**Тема 2. Проектування підземного контура гідротехнічних споруд**

***2.1. Визначення розмірів елементів флютбету***

До основних сил, які діють на флютбет, відносяться власна вага флютбету, гідростатичний тиск води, фільтраційний і зважуючий тиски. Сила фільтраційного тиску на флютбет направлена по нормалі до лінії підземного контуру і тому може бути розкладена на вертикальну і горизонтальну складові. Складову вертикального напрямку називають силою фільтраційного тиску (вона діє в напрямку, протилежному напрямку сили власної ваги споруди). На флютбет, який занурений у воду, діє також сила зважуючого тиску згідно до закону Архімеда. Вона направлена вверх і визначається в залежності від глибини занурення флютбету під рівень води нижнього б'єфа.

Загальна сила протиску *W*, яка діє на горизонтальні ділянки підошви флютбету, складається з фільтраційної *Wф* і зважуючої *Wзв*

  (2.1)

Графічно фільтраційні і зважуючі тиски зображуються у вигляді епюр, побудованих на горизонтальній проекції підземного контуру (рис.2.1*б,в*). Ординати епюр фільтраційного тиску визначаються розрахунком, а ординати епюри зважуючого тиску – глибиною занурення точки або площини під рівень води нижнього б'єфа. Сила фільтраційного і зважуючого тисків на 1 м ширини споруди дорівнює площі епюри ділянки підземного контуру, що розглядається, помноженої на питому вагу води.

Якщо відомий розподіл фільтраційного тиску на підошву споруди (рис.2.1), то можна перевірити товщину понура в довільно вибраному перерізі за залежністю

 , (2.2)

де *ΔΗ* – різниця ординат між повним напором і фільтраційним в перерізі, що розглядається;

 Рис. 2.1. Силова дія води на підземний контур споруди:

а – поздовжній розріз по осі водопідпірної споруди;

б – епюра фільтраційного тиску;

в – епюра зважуючого тиску

*Ідоп* – допустимий градієнт фільтрації для грунту понура (глина 4-6, суглинок 3-4) [3].

Для розрахунку товщини водобою в довільно вибраному перерізі з конструкції водобою вирізано елемент довжиною *dx*, товщиною *tв* і шириною в напрямку, перпендикулярному до площини рисунка – 1,0 м (рис.2.2). На виділений елемент буде діяти фільтраційний тиск, рівномірно розподілений по ширині його з інтенсивністю

 , (2.3)

де *hx* – ордината напору, що діє на елемент; *ρg* – питома вага води. Цьому тиску буде протистояти власна вага елемента з врахуванням зважуючої сили за законом Архімеда

 , (2.4)

де *ρδg* – питома вага бетону.

Для граничної рівноваги можна записати

 , (2.5)

звідси розрахункова формула для визначення товщини водобою

, (2.6)

де *γs* – коефіцієнт запасу, який приймається в межах 1,05-1,10.

Рис. 2.2. Схема для розрахунку товщини водобою

***2.2******Фільтраційні деформації грунтів основи споруди***

Частинки грунту під дією фільтраційного потоку зазнають силової дії, що при деяких умовах може призвести до їх переміщення або до фільтраційних деформацій. Фільтраційними деформаціями називаються такі деформації твердої фази грунту, що викликані силами гідравлічної дії. Здатність грунту чинити опір фільтраційним деформаціям називається фільтраційною міцністю груту. Загальна фільтраційна міцність грунту основи оцінюється за залежністю [7]

 , (2.7)

де *Іest.m* – діючий середній градієнт напору в розрахунковій області фільтрації; *Іcr.m* – критичний градієнт напору, який залежить від грунту основи [8]; *γп* - коефіцієнт надійності.

Значення діючого градієнта напору *Іest.m* визначаються шляхом побудови гідродинамічної сітки, або розраховуються за наближеними залежностями.

Частинка грунту, яка знаходиться в фільтраційному потоці, сприймає дію двох сил (рис.2.3): фільтраційного тиску

 , (2.8)

де *dh* – втрата напору на довжині *ds*; *ρg* – питома вага води, і гідродинамічного зважування

 , (2.9)

де *п* – пористість грунту.

Під дією цих сил можуть виникати фільтраційні деформації, яких в нескельних грунтах основ відомо чотири види: суфозія, фільтраційний випір, контактний випір і контактний розмив.

Але якщо значення сил опору частинок грунту буде більше за значення фільтраційної сили, то деформації не буде. Можливість виникнення того чи іншого виду фільтраційної деформації оцінюється градієнтом напору *Іest.m* і механічними характеристиками грунту основи (щільністю *ρs*, діаметром частинок грунту *d*, зчепністю *с*, коефіцієнтом неоднорідності *η*), при цьому для кожного виду окремо за своїми показниками.

**Суфозія.** Розрізняють два види суфозії: хімічна і механічна. Хімічна суфозія характеризується розчиненням солей, що входять до складу грунту, і винесенням їх за межі основи в розчиненому вигляді. Хімічна суфозія є предметом особливого розгляду і тут не наводиться.

Механічна суфозія найчастіше називається просто суфозією – це процес переміщення більш дрібних часток грунту в геометричних просторах між більш крупними частинками під дією фільтраційного потоку.

Суфозія може бути внутрішньою, коли окремі частинки грунту переміщуються всередині ґрунтового масиву, і зовнішньою, коли частинки виносяться фільтраційним потоком з грунтового масиву.

Винесення дрібних частинок грунту може призвести до того, що основа споруди буде ослаблена, а з іншого боку – вихід частинок з грунту основи викличе зміну коефіцієнта фільтрації (збільшується швидкість фільтрації), що, в свою чергу, збільшить суфозію.

Такий прогресивний розвиток суфозійного процесу призводить до утворення пустот, послаблених зон, а в подальшому – до нерівномірних осідань і аварій споруд.

Процес переміщення частинок грунту може спостерігатися тільки в незв'язних грунтах (піщаних, гравелистих, гравелисто-піщаних) в яких відсутні сили зчеплення.

Рис. 2.3. Сили, які діють на частинку

грунту при фільтрації

В глинистих грунтах суфозія відсутня, тому що сили зчеплення між окремими частинками перешкоджають відриву їх фільтраційними силами. Дослідами В.С. Істоміної [4] було встановлено, що суфозія виникає в грунтах, які мають значний коефіцієнт неоднорідності *η* = *d*60/ *d*10 ≥ 10-20, де *d*60 і *d*10 – діаметри зерен грунту, менше яких є відповідно 60 і 10% від всієї маси. Орієнтовно коефіцієнт фільтрації суфозійних грунтів k>0,02...0,25 см/с. Щоб визначити ступінь стійкості грунту проти суфозії, необхідно порівняти значення розрахункового (дійсного) градієнта напору *Іest.m* з критичним градієнтом суфозії *Іcr.m*. Якщо умова (2.7) виконується, то перевірку можна вважати закінченою. Якщо умова (2.7) не дотримується, то необхідно застосовувати відповідні заходи для попередження суфозії.

**Фільтраційний випір грунту** **основи.** Вода, яка рухається в грунті, чинить на нього фільтраційний тиск, який для одиниці об'єму грунту відповідно (2.8) має значення

 , (2.10)

де *Іest.и* – градієнт фільтрації в межах взятого об'єму грунту; *ρ* – густина води. Цей тиск в кожній точці масиву грунту направлений по дотичній до лінії течії в цій же точці. Значить, в зоні верхнього б'єфа фільтраційний тиск направлений зверху вниз і грунт основи привантажується, що призводить до його ущільнення. Під флютбетом лінії течії направлені, в основному, паралельно підошві споруди, а в зоні виходу потоку в нижній б'єф – переважно вверх. В останньому випадку силі фільтраційного тиску *Wф* , яка прикладена до одиниці об'єму грунту, буде протистояти власна вага цього об'єму

 , (2.11)

де *п* – пористість грунту. Нехтуючи силами тертя (які йдуть в запас) між об'ємом грунту, що розглядається, і іншою масою грунту, а також поверхнею флютбету (а для глинистого грунту і зчепленням між окремими частинками), отримаємо умову рівноваги виділеного об'єму

 , (2.12)

а звідси

 . (2.13)

Це і є значення критичного градієнту, при перевищенні якого маса грунту підніметься вверх, що призведе до фільтраційного випору грунту і катастрофічних наслідків для споруди.

Дійсний середній градієнт напору можна визначити за залежністю *Іest.u = hвих/ΔS*, *hвих* – напір на вихідній вертикальній ділянці, *ΔS* – довжина шляху фільтрації. На основі порівняння вихідного градієнту *Іest.u* з критичними *Іcr.и* за формулою (2.7) робиться висновок про можливість появи фільтраційного випору. Для його попередження в місці виходу потоку можна влаштувати привантаження грунту (камінь, плити) або на стадії проектування збільшити довжину підземного контуру споруди, що призведе до зменшення *Іest.u*.

**Контактний випір грунтів.** Цей вид фільтраційної деформації характеризується як процес відшарування і виносу частинок грунту в зоні контакту із шару грунту з меншими фракціями в шар з більш крупними фракціями. Контактний випір має різний характер в незв'язних і зв'язних грунтах. В незв'язних (мішаних) грунтах він може виникнути, головним чином, в тих випадках, коли піщаний грунт навантажений зверху крупнозернистим матеріалом. Під дією фільтраційного потоку грунт, що має менші фракції (пісок), проникає в поровий простір між окремими частинками крупнозернистого грунту. При цьому площа виходу фільтраційного потоку зменшується, що призводить до збільшення градієнтів фільтрації, а це, в свою чергу, до осідання крупного привантаження в пісок і їх перемішування. Явище контактного випору може спостерігатися на виході фільтраційного потоку в нижній б'єф під рисберму або дренаж, під тілом греблі або водобоєм, або в крупнозернистий прошарок грунту, а також, коли фільтраційний потік рухається крізь шари зворотного фільтра. Випір виникає при градієнтах фільтрації, які залежать від крупності основного грунту (піску) і привантаження, їх однорідності та інших параметрів.

Контактний випір в глинистих грунтах (зв'язних) проходить іншим чином, ніж в пісках. Якщо глинистий грунт привантажений крупнозернистим матеріалом, то під дією фільтраційного потоку, який рухається в зонах глинистого грунту, що лежать напроти пор привантаження, починає збільшуватись вологість, а потім спостерігається відшарування глини на деяку глибину *ΔS* (приблизно половина діаметра пор *Dо*) і в результаті привантаження осідає в розпушений простір.

**Контактний розмив** – це вид фільтраційного руйнування контакту двох різних за крупністю незв'язних грунтів (наприклад, піщаних і гравелистих) під дією фільтраційного потоку, який рухається вздовж лінії контакту. Цей вид деформацій може виникати в основі бетонних гідроспоруд, в дренажах, які розташовані під ними, в дренажах земляних гребель, а також в прошарках крупнозернистого матеріалу в основах споруд.

На основі дослідів В. С. Істоміної [4] для незв'язних грунтів градієнт напору фільтраційного потоку, при якому починається контактний розмив *Іcr.си*, залежить від співвідношення діаметрів суміжних шарів *D10*, *d10* і коефіцієнта тертя *tgφ* для дрібнішого грунту, де *D10* – діаметр зерен фільтру, менше яких міститься 10 %.

***2.3. Фільтраційна міцність основ***

Якщо споруда бетонується безпосередньо на підготовленій основі, то фільтрація води на контакті споруди і грунту не буде відрізнятися від фільтрації всередині грунту. Але у випадку, коли підземна частина споруди влаштовується із збірних блоків, які встановлюються на грунт основи, то добитися надійного щільного контакту між грунтом і елементами споруди практично неможливо. В таких випадках, а також при нерівномірних деформаціях основи під навантаженням, можливе нещільне примикання підошви споруди до грунту. По утворених щілинах може розвинутись посилена фільтрація, що супроводжується посиленим винесенням грунту і яка може призвести споруду до аварії. Цей вид фільтраційного руйнування грунту вивчений досить мало, тому що він може проявитися лише в результаті аварії, а після аварії неможливо відновити стан грунту, який передував його руйнуванню.

Різні автори (В. Бляй, Є. Лен, Дж. Джастін, Р. Р. Чугаєв), аналізуючи характеристики гребель, які були зруйновані в результаті аварій, а також тих, які успішно експлуатуються, пропонували встановити граничні значення градієнтів напору на контакті підземного контуру, при яких можна гарантувати надійність споруди з точки зору фільтраційної міцності грунтів основи. За рекомендацією Р. Р. Чугаєва, фільтраційна міцність грунтів основи оцінюється середнім градієнтом напору *Ік* (контролюючим уклоном) в розрахунковій області фільтрації. Повинно бути *Ік* ≤ *Іcr.m*, де *Іcr.m,* – критичний контролюючий градієнт напору, значення якого лежать в межах від 0,29 (дрібний пісок) до 1,2 (глина). Значення *Ік* визначаються розрахунками або на приладі ЕГДА. Необхідно відмітити, що успішно експлуатуються і ті споруди, у яких *Ік* перевищує *Іcr.m*. Це стало можливим в умовах підвищення вимог до влаштування основ, контролю якості робіт, введення відповідних конструктивних рішень в підземному контурі тощо, але в практиці будівництва відсутність скупчених ходів фільтрації досягається конструктивними рішеннями і відповідною якістю будівельних робіт.

Невід'ємною частиною конструкцій, які відводять фільтраційну воду (дренажів) є зворотні фільтри. Їх призначення – захищати грунт основи від фільтраційних деформацій, які можливі при виході фільтраційною потоку в дренаж, і зберігати водопроникну властивість дренажу.

Як правило, зворотний фільтр влаштовується із 1-3 шарів незв'язного грунту різної крупності, які вкладаються нормально до напрямку руху фільтраційної течії і в порядку збільшення крупності частинок грунту по ходу фільтрації. Товщина кожною шару зворотного фільтра *tф* повинна бути 5*ds*,85, тобто не менше 10...15 см (*ds*,85 – середній діаметр фракції грунту, маса яких разом з масою більш дрібних фракцій складає 85% маси всього грунту). В практиці будівництва цей розмір складає 20...30 см, а при укладанні у воду - 50 см і більше. Менші розміри відносяться для шарів із перебраного, більш однорідного матеріалу, а більші – для менш однорідної суміші.

Зворотний фільтр – це досить відповідальна конструкція, від якої залежить фільтраційна міцність грунту основи, термін служби гідротехнічної споруди і тому до нього ставляться такі вимоги: матеріал повинен бути міцним, водостійким, морозостійким; частинки одного шару фільтра не повинні проникати в суміжний шар, за виключенням тих, вимивання яких допускається; фільтр не повинен замулюватися, його пропускна спроможність повинна зберігатись досить тривалий час; не повинно бути переміщення частинок всередині кожного шару.

Найбільш відповідають переліченим вимогам зворотні фільтри із природного промитого матеріалу з коефіцієнтом міжшаровості *ε* = 7 – 10, але такі фільтри досить дорогі і тому частіше використовуються однорідні грунти різної крупності. Склад шарів підбирається в залежності від складу грунту, який необхідно захистити, виду можливих фільтраційних деформацій і напрямку фільтраційного потоку