нашето хидротехническо строителство. Те започват с изграждането на язовир “Бели Искър” (1935 – 1946 г.), след което са приложени при строителството на десетки язовирни стени и хидротехнически тунели.

Така например, при язовир “Антонивановци” е изградена противофилтрационна завеса, чиято дълбочина достига до 85 m, а при яз. Кърджали - до 90 m. Почти при всички язовири е извършвана площна циментация за здравяване на основата. Освен това е правено инжектиране на основата на отбивните водоземни и преливни съоръжения. При някои бетонови стени (язовир “Антонивановци”) са инжектирани фугите между блоковете на стената, а на яз. “Васил Коларов” - самата каменна зидария. Значителен обем инжекционни работи е реализиран при изграждане на напорните деривационни тунели на Баташкия водносилосов път, по деривацията “Искър” и др.

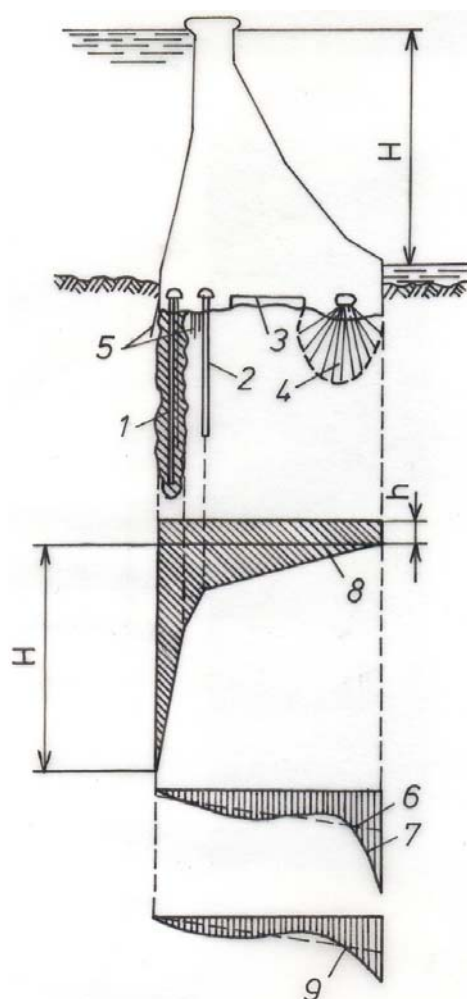
Инжекционните работи у нас са извършвани при сложни геолого-тектонски условия. Независимо от това те са успешни, доказателство за което е сигурната експлоатация на съоръженията. Натрупаният опит е отразен в редица публикации (Антонов и др., 1958, 1960; Комитет по енергетиката и горивата, 1965, ”а” и “б”, Евстатиев и Ангелова, ред, 1993 и др.).

2. Циментационни работи при изграждане на язовирни стени

Инжекционното уплътняване и здравяване е най-съществената част от комплекса инженерни мероприятия за подобряване на филтрационните и деформационни свойства на скалната основа, чието проектиране се извършва на базата на детайлни инженерногеоложки, земномеханични и хидрогеоложки проучвания и изследвания. При това проектиране се използват методи за математично и геомеханично моделиране, които дават възможност да се прогнозира разпределението на напреженията и налягането на водата в скалния масив. От тези изследвания са направени изводи, позволяващи да се подобри ефекта на инжекционното уплътняване и здравяване. Например, изнасянето на противофилтрационната завеса на известно разстояние пред язовирната стена

намалява вертикалното напрежение и противоналягането. Доказан е големият ефект на дренажните сондажи зад противофилтрационната завеса, които при определени условия даже имат по-голямо значение от нея за сигурността на стената и др.

При изграждане на язовирни стени циментацията изпълнява две основни задачи. Първата е противофилтрационна защита на горната (от към водохранилището) част на скалната основа, където напреженията предавани от съоръжението обикновено не са големи, а филтрационното налягане достига до високи стойности. Това се постига чрез изграждане на противофилтрационна завеса. Втората задача е заздравяване на основата, което най-често се налага под долния край на съоръжението, където напреженията са най-големи (фиг. 16.1).

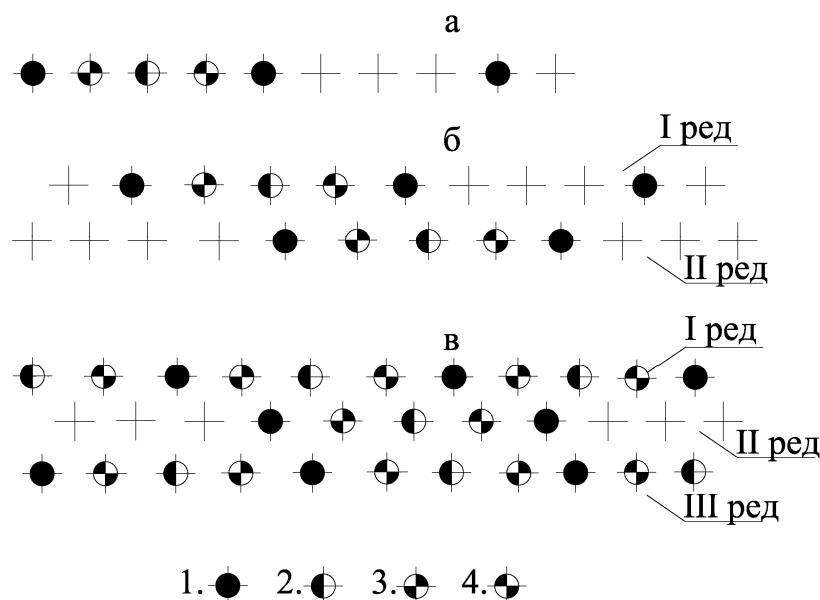


Фиг. 16.1. Диаграми на разпределението на филтрационното налягане и на напреженията в основата на язовирната стена при наличие на противофилтрационна завеса и на дренаж (по Адамович, 1980)

1 - противофилтрационна завеса; 2 - дренажен сондаж; 3 - хоризонтален дренаж; 4 - сондажи на заздравителна циментация; 5 - площна циментация; 6 - епюра на измерените вертикални напрежения; 7 - епюра на изчислените вертикални напрежения; 8 - епюра на филтрационното налягане; 9 - епюри на измерените и изчислени тангенциални напрежения

При неголяма дебелина на водопрпускливия слой противифилтрационната завеса се изгражда до водоупора с известно навлизане в него. При дълбоко залягане на водоупора завесата се построява до пласт, имащ относително водопоглъщане $q=0,01\div 0,05$ l/min или с $k_f=10^{-5}-10^{-4}$ cm/s. При опасност от механична или химична суфозия е валидна долната граница.

В зависимост от инженерногеоложките и хидрогеоложките условия завесата съдържа един или няколко реда сондажи, които се инжектират по метода на постепенното сгъстяване. Отначало се инжектират сондажите от първа поредност. Със сондажите от втора поредност се запълва незаздраното пространство от предишното инжектиране. След това се правят опитни водонагнетявания и при необходимост се осъществява инжектиране с трета поредност. Евентуално се изграждат и контролни сондажи от четвърта поредност, в отделни зони, показали q по-високо от изискването по проекта, в които се нагнетява разтвор (фиг. 16.2.).



Фиг. 16.2. Изграждане на циментационна завеса чрез постепенно сгъстяване на инжекционните сондажи
 а – едноредна завеса; б – двуредна завеса; в – триредна завеса;
 1 – основни сондажи от първа поредност. Сгъстителни сондажи:
 2 – втора поредност; 3 – трета поредност; 4 – четвърта поредност

Инжекционните сондажи могат да бъдат вертикални и наклонени, като най-добър резултат се получава, когато те са разположени вертикално на основната система пукнатини (вж. фиг. 12.1.). При многоредови завеси не се инжектират едновременно сондажите разположени един срещу друг. При двуредни завеси се изгражда най-напред реда откъм въздушната страна, а след това реда откъм водната. При триредни завеси първо се изпълняват външните редове, а след това вътрешния. Отделните сондажи се инжектират на интервали, чиято дължина е обикновено 5 m.

При многоредни завеси не е необходимо ширината на завесата да бъде еднаква по цялата дължина. До долния ѝ край, където водният напор е най-малък достига обикновено единият ред сондажи.

В горната част на земната основа скалата е най-силно напукана, с най-голяма водопроницаемост и най-малка товароносимост. Това налага изграждане на допълнителни сондажи до по-малка дълбочина. Такъв е случаят с т.нар. площна циментация, която се осъществява под цялата язовирна стена в руслото на реката и със здравителната циментация, чиято цел е повишаване на носещата способност на скалната основа в най-силно натоварената ѝ част (фиг. 16.1.). Площната циментация се прави обикновено след полагане на най-долните слоеве на бетона (обикновено с дебелина 1-3 m) и дебелината на обработената зона е 3-5 m. С нейна помощ освен по-добро уплътняване на основата се осъществява и здрава връзка между бетона и скалата.

Разстоянието между сондажите в завесата е най-често от 2 до 4,5 m и зависи от вида на скалата и от нейната напуканост. Сондажите се правят от повърхността или от специални галерии, които при някои язовирни стени могат да бъдат на няколко етажа (например, язовирите “Кърджали” и “Антонивановци”).

Дълбочината на противифилтрационната завеса се изменя в големи граници в зависимост от дебелината на напуканата или окарстена зона: 3-10 m – при Братската и Ланджанурска ВЕЦ в бившия СССР; 20-30 m – яз. “Бели Искър”, “Студена”, “Васил Коларов”, “Студен Кладенец”; 50-60 m – яз. “Ал. Стамболийски”; 90-100 m – „Комараса” в Испания, „Кастион” във Франция, яз. Кърджали; 120-150 m – Тин и Соте във Франция, Цейцир в Швейцария и даже до 200 m – „Санта Джустина” в Италия, Гран Дисканс в Швейцария.

Допустимото налягане на инжектирането зависи от дълбочината, на която се провежда, от деформационните свойства на скалите и от степента на тяхната напуканост.

Разходът на цимент е твърде разнообразен. При малко напукани кварцити, гнайси, габро и амфиболити е по-малък от 40 kg/m, при силно напукани скали и тектонски зони може да надхвърли няколко тона на 1 m сондаж. Разходът на цимент силно нараства в карстовите зони. Например, за инжекционните работи на стената Кастион във Франция са изразходвани общо 10 000 t цимент. Такъв е случаят и посочената по-напред язовирна стена „Камароса” в Испания.

Ефективността на противифилтрационната завеса е свързана в голяма степен с работата на изградения зад нея дренаж. Дренажните сондажи се разполагат в един ред през 2-5 m от към долния край на завесата, колкото се може по-близо до нея, но не на по-малко от 4 m. Много често инжекционните и дренажните сондажи се правят в основата на стената от една и съща галерия, но по-добре е ако дренажните сондажи се правят от специална галерия, даваща възможност водата да се извежда под стената.

Противифилтрационните завеси, особено когато са придружени с дренажи, рязко понижават противоналягането в основата (фиг. 16.1). Това се потвърждава с измерване на противоналягането с пиезометри на голям брой язовирни стени. Средната стойност на противоналягането под цялата стена се понижава в границите на 0,02 до 0,25 Н, като при стените под 25 m достига до 0.

Понижаването на противоналягането може да доведе до намаляване обема на бетона в гравитачните язовирни стени с 9-14% при стойност на циментационните завеси и дренажи само 2-3% от стойността на съоръжението. У нас, най-голямо количество дренажни сондажи зад противифилтрационна завеса са изпълнени на язовир “Кърджали”.

3. Циментационни завеси в язовирното строителство у нас

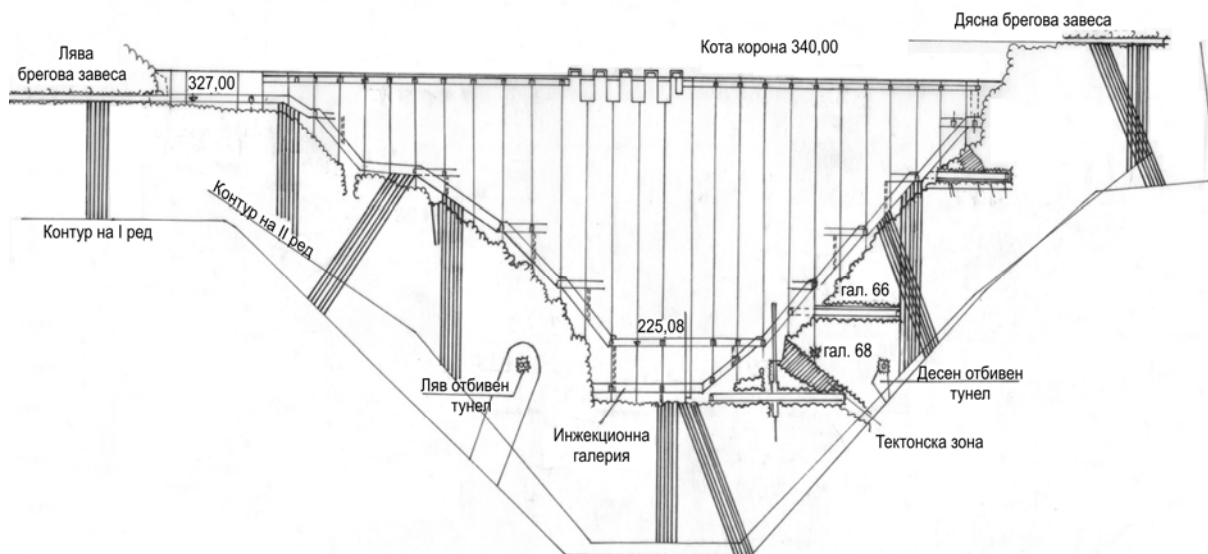
Както посочихме по-напред, нашата страна разполага със значителен опит в циментацията, която е използвана при изграждане на повече от 40 големи язовирни стени. Тук се дават за пример само циментационните работи на язовирите “Антонивановци” и “Кърджали”:

Язовир “Антонивановци” от каскадата “Доспат-Въча”. Тук е най-високата язовирна стена у нас – 145 m. Фундирана е върху биотитови и амфиболитови гнайси с прослойки от аналогични шисти и мрамори. Скалният масив в левия скат и централната част на долината е с добри физикомеханични свойства, докато в десния скат е сериозно засегнат от тектонски нарушения. Ширината на някои от тектонските зони достига до 2 m. По време на фундирането слабият запълнител в тях е бил иззет с помощта на галерии до дълбочина 15-30 m и заместен с бетон. След изследване на филтрационните свойства и инжектируемостта на скалите посредством водонагнетяване и изграждане на 3 опитни циментационни участъка са изпълнени следните противифилтрационни мероприятия: (фиг. 16.3.)

- двуредна противифилтрационна завеса с дълбочина до 71 m с разстояние между редовете 1,4 m и между сондажите в тях – 2 m. Задният ред е вертикален, а предният – с наклон на сондажите към скатовете. Завесата е построена от галерия, която по десния скат е на няколко етажа;
- лява и дясна брегови завеси с дължина съответно 75 и 130 m. Те са двуредни и са изградени от галерии прокопани по посока на оста на стената. При дясната сондажите са на 4 m един от друг и имат максимална дълбочина 85 m;
- площна циментация под язовирната стена;
- запълване с бетон на тектонските зони;

Поглъщането на цимент по левия скат не е голямо - $< 50 \text{ kg/m}$. По десния скат то е $200\text{-}300 \text{ kg/m}$, но в отделни интервали на сондажите е достигало $12\ 000 \text{ kg/m}$, което е едно много голямо количество. Изобщо изграждането на завесата по десния скат е било съпроводено със затруднения, произтичащи от множеството тектонски зони, загуба на промивна вода, избиване на тампони и отбелязаното по-горе поглъщане на циментова суспензия. Под 4 блока на стената на десния скат инжектирането е правено с ветрилообразно разположени сондажи с дълбочина до 30 m с цел да се пресекат по-сигурно тектонските зони. Зад инжекционната завеса е изграден дренаж, чийто сондажи са прокарани от дренажни галерии и през по-широки фуги на стената.

С всички тези мероприятия е постигната голяма водоплътност на основата, съществено намаляване на противоналягането, с което е обезпечена безаварийната експлоатация на това отговорно съоръжение.



Фиг. 16.3. Инжекционните работи на язовир “Антонивановци”

Язовир “Кърджали”

Язовирната стена “Кърджали” е дъговогравитачна, с обем на бетона около 370 000 m³. При нейното строителство възникнаха затруднения, свързани с устойчивостта на основата. В решаването на този проблем взеха участие видни учени и специалисти от чужбина, като за осъществяването му беше осъществен проект, включващ голям обем циментационни работи (фиг. 16.4).

Стената, разделена на 22 блока през 15 m, е фундирана във висококристалинни биотитови и биотит-амфиболови гнайси и в биотит-хлорит-амфиболитови талкошисти. Гнайсите заемат ниските, а талкошистите – високите части на долината на р. Арда. Под основата на блокове № 14 и 15 след построяването на стената бяха установени лещи от талк-хлоритови шисти, които предизвикаха опасение за нейната устойчивост.

По левия склон скалният масив е пресечен от тектонски нарушения. Установена е интензивна напуканост при наличие на глинест запълнител в пукнатините. До дълбочина 20-30 m пукнатините в кристалинните шисти са отворени, което е причина за високата водопропускливост на основата. В централната част на долината и по дясното крило масивът е по-слабо тектонски обработен и с по-добра водоплътност.

Циментационните работи, изпълнени преди и след строителството на стената, се изразяват в следното:

- Противофилтрационна двуредна завеса в обсега на язовирната стена от левия опорен блок до блок № 22. Разстоянието между редовете е 0,9 m, а между сондажите – 2 m. Дълбочината на вертикалния ред откъм водната страна е 42-45 m. На всеки 8 сондажа един достига до дълбочина 55-60 m.

- Двуредна завеса под преливника с разстояние между редовете 1 m и между сондажите – 2 m. Заедно с допълнителната завеса, изпълнена от отбивния тунел, дълбочината и достига 86 m.

- Дясна брегова завеса с дължина около 150 m. Тя е едноредна с разстояние между сондажите от 2 до 5 m.

- Лява брегова завеса с дължина около 100 m и дълбочина до 80 m, която след дълбокото площно заздравяване на левия опорен блок е изпълнена с ветрилообразно разположени сондажи (фиг. 16.4).

- Завеса в участъка на талкошистовото тяло. От галерията, която огражда талковото тяло, е извършена циментация с цел да се предотврати евентуалната филтрация по границата на талка и гнайсошистите.

- Площна циментация – изпълнена, като на всеки 16 m² от основата е инжектиран по един сондаж . Нейната дълбочина за блоковете от централната част на стената достига до 10-15 m, а за блоковете по двата ската и повече.

- Дълбока заздравителна циментация по левия бряг в участъка, обхващащ блок № 4 и левия опорен блок. За осъществяването и са използвани левият отбивен тунел и специално направена галерия. Максималната дълбочина на заздравяването е 80 m.

- Заздравителна циментация в десния бряг.

- Инжектиране на стоманобетонното тяло и на фугите между блоковете.

Общо са пробити 175 402 m сондажи и са инжектирани 6508 t цимент, от които 2440 t са употребени за площна циментация. Средното поглъщане на инжекционната завеса е 55 kg/m. В обхвата на стената то е 22 kg/m, а в лявата и в дясната брегова завеса е сравнително по-голямо – съответно 116 и 178 kg/m.

Значително е поглъщането и в железобетонното тяло – 147 kg/m.

На язовир “Кърджали” е изградена най-голямата по обем система от дренажни и пиезометрични сондажи – общо около 26 000 m. Получените резултати доказват по безспорен начин целесъобразността от нейното изграждане от гледна точка на безаварийната експлоатация на язовирната стена.

4. Инжекционно заздравяване при хидротехнически тунели

Циментацията на напукани скали при хидротехническите тунели дава възможност да се образува плътен контакт между облицовката и скалата, да се заздравя скалата, разположена непосредствено зад светлото сечение на тунела, да се понижи водопропускливостта и да се повиши устойчивостта на свода, да се създаде в скалата и облицовката предварително високо натисково усилие и др.

Известно е, че около всеки тунел в скалата се оформя нарушена зона, чиято дебелина се изменя от 0,8 до 2,5 m. Циментационните сондажи трябва да имат дължина превишаваща 1,5-2 пъти дебелината на тази зона.

В тунелното строителство се различава запълнителна и заздравителна циментация. Първата се извършва с цел да се запълни празното пространство между облицовката и скалата и се създаде плътен контакт между тях. Тя има задачи освен това да уплътни и големите празнини в скалата, разположени до 30-40 cm от стените на тунела. Сондажите на запълнителната циментация се разполагат шахматно и предимно в сводовата част на тунела. Използват се малки налягания и гъсти инжекционни разтвори, съдържащи пясък до 300% от теглото на цимента. Освен пясък се използва смлян гранулиран шлак, пепел от ТЕЦ, глина и др. При първата поредност сондажи се нагнетяват по-гъсти разтвори, а при втората – по-редки и с по-голямо налягане.

Заздравителната циментация се използва за повишаване на якостно-деформационните свойства и водоплътността на скалата, както и за предварително налягане на зоната около тунела чрез прилагане на по-високо инжекционно налягане. По този начин се създават условия за намаляване на дебелината на бетоновата облицовка и се гарантира нейната успешна експлоатация.

Дълбочината на инжекционните сондажи е 0,6-0,8 от вътрешния диаметър на тунела, като същевременно е по-голяма от разуплътнената зона.

Водо-циментното отношение на суспензията достига до 8,0 при финонапуканите скали и се изменя 0,6 до 2,0 при скалите с големи пукнатини. При малко поглъщане на суспензия се използва допълнително смлян цимент и пластификатори.

При напорни тунели крайното инжекционно налягане е 1,7-2,5 пъти от вътрешния хидростатичен напор. При тунели, прокопани на голяма дълбочина налягането достига до значителни стойности с цел предварително налягане на скалата и на бетоновата облицовка.

Заздравителната циментация се провежда на два етапа. При първия се използват сондажи с дължина 1,0-1,5 m и относително малки налягания, а през втори етап - сондажи с дължина 0,7 от диаметъра на тунела и по-големи налягания.

Ефектът от циментацията се контролира чрез водонагнетяване, изпитване на проби, изрязани от сондажни ядки и опитни натоварвания на място. Най-добър резултат се постига при съчетаване на циментацията със сондажни дренажи, които се прокарават в заздравената зона.