

10. ЦИМЕНТОПОЧВЕНА ВЪЗГЛАВНИЦА

1. Уводни бележки

От гл. 9. се вижда, че циментопочвата има добри якостно-деформационни показатели и голяма водоплътност. Наред с това, тя е технико-икономически конкурентноспособна с другите приложими материали.

През шестдесетте години фундирането в лъос в Северна България започваше да създава все по-големи проблеми. Непрекъснатите аварии на изградените съоръжения поради пропадане на лъоса бяха причина за бързото въвеждане у нас (предимно от НИСИ и от ВИАС) на методи успешно прилагани в чужбина (уплътняване с тежка трамбовка, почвена възглавница, фундиране с къси пирамидални пилоти, силикатизация и др.) и подтик за разработване на нови методи за заздравяване на лъоса като основа на сгради и съоръжения.

Един от тези методи е фундирането в лъос с циментопочвена възглавница, разработен в Геологическия институт при БАН (авторско свидетелство 16 276 с приоритет от 17 март 1970 г. За кратко време (около 15 години) този метод беше приложен на голям брой обекти. През 1976 г. той беше регламентиран с “Указания за фундиране на сгради и съоръжения в пропадъчни (лъосови) почви посредством лъосоциментна възглавница”, публикувани в “Бюлетин за строителство и архитектура”, кн. 1-2, стр. 4-21.

2. Същност и приложимост на циментопочвената възглавница

Циментопочвената възглавница представлява уплътнен и заздравен слой от земната основа, разположен непосредствено под фундаментите, който е предназначен да замени част от пропадъчния пласт, да увеличи носещата способност на земната основа и да я предпази от намокряне. Циментопочвената възглавница не е продължение на фундамента, а част от земната основа. Тя се изгражда от местната почва, заздравена с 3-6% портландцимент. Обикновено се построява под цялата сграда.

Различават се възглавници от *корава* и *пластична* циментопочва. Коровата се уплътнява при w_{opt} до достигане на $\rho_{d,s}$. Пластичната циментопочва се изгражда при $w \approx w_L$ и се използва при стеснени строителни условия. Възглавниците биват плоски или с ребристи и конични удължения. Дебелината им зависи от размерите на фундамента, от неговото натоварване и от началния товар на пропадане на лъоса. Основният принцип при проектирането на възглавницата е нейната дебелина и модул на обща деформация да се подберат така, че напреженията предавани от фундамента на границата с естествения лъос да бъдат по-малки от началния товар на пропадане $p_{нач. пр.}$.

Циментопочвената възглавница може да се използва самостоятелно при лъосова основа от I тип. При основа от II тип е приложима в комбинация с други методи.

Възглавницата е прилагана в следните случаи:

- При изграждане на тежки съоръжения в льосова основа от I тип, когато предаваните от фундаментите напрежения са значителни, превишават началния товар на пропадане на льоса и това не може да се избегне посредством уплътняване с тежка трамбовка и почвена възглавница, например при основните съоръжения на АЕЦ “Козлодуй”.
- При льосова основа от I тип, когато допустимото слягане на конструкцията е малко, например при фундирането на въртящите се пещи на Циментовия завод в гр. Девня.
- При льосова основа от I тип, когато не може да се приложи уплътняване с тежка трамбовка поради стеснени строителни условия – при строителство на сгради в гр. Русе.
- При непропадъчна основа, за да се избегне фундиране с обща стоманобетонна плоча, например при сградата на ПРПС в гр. Русе.
- При основа от II тип с неголяма дебелина на пропадъчната зона, циментопочвена възглавница е използвана в съчетание със задълбочаване на строителния изкоп, уплътняване на дъното му с тежка трамбовка или изграждане от повърхността му на вертикални удължения на възглавницата или. Пример, сградата на ТИЦ в Русе, ТВ-кулата в Русе, жилищен блок “Сердика” в Русе.

3. Носеща способност на циментопочвената възглавница

С изграждането на циментопочвена възглавница земната основа се превръща в двуслойна основа с горен по-здрав слой. Разпределението на вертикалните нормални напрежения σ при такава основа зависи от отношението на деформационните модули на двата слоя - $\frac{E_1}{E_2}$, където E_1 е деформационния модул на горния слой, а E_2 – на долния. Доказано е, че при $\frac{E_1}{E_2} > 5$, горният слой преразпределя предаваните му от фундамента напрежения на по-голяма площ на границата му с долния слой.

При почвената възглавница $\frac{E_1}{E_2}$ се изменя от 2:1 до 2,5:1, при пясъчната то е около 3:1 до 3,5:1, а при циментопочвената възглавница $\frac{E_1}{E_2} = 10 \div 15$. Поради това циментопочвената възглавница преразпределя в по-голяма степен напреженията в сравнение с останалите възглавници.

Това ще бъде илюстрирано с кръгъл фундамент с радиус r и дебелина на горния слой $h=r$. Ако не съществуваше ЦПВ, то на дълбочина $z=r$ предаваното напрежение от фундамента е $\sigma_h = 65\%$ от напрежението σ

под неговата основна плоскост. При почвена възглавница при $\frac{E_1}{E_2}=2$, $\sigma_h=55\%$ от σ ; докато при циментопочвената при $\frac{E_1}{E_2}=10$ - $\sigma_h=25\div 28\%$ от σ .

Увеличаването на натоварването на циментопочвената възглавница посредством нарастване на отношението $\frac{E_1}{E_2}$ има граница, защото след

$\frac{E_1}{E_2} > 15$ при голямо натоварване възникват значителни опънни напрежения в основата на горния слой, които той не може да понесе без да се напука.

За доказване на якостно-деформационните свойства и носещата способност на циментопочвената възглавница във връзка с нейното приложение на големи обекти, включително АЕЦ "Козлодуй", са извършени лабораторни и теренни изпитвания, описани в редица научни трудове (Minkov et al. 1981; Stefanoff et al. 1983; Карачоров, 1989; Евстатиев, 1986, Евстатиев и Ангелова, ред. 1993 и др.) .

Най-напред са проведени изпитвания с лабораторна вана с площ 50x50 cm и дълбочина 40 cm. След това те продължени в опитни канали, изкопани в лъс, по дъното на които е изграждан циментопочвен слой с дебелина 10 cm. Натоварванията са правени с щампи с различен диаметър.

Проведени са изпитвания и с големи щампи (с площ до 24 m² с послойно измерване на напреженията и деформациите (фиг. 10.1.). При натоварване на възглавницата с 2,1 МРа в разглеждания случай средното слягане на щампата е около 10 mm (фиг. 10.2.). При естествения лъс (без възглавница) при същото натоварване слягането е десетократно по-голямо.

От лабораторните и теренни изпитвания са направени следните изводи:

1. Циментопочвената възглавница увеличава значително носещата способност на лъсовата основа при отношение на дебелината на

възглавницата h и диаметъра на фундамента d $\frac{h}{d} > 0,2$ и на модулите на

възглавницата E_1 и на земната основа E_2 $\frac{E_1}{E_2} > 5$;

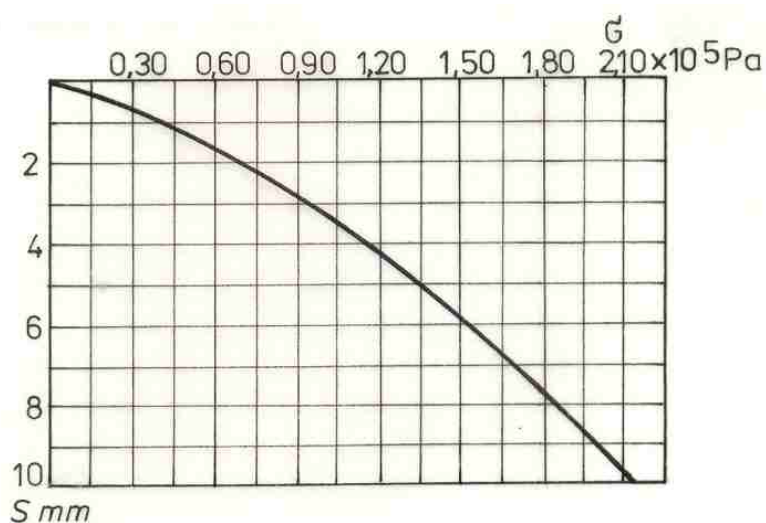
2. Относително най-голямо нарастване на носещата способност на възглавницата има в интервала $\frac{h}{d} = 0,5\div 1$;

3. Съществува добра сходимост между измерената гранична носеща способност на възглавницата и изчислената по публикуваните методи за двуслойна основа (Карачоров, 1989).

4. Наличието на циментопочвена възглавница значително разширява границата на еластичното поведение на основата.



Фиг. 10.1. Изпитване на циментопочвена възглавница с щамп с площ 24 m^2 . Възглавницата е с дебелина $1,5 \text{ m}$, с $E_o=95,0 \text{ MPa}$, а на льоса под нея $E_o=20,0 \text{ MPa}$



Фиг. 10.2. Зависимост “деформация – напрежение” при натоварване със щамп с площ 24 m^2

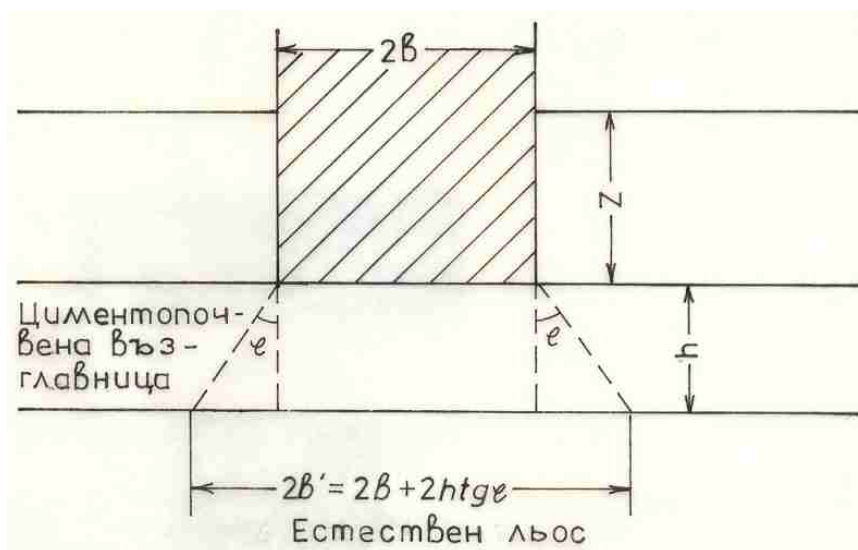
4. Проектиране на циментопочвена възглавница

Проектирането на циментопочвена възглавница се извършва по цитираните по-горе указания, в които са регламентирани:

1. Съдържанието на инженерногеоложките проучвания – най-важното е да се определи типа на основата и дебелината на пропадъчната зона;

2. *Изискванията към материалите.* Практически всички лъсови почви могат да се използват за циментопочвена възглавница. Необходимото количество на цимента и якостно-деформационните показатели на циментопочвата се определят с лабораторно изпитване.

3. *Изчисляването на дебелината на циментопочвената възглавница* – в указанията е възприет метода на фиктивния фундамент (с ъгъл на разпределение на напреженията 38 и 40° , фиг. 10.3.). Използвани са още таблиците на Bescond et all. (1974), метода на Егоров за ивични фундаменти, метода на крайните елементи, приспособеният метод на Бурмистър и др. (Карачоров, 1989).



Фиг. 10.3. Принципна схема за изчисляване на циментопочвена възглавница по метода на условия фундамент.

4. *Технологията за изграждане на възглавницата.* Циментопочвената смес се приготвя стационарно или на място с роторна фреза. Тя може да бъде корава и пластична. Основните изисквания към технологичните операции се свеждат до спазване на проектните пропорции, до доброто хомогенизиране на сместа и до нейното уплътняване до проектната плътност.

Уплътняването трябва да завърши до 5 часа след поставянето на цимента в почвата. Производителността на труда зависи от площта на изкопа и от възможностите на използваната техника. На АЕЦ “Козлодуй” при голяма площ на изкопите производителността достигаше до 1000 m^3 за една календарна дата.

При изграждането на циментопочвената възглавница се контролира раздробяването на почвата и хомогенизирането на сместа, поставянето в почвата на проектното количество на цимента, постигането на стандартната плътност ρ_{ds} , оптималното водно съдържание w_{opt} и деформационния модул на възглавницата.

5. Приложение на циментопочвената възглавница

От края на шестдесетте години на ХХ век циментопочвена възглавница е използвана при повече от 100 сгради и съоръжения, включително почти

всички съоръжения на Атомната електроцентрала “Козлодуй”, трите най-високи ТВ-кули в Северна България: в Русе (180 m), Тутракан и Силистра, много промишлени и административни сгради с височина до 18 етажа, охладителни кули на ТЕЦ и др.

Приложение при основа от I тип - АЕЦ “Козлодуй”

АЕЦ “Козлодуй” със своите 6 енергоблока произвеждаше около 45 % от електроенергията у нас. При нейното проектиране беше отчетена земетръсността (сеизмичен интензитет VII степен по MSK) и наличието на пропадъчен льос.

При първите четири енергоблока пропадъчният льос имаше дебелина 10-12 m и представляваше основа от I тип. Под котата на фундиране, средно на около 4,5 m, сумарното пропадане при натоварване 0,3 МРа по лабораторни данни достига до 12 cm, а сумарното слягане от 12 до 31 cm при $E_o=17,0 - 23,5$ МРа.

За да се гарантира сигурността на съоръженията беше необходимо да се отстрани опасността от пропадане и неравномерно слягане на льосов пласт с дебелина от 2,5 до 5 m, разположен под фундаментите. Вместо първоначалното проектно решение – изземване на льоса и изграждане на баластрова възглавница, беше възприето решение, което включва задълбочаване на изкопа, уплътняване на дъното му с тежка трамбовка и изграждане на циментопочвена възглавница до котата на фундиране.

Поради повишеното водно съдържание на льоса уплътняването с тежка трамбовка не даде очаквания резултат. Този метод беше изоставен, като беше увеличена дебелината на възглавницата. При избора на циментопочвена възглавница беше взета под внимание нейната водоплътност, като съществена допълнителна бариера срещу разпространението на радионуклиди до подземните води. Това качество, естествено, баластровата възглавница не притежава.

В крайна сметка подготовката на льосовата основа беше извършена по следния начин:

- изкопаване и подравняване на дъното на изкопа до дълбочина около 6 m и запълване на пространството до кота – 5,0 – 5,5 m със допълнителен слой от циментопочва, приготвена чрез смесване на място с 2 % портландцимент;
- Изграждане по същия начин на същинската циментопочвена възглавница на слоеве по 15 cm (фиг. 10.4.). Количеството на цимента се изменя от долните към горните слоеве от 2 до 6%.

Праховият льос се омесваше добре с цимента с помощта на роторна селскостопанска фреза (фиг. 10.5.). Стандартната плътност се постигаше с пет-шест минавания по една и съща следа на пътния валяк (фиг. 10.6). Максималната производителност бе до 1000 m³/ден.

Дебелината на възглавницата се изменя от 1 до 3,5 m, като е най-голяма в реакторното отделение, - до 5 m, където възглавницата е част от радиационната защита.

При голяма площ възглавницата е изграждана на части, които се свързват помежду си чрез оформяне на краищата на стъпала (фиг. 10.7.).



Фиг. 10.4. Изграждане на циментопочвената възглавница под I енергоблок на АЕЦ “Козлодуй”. Вижда се багера, който прави изкопа и копае почвата за възглавницата, смесването на цимента и почвата с роторна фреза и готовите циментопочвени слоеве



Фиг. 10.5. Смесване на лъоса с портландцимент с роторна селскостопанска фреза. Разстилането на цимента е направено със специално конструиран цименторазстилвач



Фиг. 10.6. Изглед от близо на уплътнената циментопочвена смес. След 24 часа тя се втвърдява, не се размеква от валежите и по нея могат да се движат моторни средства, което улеснява фундаментностроителните работи и помага да се поддържа тяхното качество през дъждовните периоди от годината



Фиг. 10.7. Изглед на циментопочвената възглавница от II енергоблок.

Стъпаловидно оформеният край на изградената част от възглавница осигурява добра връзка със следващата част. В дясно се вижда водопонизителната система, която поддържа изкопа сух при строителството на възглавницата.

Тридесет дни след изграждане на възглавницата при средно $\rho_d=1,74 \text{ g/cm}^3$ якостта на едноосен натиск бе $R_c=0,5 - 0,6 \text{ MPa}$, а модулът на обща деформация E_1 , се изменяше от долните слоеве към горните от 65,0 до 110,0 MPa. От дългогодишните геодезически наблюдения на съоръженията на първите 4 енергоблока са измерени средни стойности на сляганията до 5,0 – 6,0 cm.

Сериозен тест за устойчивостта на съоръженията на АЕЦ “Козлодуй” беше Вранчанското земетресение от 1977 г., при което щети понесоха само няколко административни сгради, които са фундаментирани направо в льоса без циментопочвена възглавница. Този факт, както и съпоставката на земетръсното поведение на голям брой сгради в Северна България доведоха до заключението, че циментопочвената възглавница е помогнала на конструкциите, включително и на тези в АЕЦ “Козлодуй” да понесат по-леко земетресението (Минков и др. 1979).

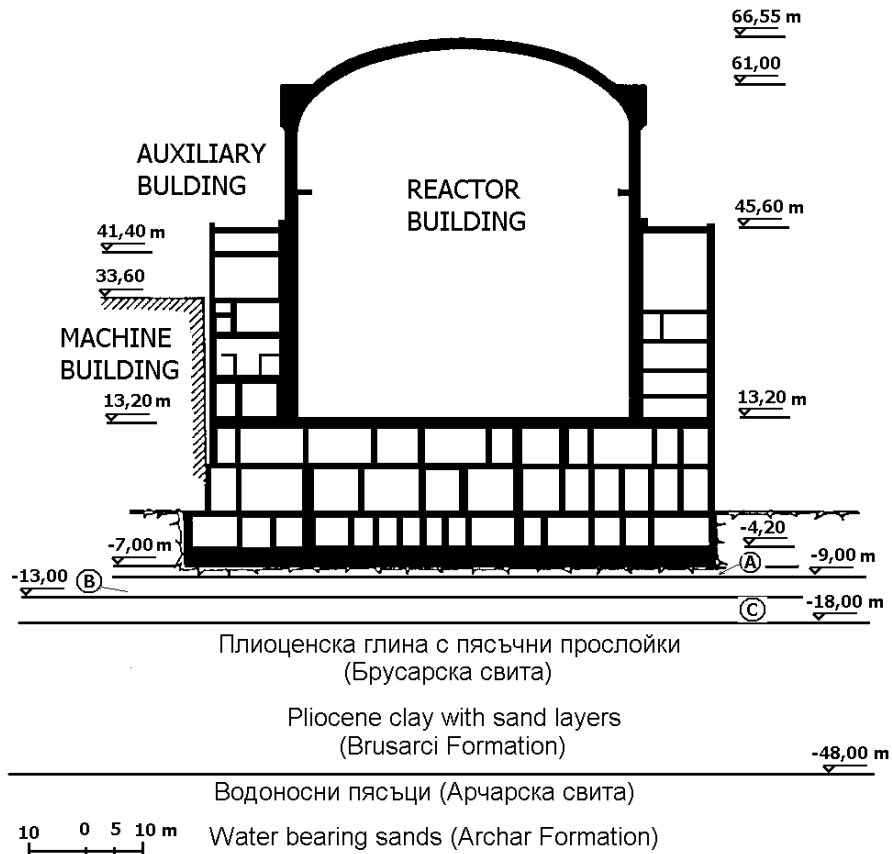
Циментопочвената възглавница доказва своите изолационни качества срещу разпространението на радионуклиди в земната основа при случайно изтичане на течни радиоактивни вещества в един от временните складове за тяхното съхраняване. Част от радионуклидите бяха проникнали през фугите на бетоновата настилка, но се бяха задържали върху повърхността на възглавницата. Последната допринесе за опазване от замърсяване на сравнително плитко разположените подземни води – непрекъснатият мониторинг не откри в нито един от пиезометричните кладенци следи от повишена радиация.

Описаните качества на циментопочвената възглавница бяха причина тя да се използва и при V и VI енергоблокове, в комбинация с баластрова възглавница (фиг. 10.8.).

Циментопочвена възглавница с вертикални удължения

Този начин на фундаране е използван при 18 етажната сграда на Териториалния изчислителен център (ТИЦ) в гр. Русе (фиг. 10.9). Долният край на общата фундаментна плоча с натоварване 0,36 MPa е на 4,8 m от повърхността. Под нея до 8,0 m заляга льос със сумарно пропадане при $p=0,3 \text{ MPa}$ - $s_{np}=10 - 12 \text{ cm}$. По надолу следва непропадъчен и слабослегваем пласт, под който на кота -10,0 m заляга льосовидна глина.

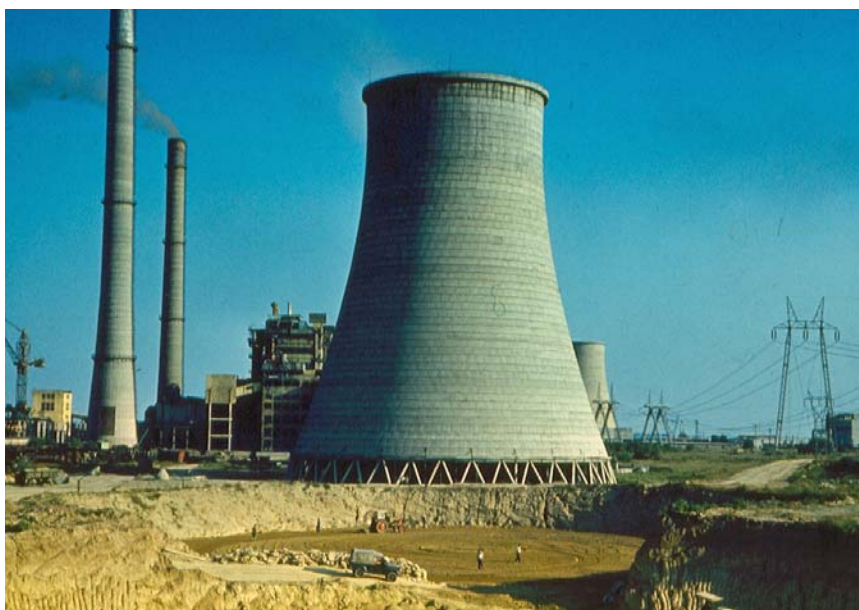
Бе установено, че ако се ликвидира пропадъчността до дълбочина 8 m слягането ще е в границите на допустимото. За да се постигне това бе използвана циментопочвена възглавница с вертикални удължения. За целта изкопът беше задълбочен до - 7,0 m и от дъното му бяха изградени призматични ребристи удължения, преминаващи в циментопочвената възглавница (фиг. 10.10.). Възглавницата и ребристите удължения са направени от смес от пясък с 10%, пепел от ТЕЦ, 3% портландцимент и 20% варно мляко, приготвени в бетонов възел и уплътнени в ребрата с електрическа трамбовка, а при възглавницата с пътен валеж.



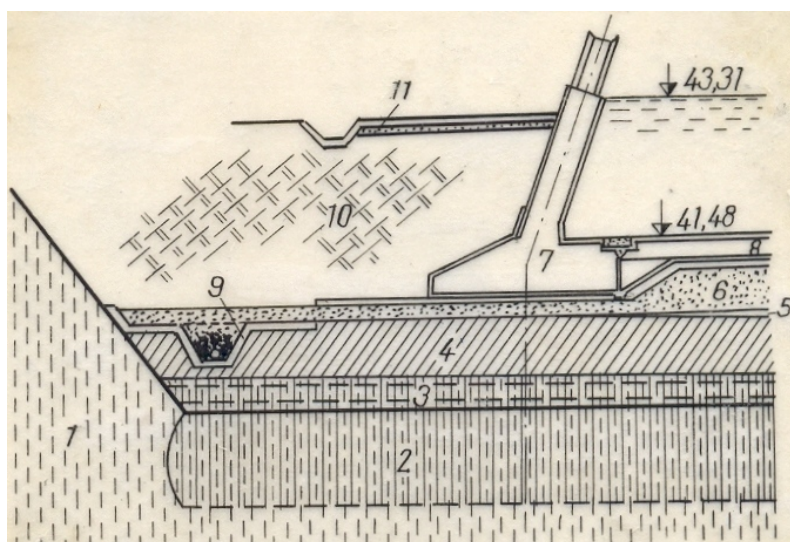
Фиг. 10.8. Разрез през реакторното отделение на V блок и земната му основа: А-циментолъсова възглавница; В-баластрова възглавница; С-алувиален пясък, чакъл и глина.



Фиг. 10.9. Сградата на териториалния изчислителен център в гр. Русе. В дъното се вижда телевизионната кула, разположена на лъсовото плато



Фиг. 10.11. Изглед на охладителна кула на ТЕЦ “Русе”. На преден план се вижда изкопа на следващата кула, в дъното на който се изгражда циментопочвена възглавница.



Фиг. 10.12. Разрез през фундамента и земната основа на охладителните кули на ТЕЦ “Русе”.

1-естествен льос; 2- льос, уплътнен с тежка трамбовка; 3 – почвена възглавница, 4 – циментопочвена възглавница; 5 – конична част на циментопочвената възглавница, 6 – пясъчен дренаж; 7 – фундамент; 8 – бетонна плоча; 9 – дренажна канавка; 10 – обратен насип; 11 – тротоар.

Начинът, по който бяха фундаирани охладителните кули беше приложен на няколко 12 етажни жилищни сгради в гр. Русе и при високите телевизионни кули в гр. Русе, Тутракан и Силистра.

Поради необходимостта кулите да бъдат построени на възможно най-високо място, всички те попадат в лъсова основа от II тип. Предварителният проект предвиждаше фундиране с изливни пилоти тип “Беното”, преминаващи през лъоса и достигащи на дълбочина 35 – 40 m до плътни глини. Поради големите разходи при този метод и трудностите при изпълнение на толкова дълги пилоти с голям диаметър беше решено противополопадъчната подготовка на основата да се осъществи чрез комбинация от циментопочвена възглавница и уплътняване с тежка трамбовка. По-нататък ще бъде разгледан само случая с TV кулата в гр. Русе, която е най-висока и геоложките условия при нея са най-трудни.

Кулата (висока 198 m) е построена в края на лъсовото плато южно от в гр. Русе, на абсолютна височина 150-153 m (фиг. 10.13.). Лъсовият комплекс е с дебелина около 30 m. След изкуствен насип следват пет лъсови хоризонта, разделени от четири погребани почви, които са добре изразени. Под тях следват тънки лъсови хоризонти и погребани почви, с обща дебелина около 7 m. Под лъоса залягат червени плътни глини и чакъли.

Установено е, че пропадъчност при геоложки товар притежава слой от 7,0 до 16,0 m, като пропадъчността при $p=0,3$ МРа е 2-3%. При геоложки товар - който е по-малък от $p=0,3$ МРа, пропадъчността е ниска, т.е. основата е от слабо изразен II-ри тип.



Фиг.10.13. Изглед на телевизионна кула “Русе”

Нивото на подземната вода е в плиоценските седименти и няма опасност да се повдигне и да навлезе в лъоса, който е добре дрениран от двата склона на север и юг.

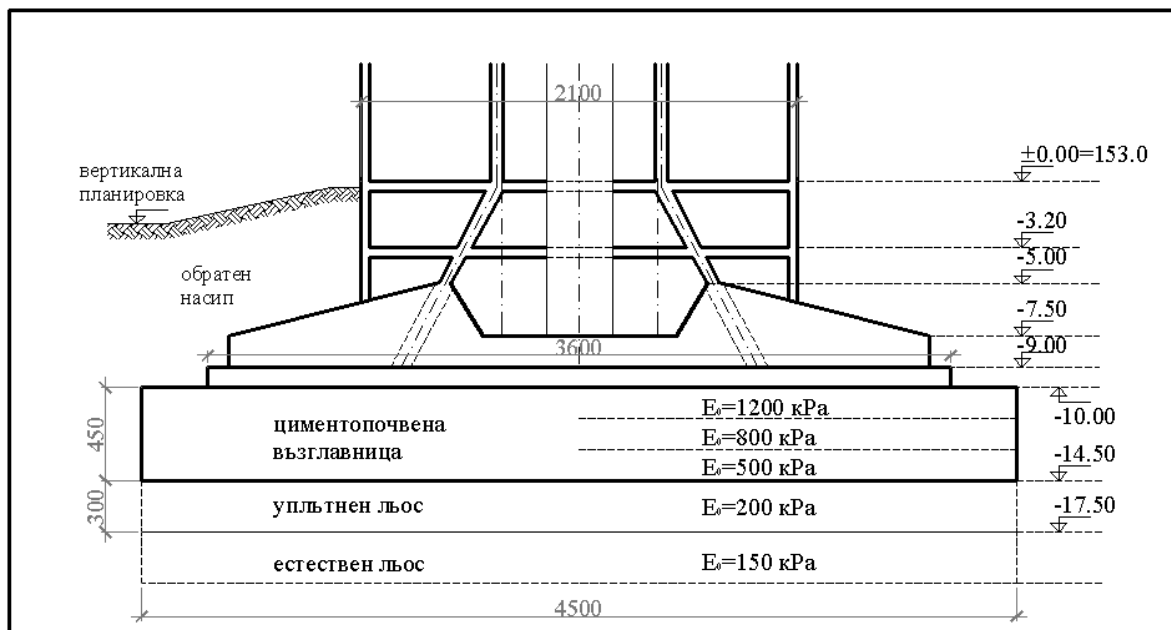
Фундирането на кулата е осъществено по следния начин (фиг. 10.14.):

- Направа на изкоп до кота -14,50 m. Кота 0,00 съответствува на абсолютна кота 153,0 m;

- Уплътняване на дъното на изкопа със седем тонна трамбовка, с която се постига повишаване на $\rho_d > 1,50 \text{ g/cm}^3$ до дълбочина 3 m и модул на обща деформация $E_0 = 20,0 \text{ МПа}$;

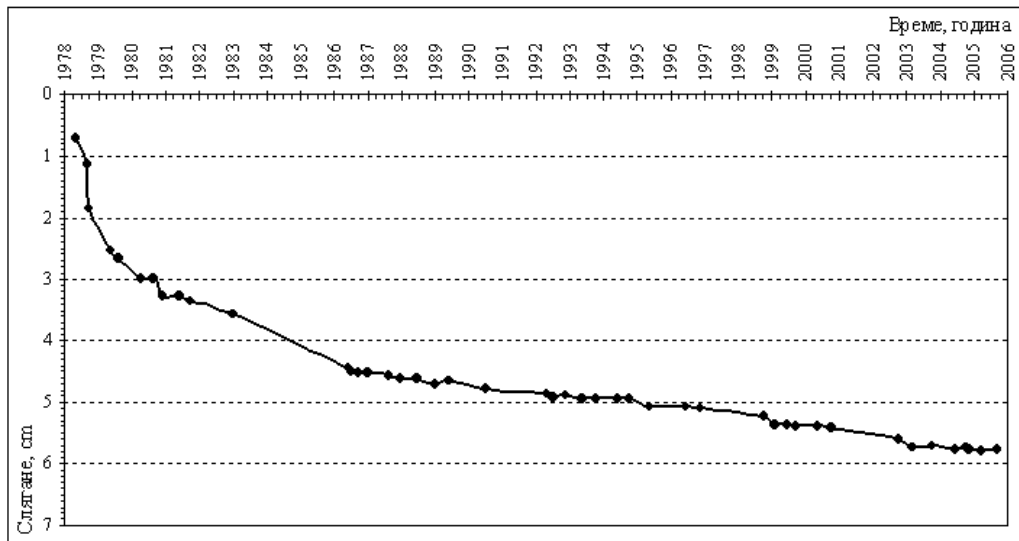
- Изграждане на циментопочвена възглавница с дебелина 4,5 m и диаметър 45 m. Възглавницата се състои от три пласта по 1,5 m със количество на цимента съответно 2, 4 и 6%, увеличаващо се отдолу нагоре и модул на обща деформация E_0 50, 80 и 120 МПа, измерени със щампа. Използувана е почва от изкопа, складирана на повърхността и връщана в него със самосвали чрез рампа във откоса;

Фундаментът е положен на дълбочина -10,0 m, като се състои от две тела – обща стоманобетонна плоча с диаметър 36,0 m и дебелина 1,5 m, и радиални стоманобетонни ребра по горната повърхност на плочата, които имат променливо сечение – височина 1,0 m в края и 3,5 m в центъра. С описания метод е избегната опасността от пропадане на първия, втория и на по-голямата част от третия льосови хоризонти. От последния остават непроменени най-долните 2,6 m, които залягат на голяма дълбочина.



Фиг. 10.14. Схема на фундирането на телевизионната кула в гр. Русе

Слягането на кулата е измервано след нейното изграждане до кота 0,00, след завършване на $\frac{1}{4}$ от нея и с известни прекъсвания по време на нейната 30 годишна експлоатация (фиг. 10.15.).



Фиг. 10.15. Осреднен график “време-слягане”

При проектиране на кулата слягането е прогнозирано по няколко изчислителни методи, като по някои от тях е установено добро съответствие на измереното слягане с предвиденото (Evstatiev et al., 2008).