

ГЕОТЕХНИЧЕСКО ЗАЗДРАВЯВАНЕ НА ЗЕМНАТА ОСНОВА НА МЕТРОСТАНЦИЯ 9 НА ТРЕТАТА МЕТРОЛИНИЯ В ГРАД СОФИЯ ПО МЕТОДА „СТРУЙНА ЦИМЕНТАЦИЯ”

Йонко Димитров¹, Дария Михалева²

GEOTECHNICAL SOIL STABILIZATION OF METRO STATION 9 OF THE THIRD METRO LINE IN SOFIA BY “JET GROUTING” METHOD

Yonko Dimitrov¹, Dariya Mihaleva²

Abstract:

Metro station MS 9 - III is situated under Patriarch Evtimiy boulevard near the junction with the Graf Ignatiev street and the end of the station is in the Khan Krum street. After the geological exploration, it was ascertain the existence of single layers of sands, which are threatened of pulping /flowing/ by passing through underground water. The sands have high corners of internal friction, significant cohesion and highly water conducting. This severely threatens the safety of the bottom of the excavations and surrounding buildings. To prevent the passage of groundwater under the slit walls, it is advisable to create a watertight screen beneath the base plate of the metro station that crosses the water filtration. This report presents the technological implementation of the bottom plate by the “Jet Grouting” method.

Keywords:

Flowing, Watertight, Technological Implementation, Jet Grouting.

1. ОБЩИ ДАННИ ЗА МЕТРОСТАНЦИЯ 9

1.1. Местоположение

Метростанция МС 9 – III е ситуирана под бул. "Патриарх Евтимий" в близост до кръстовището с ул. "Граф Игнатиев", а края на станцията е при ул. "Хан Крум". Начало станция на км.7+262.29 край на км.7+392.29. Дължината на станцията е 130 m. Част от станцията е в хоризонтална и вертикална крива, като почти не се засяга частта на перона. Среда перон е на км.7+340.99, дължината му е 100 m. Станцията е изнесена леко в южна посока спрямо оста на булеварда. Основните подходи-входове към станцията обслужват кръстовището с ул. "Граф Игнатиев" и бул. "Васил Левски".

¹ Йонко Димитров, инж., докторант, катедра „Строителство на сгради и съоръжения”, Архитектурен факултет, Варненски свободен университет „Черноризец Храбър”, гр. Варна, *e-mail*: ionko.dimitrov@abv.bg;

Yonko Dimitrov, Eng., PhD Student, Department of Construction of Buildings and Facilities, Faculty of Architecture, Varna Free University "Chernorizets Hrabar", Varna, Bulgaria; *e-mail*: ionko.dimitrov@abv.bg.

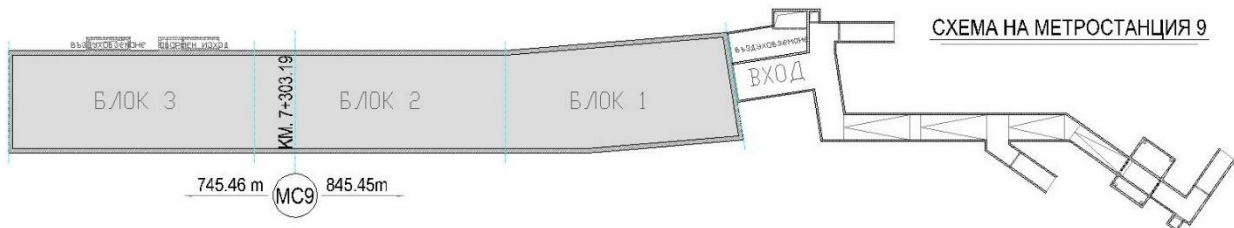
² Дария Михалева, доц. д-р инж., катедра „Строителство на сгради и съоръжения“, Архитектурен факултет, Варненски свободен университет „Черноризец Храбър“, гр. Варна, *e-mail*: dariyamihaleva@gmail.com;

Dariya Mihaleva, Assoc. Prof. PhD, Eng., Department of Construction of Buildings and Facilities, Faculty of Architecture, Varna Free University "Chernorizets Hrabar", Varna, Bulgaria; *e-mail*: dariyamihaleva@gmail.com.

Станцията е подземна и се изпълнява от горе надолу по "Милански метод". Във височина има четири нива:

- технически етаж;
- вестибюлно ниво – връзка с входовете и ниво за технически помещения и ТПС;
- перонно ниво;
- подперон.

Разделена е на три блока с дилатационни фуги в плочите и вътрешната конструкция. От началото към края на станцията съответно Блокове 1, 2 и 3. Дължините на блоковете са от порядъка на 44-45 m.



Фигура 1. Схема на Метростанция 9

В план станцията е със светла ширина между шлицовите стени 16,8 m, като в Блок 1 поради хоризонталната крива има преходна зона и разширяване на светлия отвор между шлицовите стени до 18 m.

Станцията представлява монолитна стоманобетонна конструкция тип "кутия", състояща се от външна и вътрешна конструкция. Обхватът на външната-основна конструкция под защитата, на която се изпълнява вътрешната е:

- Шлицови стени с дебелина 80 cm, разделени на отделни типове. Кампадите са правоъгълни по ~2,5 m;
- Трапецовидна покривна плоча;
- Първа "милански тип" плоча – дъно на технологичния етаж;
- Втора "милански тип" плоча – ниво вестибюл;
- Дълбочина на горния край на укрепителните стени, мерено от нивото на терена – 3,85 – 3,20 m;
- Дължини на шлицовите стени – 25 m;
- Дълбочина на долния край на шлицовите стени, мерено от нивото на терена при дълбочина на горния край на стените под повърхността на терена 3,5 m е 28,50 m.

Вътрешната конструкция обхваща:

- Дънна плоча – обратен трапец;
- Стени до шлицовите по отделните нива;
- Подперонни стени и перонна плоча, оформящи вътрешни колектори;
- Конструкция, осигуряваща вертикалната комуникация с входовете – стълби, ескалатори, асансьори.

Засипката върху станцията в средната зона е от ~1,1 m до 0,4 m. Станцията е съобразена така, че при изпълнено дъно и плоча на вестибюлно ниво да е възможно преминаване на щита за тунелното сечение /ТБМ/.

1.2. Инженерно-геоложки и хидрогеоложки условия

Инженерно геоложките и хидрогеоложки условия на площадката са проучени с два сондажа (МС-16А и МС-16Б) по 35 m и описание на почвите на място.

Проучвателен сондаж МС-16Б с дълбочина 35 m е ситуиран в зоната на строителната площадка по посока МС 10 - III. Почвите са проучени чрез визуални описания, лабораторни и SPT изпитвания. Установеното водно ниво е на 7 m под котата на терена.

Вторият проучвателен сондаж МС-16А също е с дълбочина 35 m и е изпълнен в другия край на станцията, който е извън зоната на строителната площадка. Почвите са проучени чрез визуални описания, лабораторни и SPT изпитвания. Установеното водно ниво е на 5 m под котата на терена.

1.3. Почвени разновидности

Непосредствено под долната част на шлицовите стени залягат пласт 5.1 и пласт 5.2. Съгласно описанията в инженерно-геоложкия доклад, пласт 5.1 е глина, тъмносива, прахова, плиоценска. Глината основно изгражда тъмносивия неогенски комплекс с дълбочина 29-30 m от терена надолу. Тя се проследява от единични прослойки от пясъците. Визуално глината се описва основно като прахова, на места до прахово-песъчлива, средно до твърдопластична, сива, неравномерно прехождаща във фин прахов пясък. Съгласно резултатите от лабораторните изследвания почвата се класифицира в границите от прах (Si) до песъчлив глинест прах (saclSi). В пласта не са провеждани пенетрации тип SPT, но по данни от съседни пластовете, броя на SPT са над 50. От направените дефиниции следва, че пластът има висока якост, но поради високото съдържание на прах е неустойчив при филтрация на води през него.

Пласт 5.2 в геоложкия доклад е пясъци, дребни до средни, прахови до слабо заглинени, плиоценски. Пясъците се установяват като единични пластовете и прослойки в тъмносивия неогенски комплекс с дебелини от 0,0 m до 1,0 m. Те са дребни до средни, заглинени и сиви. Отнасянето им към отделните пластовете е направено на базата на визуална оценка. Поради ограниченото им разпространение, те са разгледани като една разновидност. Съгласно резултатите от лабораторните изследвания, почвата се класифицира основно като прахов дребен и среден пясък (siFSa и siMSa). Както се вижда, и тези почви са прахови и застрашени от пулпиране /протичане/ при преминаване на подземни води през тях. Освен това, пясъците са и силно водопроводими.

За опасностите вследствие преминаване на води под основите на шлицовите стени има направени допълнителни хидрогеоложки проучвания и две експертизи. Доказва се, че вследствие на водопонижението, сляганята ще имат ограничен характер. По-голяма опасност съществува от протичането на води през пластовете 5.1 и 5.2, които в естественото си състояние и при определена технология на изкопите и отводняването, могат да осигурят хидродинамичната устойчивост на дъното на изкопите. Съществува обаче опасност от протичане на пясъците, които могат да причинят неприятни последици за сигурността на дъното на изкопите и на околните сгради.

С оглед предотвратяване на преминаването на подземни води под шлицовите стени с посочените по-горе последици, се препоръчва създаване на водопълтен екран под основната плоча на метростанцията, която да пресече филтрацията на водата. Технологично, това може да се изпълни по някои от методите CFA или Jet Grouting.

Характерни особености на пясъците под шлицовите стени са, че те са структурирани, имат високи ъгли на вътрешно триене, а дори и значителна кохезия. Тази кохезия се дължи на съдържанието на прахови фракции – 8–12 %, които създават структурата на тези пясъци. Поначало, праховите фракции са нестабилни при протичане на води през тях. Тогава те губят своята свързваща функция и се наблюдава така нареченото „протичане“ (или „пулпиране“) на пясъците, при което те губят своята свързаност и имат поведението на тежка течност. В тези случаи, дори статиката на укрепителните конструкции да е издържана, поради протичането на пясъците може да се загуби съпротивителната

способност на пясъците с много негативни последици, както в самата станция, така и за околното пространство.

1.4. Суфозионен прорив на дъното на изкопа при директно водопонижение

Независимо от изследванията за опасност от протичане на пясъците, се прави и допълнително изследване за така нареченото съпротивление на почвата срещу суфозионен прорив. Това изследване е направено от проф. Божинов, като в заключение е описано, че дъното на изкопа ще бъде устойчиво. Взето е предвид и обстоятелството, че на практика нивото на подземните води извън изкопа ще бъде по – ниско поради сработването на водите под основите на стените. При наличието на водоплътна тапа от инжектирана почва, такова чувствително водопонижение извън строителния изкоп не би трябвало да се очаква.

2. ПРОТИВОФИЛТРАЦИОННА КОНСТРУКЦИЯ ПОД ДЪНОТО НА ИЗКОПА

Дълбочината на дъното на изкопите до шлицовите стени е приета 20 m. По данни от геоложкия доклад, котите на терена при устието на сондажите са 546,66 и 545,63 – средно 546,14. От допълнителни данни за нивото на дъното на изкопите се определя средна кота на дъното на изкопите 528. Това прави дълбочина на изкопите 18,14 m. На страната на сигурността и поради различието на котите на терена и дъното на изкопите, се приема средна дълбочина на изкопите 18,50 m. Тази кота се различава от първоначално определената, поради приемането на закръглена стойност на котите на шлицовите стени под повърхността на терена.

При изкопаване на строителната яма до кота дъно – 18,50 – 6 = 12,50 m и обемно тегло на водата 1 t/m³, водният напор става 12,5 t/m². Този напор, резултиран за цялата ширина на метростанцията от 16,60 m, дава повдигаща сила от 12,5.16,60 = 207,75 t/m – кръгло 208 тона за линеен метър от дължината на станцията. Напорът ще се увеличи към средата на сечението на метростанцията, поради удълбочаването на изкопа.

При условие, че цялата повдигаща сила трябва да се уравни от циментирана почва с обемно тегло 2,2 t/m³, необходимата дебелина на инжектираната почва е $d = 12,5/2,2 = 5,68$ m, което не е икономически изгодно. Граничната стойност на сръзващата сила в контакта на инжектираната зона със шлицовите стени при получения напор е $208/2 = 104$ t на линеен метър от дължината на станцията. Това предполага значителни сили на зацепване между инжектираната почва и шлицовите стени, ако се разчита на задържащото действие на това зацепване срещу изплуване на инжектираната „тапа“ от циментопочва в дъното на метростанцията. Такова „зацепване“ не може да се осъществи, тъй като измерени сили на триене стар – нов бетон, не надвишават 35 – 40 t/m². Тук тези сили са значително по – ниски, поради наличието на бентонитова ципа до стените, която намалява триенето.

Допълнително условия за стабилитета на противифилтпационния екран е условието за поемане на съответните огъващи моменти в средата на сечението на станцията.

Някои очаквани благоприятни обстоятелства, които не могат да се предвидят с необходимата точност са пониженията на водите извън укрепителната стена, което е нормално, въпреки, че дънната плоча ще възпрепятства „сработването“ на нивата на подземните води от външната и от вътрешната страна на шлицовите стени. Опитът показва, че при нормални условия и свободна филтрация под основата на ограждащите стени, такива понижения са от порядъка на до 1/2,5 до 1/3 от дълбочината на изкопите, което при 12,5 m воден стълб прави водопонижение от 4 до 5 m. Поради липсата на водоплътна тапа в дъното на изкопа, може да се очаква такова водопонижение. Това обаче са предварителни предпоставки, които трябва да се докажат в процеса на изкопаване на

ямата. Водопониженията могат да се приемат само априори и то при наличието на пясъци под основите на стените, както е дадено в инженерногеоложкия доклад.

Предвид посочените обстоятелства и при наличието на водоплътна „тапа“ под дъното на изкопа не може да се предвиди с необходимата точност водопонижението и приемането на решение крие опасности от грешки.

2.1. Струйна циментация под дъното на изкопа

От достигната дълбочина 14 m под терена вътре в станцията се правят сондажи за изпълнение на „струйната циментация“, като инжектираните дълбочини – котите на горен и долен край на заздравените участъци са дадени на фигура 2.

Дебелините на заздравените участъци се изменят от 1,5 до 2,5 m, като по-големите дебелини са в контактните области до шлицовите стени и в средата. Удебеляването покрай стените е за да се създаде по-голяма сила на сцепление между инжектираната почва и шлицовите стени. С удебеляването в средата се цели увеличаване на собственото тегло на инжектираната почва и поемане на огъващите моменти в плочата от воден подем. При приемане на сцепление между инжектираната почва и шлицовите стени $\delta = 15$ t, то при дълбочина на контактната зона от 2 m, силата на приплъзване на инжектираната „тапа“ ще бъде 30 t/m. За цялата ширина на „тапата“ от 16,5 m, общата сила, която може да се приспадне от целия напор е $30/16,5 = 1,82$ t на линеен метър.

От получената стойност на напора след водопонижението – 7 t/m² се спада стойността $1,82$ t/m², след което остава остатъчен напор от $5,20$ t/m² и необходимата дебелина на инжектираната почва става $2,36$ m, приблизително $2,40$ m. Тази стойност е близка до средната дебелина на инжектираната почва. Напрежението от $1,82$ t/m² създава огъващ момент в дебелината на инжектираната почва. При етапи на откопаване с дължина 40 m и ширина на участъка между стените $16,60$ m, максималният огъващ момент в „тапата“, приета като ивица по късата страна, натоварена с равномерно разпределен товар от $1,82$ t/m², се приема с стойност $M_{\max} = 50-55$ tm/m.

При дебелина на плочата в средата $2,0$ m, съпротивителният момент е $0,66$ m³. При тези данни, опънните напрежения в инжектираната почва ще бъдат $55/0,66 = 83$ t/m² = $8,3$ kg/cm² или по същата формула, но за по – малката стойност на момента – 75 t/m² = $7,5$ kg/cm². При условие, че се приеме частично запъване на плочата, напреженията намаляват до $5 - 6$ kg/cm², което е в границите на опънната якост на инжектираната почва с натискава якост от $2 - 3$ МРа. Ако се вземе предвид обаче, че връзката между отделните инжекционни колони няма необходимата якост, съществува реална опасност от спукване на инжектирания екран поради значителните опънни напрежения, вследствие на огъващите моменти. Благоприятно обстоятелство е, че при огъването на дебелите плочи, особено ако могат да работят в стадии на пластичност, допустимите опънни напрежения се увеличават до два пъти. Трябва да се има предвид и опасността от повдигане на цялата „тапа“ от инжектираната почва вследствие на водния подем.

2.2. Осигуряване на инжектираната почва срещу воден напор

Възможни са два варианта за осигуряване на инжектираната почва от воден напор.

Първият вариант е поемане на част от напора с анкери – по $1 - 2$ анкера на линеен метър от дъното на изкопа през инжектираната почва.

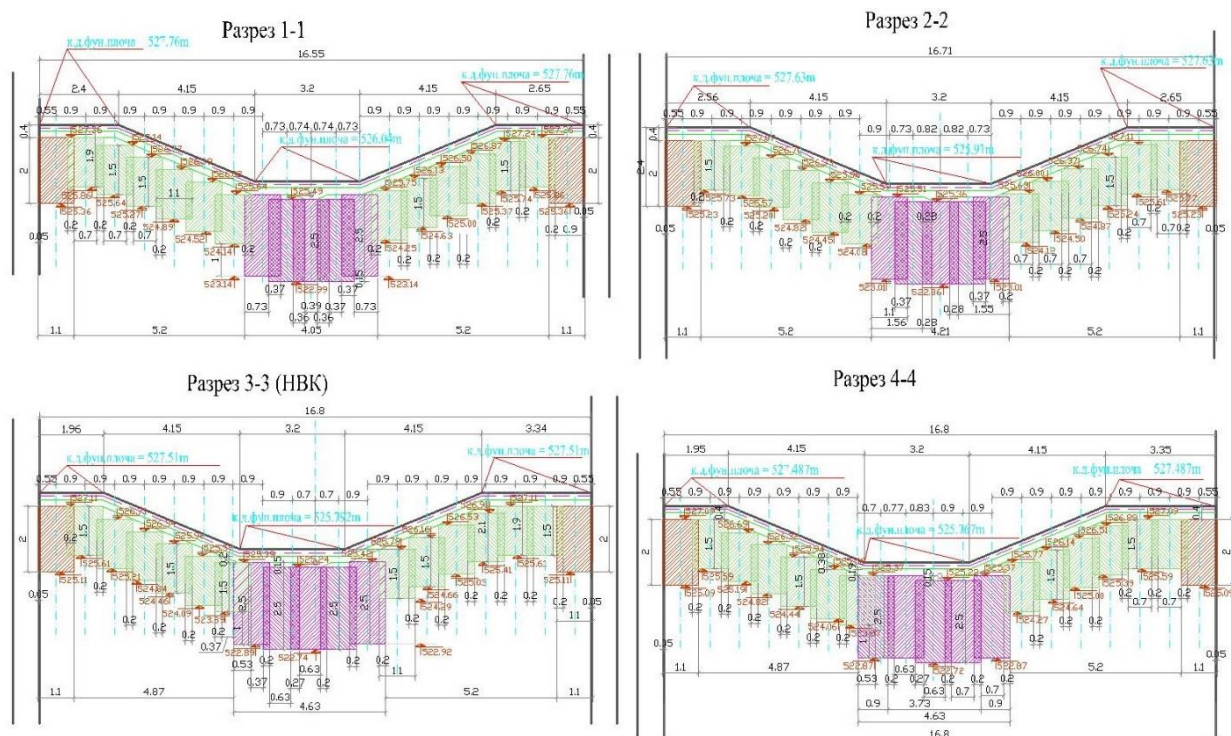
Вторият вариант е чрез пробиване на инжектираната почва, при което след изтичането на минимални водни количества водният напор спада до безопасна стойност. Тези водни количества няма да окажат съществено влияние на технологията на изкопите и не съществува опасност от воден прорив. Този вариант е по – подходящ, тъй като осигурява сигурна устойчивост на инжектираната почва и не създава статически и технологични проблеми при изпълнението.

Водопонижението може да се реализира чрез сондажни кладенци, разположени на известно разстояние – 8-10 m осово един от друг и ситуирани по надлъжната ос на метростанцията. По този начин водочерпенето се отдалечава от водопритока, който е под основите на шлицовите стени, като се удължава пътя на филтриращата вода и по този начин се намалява градиента и се елиминира опасността от воден прорив.

Дренажните сондажи се изпълняват с „дренажен филтър“ от баластра с дебелина над 10 cm. Опитно е доказано, че филтър от баластра с такава дебелина предотвратява изнасянето на прахови или пясъчни частици, с което се избягват условията за „протичане“ на пясъците. Дълбочината на сондажа трябва да има възможност за създаване на линия на депресия на водното ниво така, че да се избегне образуването на недопустим воден подем. Дренажните сондажи могат да се снабдят и с индикатор за налягане, който да отваря сондажните отвори и изтичащата вода от собствен напор да се изпомпва, или директно от сондажите, или от допълнителни шахтички, разположени по дъното на изкопа.

3. ТЕХНОЛОГИЯ НА ИЗПЪЛНЕНИЕТО

Изкопите за метростанцията се изпълняват до дълбочина 14 m под терена. До основата на фундаментната плоча на метростанцията остава неизкопана част с дебелина 8 m – в средата на станцията и 6 m – покрай стените. Това се прави, за да се противодейства със съществуващия геоложки товар на водния подем, който при основата на фундаментната плоча е $12,5 \text{ t/m}^2$, без да се отчита понижението на нивата на подземните води, вследствие на сработване на водните нива вън и вътре в изкопа, под основите на шлицовите стени. Наличието на претоварващ насип от неизкопана почва предотвратява или намалява евентуален „рефлукс“ – обратно изтичане на циментово мляко при инжектиране на почвата.



Фигура 2. Характерни разрезии с разположение на заздравителните колони

Инжектирането на почвата става от кота 1,5 m, 2 m и 2,5 m под долната повърхност на дъното на фундаментната плоча на метростанцията на дълбочини, които са предписани в проекта. До дъното на фундаментната плоча, сондажите са „глухи“ – неинжектирани.

Дължините на инжектираните сондажи се изменят от 1,5; 2,0 и 2,5 m. Заздравителните колони са през осово разстояние 0,90 m до 0,74 m, както е показано на фигура 2. Препоръчително е пилотите за заздравителните колони да се изпълняват през един, след което се изпълняват и междинните колони.

При системата с един флуид се използва двуканален лост $\phi 89$ за сондиране и инжектиране. Лостът отвежда водата и циментовия разтвор до монитор с коаксиална дюза (една или повече, в случая само една). Режещата глава на лоста е с диаметър $\phi 127$ mm.

След приключване на сондирането, сондажният лост се изтегля като се върти и в същото време се впръсква (инжектира) циментовия разтвор, което има за цел да разруши структурата на почвата и да запълни колоната със смес от местна почва и циментов разтвор.

Методът с един флуид включва използването на инжекционна помпа, с която да се подава циментовият разтвор към дюзата с налягане до 400 bar. Началото на нагнетяване е след като режещата глава на сондажния лост достигне на 0,4 m под дъното на инжекционната колона.

Работите по метода „струйната циментация“ за заздравяване на земната основа под дъното на шахтата се изпълняват на три етапа:

Етап 1: Опитен участък. В началната зона се изпълняват 3 броя опитни колони. Изпълнението на колоните започва със сулфатостойчив цимент марка СЕМ II/B-L42.5R. При изпълнение на 50% от колоните се използва ускорител за свързване на цимента по сертификата на доставчика. Целта е да се уточнят точните параметри на инжектиране, степента на насищане на почвите с цимент, диаметъра на колоните и якостно-деформационните показатели на заздравените почви. След получаване на оптимални резултати на заздравяване на земната основа, се извършват всички заздравителни работи, посочени в проекта.

Етап 2: Инжекционни работи. В проекта се предвижда изпълнение на 2926 бр. инжекционни колони с $D=1,15$ m – установен опитно, при среден разход на сух цимент около 400 kg/m. Тези колони се изпълняват след уточняване на технологичните параметри на инжектиране и определяне на якостно-деформационните характеристики на 3 бр. опитни колони.

Етап 3: Контролни работи. За определяне якостно-деформационните характеристики на обработените след струйната циментация почви – ъгъл на вътрешно триене, кохезия и якост на едноосов натиск, се прокарват проучвателни ядрови сондажи във всяка от трите опитни колони. Единият от сондажите е в периферията на всяка колона, а другият между центъра и периферията. По таблични и аналитични зависимости от нормите се определя модулът на обща деформация за всяка една проба. За конкретният случай очакваните стойности на модула е около 40 МПа и якост на едноосов натиск над 2,5 МПа.

От всеки проучвателен сондаж, респективно от всяка опитна колона, се вземат проби за лабораторен анализ. Тези проби се комбинират по височина с оглед да бъде постигнато подробно проучване по цялата височина на опитните колони.

След получаване и обработка на резултатите от изпитване на опитните колони, оптималното съчетание на технологичните параметри, с които да бъде изпълнено заздравяването под дъното на шахтата, се определя след удовлетворяване на два критерия – диаметърът на заздравената колона да бъде по-голям от 1,1 m и показателите на циментираната почва да покажат деформационен модул не по-нисък от 40 МПа и якост на натиск над 2,5 МПа. В случай, че параметрите не бъдат достигнати е възможно при изпълнението да бъде добавен въздух, т.е. струйната циментация да стане с два флуида.

Непосредствено след изпълнението на всяка колона, изпълнителят съставя работен доклад.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Със заздравяването на земната основа под дъното на метростанцията по метода „струйна циментация“ се постига както уплътняване и ограничаване на притока на вода, така и осигуряване на стабилността на забитата част под дъното на шлицовите стени.

Прилагането на метода „струйна циментация“ (Jet Grouting) при строителството на сгради и съоръжения в урбанизираните територии и извън тях дава много добри резултати за осигуряване на нестабилни земни основи, земни основи с високо ниво на подпочвени води или с реки в близост. Подвижността и възможността за изпълнение при всякакви условия, стандартизирането на процедурите и контрола на качество по време на изпълнение, правят метода иновативно, интересно, гъвкаво и лесно средство за изпълнение на специални геотехнически работи.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] <https://www.haywardbaker.com/solutions/techniques/jet-grouting>
- [2] <https://www.soletanche-bachy.com>
- [3] <https://theconstructor.org/geotechnical/jet-grouting-procedure-advantages/14470/>
- [4] <https://www.metropolitan.bg>
- [5] https://bulgaria-engineering.com/bg-tehnologiya_jet_grouting
- [6] Наредба № 55 от 29 януари 2004 г. за проектиране и строителство на железопътни линии, железопътни гари, железопътни прелези и други елементи.