

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР  
Г Л А В Н И И П Р О Е К Т

ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ГИДРОТЕХНИКИ  
имени Б. Е. ВЕДЕНЕЕВА

## РУКОВОДСТВО ПО РАСЧЕТАМ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ПЛОТИН ИЗ ГРУНТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

П 55-76  
ВНИИГ

Ленинград  
1976

УДК 621.137.034.9 : 626/627

Работа посвящена, с практической точки зрения, весьма важным вопросам — методике расчетов казуальной и нормальной фильтрационной прочности земляных плотин и их оснований, от решения которых существенно зависят основные размеры сооружения, его прочность и устойчивость, а также экономика его возведения.

Основное назначение работы — дать для инженеров проектных и строительных организаций систематически изложенные и удобные для практического применения современные методы расчета и оценки фильтрационной прочности напорных земляных сооружений.

Р 3211-327  
051 (01)-76

(С) Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники имени Б. Е. Веденеева (ВНИИГ), 1976

### СОДЕРЖАНИЕ

#### Предисловие

#### Раздел 1. Общие положения

- 1.1. Область применения
- 1.2. Принятые термины и обозначения

#### Раздел 2. Расчет казуальной фильтрационной прочности грунта земляных гидротехнических сооружений по методу контролирующего градиента напора

- 2.1. Общие положения
- 2.2. Основы расчета казуальной фильтрационной прочности. Допускаемые контролирующие градиенты напора ( $J_k$ )<sub>д</sub>
- 2.3. Определение  $J_k$  для тела плотины
- 2.4. Определение  $J_k$  для основания плотины
- 2.5. Фильтрация в теле плотины в обход зуба (не завершено сверху ядром или экраном)

#### Раздел 3. Расчет нормальной фильтрационной прочности грунта тела плотины и грунта основания

- 3.1. Общие положения
- 3.2. Основные виды фильтрационных деформаций в земляных и каменно-земляных плотинах
- 3.3. Методы расчета по определению фильтрационных деформаций грунтов
- 3.4. Общие указания к расчетам фильтрационно-суффозионных деформаций грунтов (по 3.3 п. 2°, 3°, 4°)
- 3.5. Определение разрушающих градиентов выпора грунта и меры к борьбы с местным

фильтрационным выпором .

3.6.Нормальная (местная) фильтрационная прочность грунта в области трубчатого дренажа

3.7.Деформация верховых откосов от воздействия волн

3.8.Фильтрационная прочность противофильтрационных устройств: понура, экрана, ядра плотины

3.9.Фильтрационная прочность грунта ядра (экрана) в зоне контакта (при сопряжении) со скалой основания .

3.10.Рекомендации по усилению фильтрационной прочности грунтов ядер (экранов) плотин в контактных зонах

3.11.Проверка на местную фильтрационную прочность грунта основания плотины в зоне сопряжения с висячей шпунтовой стенкой или зубом

#### Раздел 4. Расчеты фильтрационной прочности земляных гидротехнических сооружений при сработке (снижении) уровня воды в водохранилище

4.1.Общие положения

4.2.Определение скорости снижения уровня воды в грунте откоса плотины (канала), ядра, экрана

4.3.Определение фильтрационной прочности грунтовых ядер, экранов, переходных зон, при снижении уровня воды в бьефе

4.4.Дополнительные проверки

4.5.Рекомендации

4.6.Фильтрационная прочность и устойчивость откосов земляных плотин и каналов с экранами из полимерных пленок

#### Раздел 5. Примеры расчета местной фильтрационно-суффозионной прочности грунта тела плотины и грунта основания

##### Список литературы

## ПРЕДИСЛОВИЕ

При проектировании и строительстве земляной или каменно-земляной плотин приходится решать вопрос о фильтрационной прочности грунта, образующего тело и основание плотины. От решения этого вопроса существенно зависят основные размеры сооружения, а следовательно, и его стоимость.

Фильтрационный поток, получающийся в теле плотины и ее основании, обуславливает возникновение соответствующих фильтрационных сил, приложенных к скелету (твердой фазе) грунта. Эти силы, с одной стороны, могут способствовать снижению общей устойчивости откосов плотины или обуславливать возникновение так называемого местного фильтрационного выпора, с другой же стороны, упомянутые силы могут вызвать фильтрационные деформации скелета грунта в виде так называемых с у ф ф о з и и и к о л ь м а т а ж а.

Известно, что при проектировании плотин приходится различать безопасные фильтрационные деформации (например, безопасную суффозию), которые не могут вызвать разрушение сооружения; вместе с тем приходится различать также и опасные фильтрационные деформации, обуславливающие нарушение упомянутой выше фильтрационной прочности грунта; эти деформации могут привести сооружение к полному разрушению. Изучение и анализ аварий земляных плотин показывают, что около 80% аварий произошло именно вследствие нарушения фильтрационной прочности грунта тела плотины или основания.

Предлагаемое «Руководство» для проектирования земляных напорных сооружений не затрагивает вопроса об общей устойчивости земляных откосов (по этому вопросу см. «Указания по расчету устойчивости земляных откосов», ВСН 04-71, составленные Р. Р. Чугаевым на основе его научных разработок). Ниже рассматриваются только вопросы фильтрационной прочности грунта в поясненном выше смысле; дополнительно в некоторой мере освещается также расчет местного фильтрационного выпора.

Согласно концепции Р. Р. Чугаева, принятой в СНиПе [1] и нормах МЭС СССР [14] и подробно освещенной в его трудах [2, 4], в области фильтрационной прочности грунта, следует различать:

а) так называемую казуальную (случайную) фильтрационную прочность, которую нет

возможности рассчитывать, опираясь на аппарат механики, и

б) так называемую нормальную фильтрационную прочность которая может рассчитываться на основании законов механики с использованием заранее известных граничных и начальных условий.

Особенно важным в практическом отношении является вопрос о казуальной фильтрационной прочности земляного сооружения, так как именно исходя из учета этой прочности достаточно часто приходится назначать главнейшие размеры земляных сооружений, например, длины путей фильтрации, противопоставляемые действующему на сооружение напору.

Что касается нормальной фильтрационной прочности, исходя из которой часто проектируются, в частности, обратные фильтры сооружений (являющиеся, как известно, одним из наиболее ответственных элементов гидротехнического сооружения), то в приводимых ниже материалах используются научные разработки А. Н. Патрашева, М. П. Павчича, Г. Х. Праведного, В. Н. Жиленкова [6, 7, 8, 9, 10, 11, 13].

Учитывая большую важность данного вопроса, с практической точки зрения, а также отсутствие систематически изложенных материалов по оценке и решению вопроса фильтрационной прочности плотин из грунтовых материалов и их оснований, в 1973 г., в результате выполнения работ по линии СЭВ, было разработано и составлено в первой редакции «Руководство по расчетам фильтрационной прочности плотин из грунтовых материалов» и направлено на отзывы высококвалифицированным специалистам в области гидротехнических сооружений (Р. Р. Чугаеву, А. Л. Можевитинову, Б. П. Ферингеру и др.). С учетом полученных замечаний и пожеланий рецензентов данное «Руководство» было отредактировано и выпущено в свет.

В печатном издании это «Руководство» было передано Постоянной Комиссии по энергетике и странам Участникам СЭВ.

Данное «Руководство» нашло широкое практическое применение не только в СССР, но и за рубежом (см. отзыв Болгарского журнала «Гидротехническое строительство», № 2, 1974 г.).

В 1974—1975 гг. были выполнены дополнительные разработки и рекомендации для включения в состав «Руководства» с целью его усовершенствования и дополнения. Следует отметить, что данное «Руководство» является развитием и дополнением общегосударственных СНиПов, часть II-53-73 «Плотины из грунтовых материалов. Нормы проектирования».

Основное назначение предлагаемого «Руководства» — дать в руки инженеров-практиков систематически изложенные и удобные для практического применения современные методы оценки фильтрационной прочности напорных земляных сооружений.

Настоящее «Руководство по расчетам фильтрационной прочности плотин из грунтовых материалов» составлено в Комплексной лаборатории грунтовых сооружений ст. научн, сотр., канд. техн. наук Г. Х. Праведным.

Министерство энергетики и электрификации СССР	<b>Руководство по расчетам фильтрационной прочности плотин из грунтовых материалов</b>	<u>П 55-76</u> ВНИИГ
Внесено Всесоюзным ордена Трудового Красного Знамени научно- исследовательским институтом гидротехники имени Б. Е. Веденеева	Утверждено ВНИИГом им. Б. Е. Веденеева Решением № 53 от 21 июля 1976 г. и согласовано с Главниипроектком Минэнерго СССР	Срок введения IV квартал 1976 г.

## Раздел 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

### 1.1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Настоящее «Руководство» распространяется на проектирование и строительство плотин из

грунтовых материалов и предназначается для проведения проверки фильтрационной прочности поперечных сечений (профилей) плотины.

Проверка на фильтрационную прочность поперечных сечений плотины должна выполняться с учетом принятой конструкции плотины, геологического строения основания и физических характеристик грунтов.

Окончательные размеры плотины, а также формы и размеры подземного контура плотины должны быть обоснованы соответствующими расчетами, в том числе и расчетами фильтрационной прочности.

При расчетах фильтрационной прочности следует учитывать:

1) казуальную фильтрационную прочность грунта тела плотины и грунта основания, которая может быть нарушена в заранее не известных отдельных местах продольного профиля плотины, вследствие ряда причин: в процессе производства работ, неучтенной неравномерной осадкой плотины, неучтенной неоднородностью грунта и др., что может привести к образованию в теле плотины или ее основании поперечных ходов (щелей) сосредоточенной фильтрации. На основании расчета казуальной фильтрационной прочности грунта тела плотины и ее основания устанавливаются главные размеры земляной плотины, как-то: длина, определяющая местоположение дренажа низового клина плотины, толщина ядра или экрана, понура и пр. Этот расчет должен выполняться, исходя из наибольшего возможного напора, действующего на сооружение, по методу (предложенному Р. Р. Чугаевым) контролирующего градиента напора  $J_k$  (как некоторого характерного градиента напора для всей области фильтрации или ее части). При выполнении указанных расчетов следует рассматривать отдельно основание и тело плотины,

2) нормальную фильтрационную прочность грунта тела плотины и грунта основания, которая может быть нарушена в ряде известных, наиболее слабых местах поперечного профиля сооружения, например: на контактах мелкозернистых и крупнозернистых грунтов, слагающих основание или само тело земляной плотины; в области выхода фильтрационного потока в нижний бьеф, где может происходить или фильтрационный выпор грунта или внешняя суффозия, внутренняя суффозия в теле земляной плотины или в грунте основания; при выходе фильтрационного потока в слой фильтра дренажа или переходную зону и пр. Расчет нормальной фильтрационной прочности грунта основания земляных плотин и их элементов рекомендуется выполнять по методике, приведенной ниже.

Если фильтрационная прочность сооружения или его отдельных конструктивных элементов не обеспечивается, то в этом случае должны быть предусмотрены соответствующие инженерные мероприятия по упрочнению сооружения или его отдельных элементов.

## 1.2. ПРИНЯТЫЕ ТЕРМИНЫ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

Рекомендуется придерживаться следующих терминов и буквенных обозначений.

### ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ

Фильтрационные деформации грунта — деформации твердой фазы грунта, вызываемые главным образом силами гидравлического воздействия.

Опасные фильтрационные деформации — фильтрационные деформации, в результате которых сооружение может разрушиться.

Безопасные фильтрационные деформации — фильтрационные деформации, которые с течением времени прекращаются и не грозят целостности сооружения, сюда относятся, например, наблюдаемые в начальный период эксплуатации земляных сооружений незначительный вынос или отложение мелких пылеватых частиц грунта.

Суффозия — изменение гранулометрического состава и структуры грунта, вследствие перемещения фильтрационным потоком внутри грунта его отдельных частиц или их выноса, или растворения содержащихся в грунте водорастворимых солей, или их вымыва, в результате чего возможно нарушение прочности грунта.

Механическая суффозия — отрыв или перемещение внутри грунта или вынос отдельных частиц из его толщи, вследствие воздействия фильтрационного потока.

Внутренняя механическая суффозия — перемещение фильтрационным потоком внутри грунта мелких его частиц.

Внешняя механическая суффозия — вынос фильтрационным потоком отдельных частиц

из грунта, лежащих на поверхности грунтового массива.

**Опасная механическая суффозия** — отрыв, перемещение и вынос фильтрационным потоком мелких частиц и частиц скелета грунта в таком количестве, при котором нарушается его прочность.

**Кольматаж** — отложение в порах грунта мелких частиц, несомых фильтрационным потоком (внутренний кольматаж) или их отложение на поверхности грунтового массива (поверхностный кольматаж).

**Контактный размыв** — размыв мелкозернистого или связного (глинистого) грунта на контакте с крупнозернистым грунтом (или фильтром) под действием продольной фильтрации.

**Выпор (фильтрационный)** — отрыв и перемещение некоторого объема грунта, происходящие под действием суммарной силы гидравлического воздействия.

**Фильтрационная прочность грунта** — способность грунта сопротивляться возникновению опасных фильтрационных деформаций его скелета (суффозии, контактному размыву, отслаиванию связного грунта, фильтрационному выпору).

**Скелет грунта** — совокупность его частиц, воспринимающих и передающих действие внешних сил, обеспечивающих прочность и несущую способность грунта.

**Заполнитель грунта** — частицы, располагающиеся в порах скелета грунта.

**Суффозионный грунт** — грунт, в котором может происходить и развиваться механическая суффозия при скоростях фильтрации, превышающих критические.

**Несуффозионный грунт** — грунт, в котором механическая суффозия невозможна.

**Контактная область грунтов** — область, включающая границу двух смежных, различных по своему гранулометрическому составу грунтов, определяемая глубиной возможного проникновения частиц одного грунта в другой.

**Расслаивание грунта** — отделение крупных частиц от мелких, происходящее при транспортировке и отсыпке грунта.

**Отслаивание грунта** — отрыв от толщи агрегатов частиц связного (глинистого) грунта в зоне контакта (в порах) крупнозернистого грунта или грунта обратного фильтра.

**Дренаж** — устройство, предназначенное для перехвата и понижения уровня или давления грунтовых вод, а также для организованного отвода профильтровавшейся в дренаж воды.

**Обратный фильтр** — слои песчано-гравийно-галечниковых и щебеночных грунтов или искусственных материалов, предохраняющие нескальные грунты сооружений от механической суффозии (а в отдельных случаях также от фильтрационного выпора).

**Переходная зона** — переходный слой (слои) грунтового материала между ядром (грунтовым экраном) и призмами плотины, обеспечивающий фильтрационную прочность ядра (экрана), а также непросыпаемость самого материала переходной зоны в поры материала призм плотины.

**Водоупор** — практически водонепроницаемый слой грунта подстилающий водопроницаемое основание плотины.

## БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $\gamma_r$  — объемный вес сухого грунта;  
 $\Delta$  — удельный вес материала частиц грунта;  
 $d$  — диаметр частиц грунта;  
 $d_{10} \dots d_{17} \dots d_{60}$  — диаметры частиц грунта, меньше которых в его составе содержится 10 ... 17 ... 60% по весу;  
 $d_{ci}$  — диаметр (суффозионных) частиц грунта, которые могут быть вынесены фильтрационным потоком;  
 $\eta = \frac{d_{60}}{d_{10}}$  — коэффициент разнородности грунта;  
 $n$  — пористость грунта (в долях единицы);  
 $\varepsilon$  — коэффициент пористости;  
 $k$  — коэффициент фильтрации грунта;  
 $D_0, d_0$  — средний размер (диаметр) фильтрационного хода (поры) в крупнозернистом и мелкозернистом грунтах;  
 $D_0^{\text{макс}}, d_0^{\text{макс}}$  — диаметр максимального фильтрационного хода (поры) в крупнозернистом и

- мелкозернистом грунтах;
- $W$  — влажность грунта, %;
- $W_T$  — граница текучести грунта;
- $W_p$  — граница раскатывания грунта;
- $W_{п}$  — число пластичности грунта;
- $G$  — коэффициент водонасыщения (влажности) грунта;
- $\gamma_v$  — удельный вес воды;
- $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости воды;
- $g$  — ускорение силы тяжести;
- $J_{кр}, v_{кр}$  — критические градиент напора и скорость фильтрация, при которых наступает механическая суффозия;
- $J_{доп}, v_{доп}$  — допустимые градиент напора и скорость фильтрации (равные критическим, деленным на коэффициент запаса);
- $\theta$  — угол между направлениями скорости фильтрации и силы тяжести;
- $\chi$  — коэффициент неравномерности раскладки частиц в грунте, или коэффициент локальности суффозии;
- $Re$  — число Рейнольдса;
- $Z$  — напор на плотине (разность отметок горизонтов воды верхнего и нижнего бьефов; при отсутствии нижнего бьефа  $Z = h_v$ );
- $h_v, h_n$  — глубины воды соответственно в верхнем и нижнем бьефах;
- $T$  — заглубление поверхности водоупора под поверхностью основания плотины;
- $h_1, h_2$  — заглубление поверхности водоупора соответственно под горизонтом воды в верхнем и нижнем бьефах;
- $L_{ур}$  — горизонтальное расстояние между урезами воды верхнего и нижнего бьефов;
- $\delta$  — толщина маловодопроницаемой преграды ( $\delta_э$  — экрана,  $\delta_я$  — ядра,  $\delta_п$  — понура.);
- $J_k$  — действующий градиент напора (пьезометрический уклон), контролирующий казуальную фильтрационную прочность рассматриваемого сооружения;
- $(J_k)_д$  — допустимая величина  $J_k$ .

Другие буквенные обозначения поясняются в тексте.

## Раздел 2. РАСЧЕТ КАЗУАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ГРУНТА ЗЕМЛЯНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ПО МЕТОДУ КОНТРОЛИРУЮЩЕГО ГРАДИЕНТА НАПОРА\*

\* Данные расчеты выполнены по методу, предложенному Р. Р. Чугаевым, изложенному в его научных трудах [2, 3, 4].

### 2.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Расчеты казуальной (случайной) прочности грунта сооружения и его основания должны сводиться к определению максимально допустимой длины пути фильтрации в земляном сооружении, противопоставляемой напору, действующему на сооружение, т. е. к определению такой длины пути фильтрации, при которой исключается возможность раскрытия ходов сосредоточенной фильтрации.

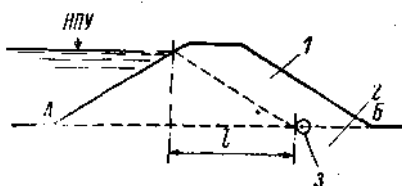


Рис. 1. Схема земляной плотины

1—тело плотины; 2 - основание плотины; 3 - дренаж;  
 А— Б-условная линия тока, отделяющая области фильтрации тела и основания плотины;  $l$  — длина, определяющая местоположение дренажа.

На основании расчета казуальной фильтрационной прочности грунта устанавливаются главные размеры напорного земляного сооружения, как то: длина  $l$ , определяющая местоположение дренажа низового клина земляной плотины (рис. 1); толщина ядра или экрана, а так же понура, длина понура перед земляной плотиной и т. п.

## 2.2. ОСНОВЫ РАСЧЕТА КАЗУАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ. ДОПУСКАЕМЫЕ КОНТРОЛИРУЮЩИЕ ГРАДИЕНТЫ НАПОРА ( $J_k$ )<sub>д</sub>

Согласно методу контролирующего градиента напора считается, что казуальная прочность не будет нарушена при условии [2]:

$$J_k \leq (J_k)_{д} \quad (1)$$

где  $J_k$  — некоторый средний градиент напора для всей рассматриваемой области фильтрации или ее части, контролирующей казуальную прочность данного земляного сооружения;  $(J_k)_{д}$  — допускаемое значение контролирующего градиента напора;

При расчёте казуальной фильтрационной прочности по формуле (1) следует рассматривать отдельно тело плотины и ее основание (рис. 1), расположенное ниже условной горизонтальной линии А—Б, расчленяющей области фильтрации на две упомянутые выше части.

Допускаемые контролирующие градиенты напора ( $J_k$ )<sub>д</sub> следует принимать: для основания земляной плотины согласно табл. 1, для тела земляной плотины — согласно табл. 2.

Таблица 1

### Допускаемые пьезометрические уклоны ( $J_k$ )<sub>д</sub> контролирующие казуальную (случайную) прочность грунта основания плотины (утверждено СНиП II-53-73)

Грунт основания	Класс сооружения по капитальности			
	I	II	III	IV-V
Плотная глина	0,90	1,00	1,10	1,20
Суглинок	0,45	0,50	0,55	0,60
Крупный песок, гравий	0,36	0,40	0,44	0,48
Песок средней крупности	0,30	0,33	0,36	0,40
Мелкий песок	0,23	0,25	0,27	0,30

Таблица 2

### Допускаемые пьезометрические уклоны ( $J_k$ )<sub>д</sub> контролирующие казуальную прочность тела земляной плотины и земляных противофильтрационных призм каменно-земляных плотин (утверждено СНиП II-53-73)

Грунты, слагающие тело плотины	Класс сооружения по капитальности			
	I	II	III	IV-V
Глинобетон и глина	1,5	1,65	1,8	1,95
Суглинок	1,05	0,15	1,25	1,35
Песок средней крупности	0,70	0,80	0,90	1,00
Супесь.	0,55	0,65	0,75	0,85
Песок мелкий	0,45	0,55	0,65	0,75

Для грунтовых экранов, ядер из глинобетона, глины и суглинка согласно СНиП II-53-73

«Плотины из грунтовых материалов. Нормы проектирования» численные значения  $J_k$  следует принимать:

- а) для земляных насыпных плотин  $J_k = 4—10$ ;
- б) для каменно-земляных  $J_k = 2—6$ ;
- в) для понура  $J_k$  должно быть не более 10—12.

Расчеты казуальной фильтрационной прочности грунта земляных плотин по формуле (1) носят проверочный характер, при этом, имея предварительно намеченный (или существующий) профиль плотины, устанавливаем для ее тела и основания значения  $J_k$  и  $(J_k)_д$  и затем проверяем данный профиль в соответствии с формулой (1).

Величину  $J_k$  надлежит определять используя следующие способы [2]:

- 1) способ отделения тела плотины от его основания горизонтальной линией тока; при этом, как отмечалось, следует отдельно вычислять  $J_k$  для тела плотины и для ее основания;
- 2) способ «прямой депрессии»: этот способ в основном следует применять для определения  $J_k$ , относящегося к телу плотины;
- 3) виртуальные способы и способ удлиненной контурной линии; как правило, этим способом следует пользоваться при определении  $J_k$ , относящихся к основанию плотины.

В качестве расчетных горизонтов воды в бьефах следует принимать: в верхнем бьефе НПУ (нормальный подпертый уровень) и в нижнем бьефе самый низкий уровень воды.

Примечание. При сухом нижнем бьефе горизонт воды нижнего бьефа следует считать совпадающим с поверхностью дна.

### 2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ $J_k$ ДЛЯ ТЕЛА ПЛОТИНЫ

1°. *Однородное тело плотины.* Рассматривая однородное тело плотины (рис. 2), отделяем его от основания горизонтальной линией тока А—Б. После этого, не интересуясь фильтрацией воды в основании, используем следующие способы определения  $J_k$  для тела плотины.

а) В случае дренажа низового клина плотины в виде каменного банкета (рис. 2, а) или в виде трубчатого дренажа (рис. 2, б).

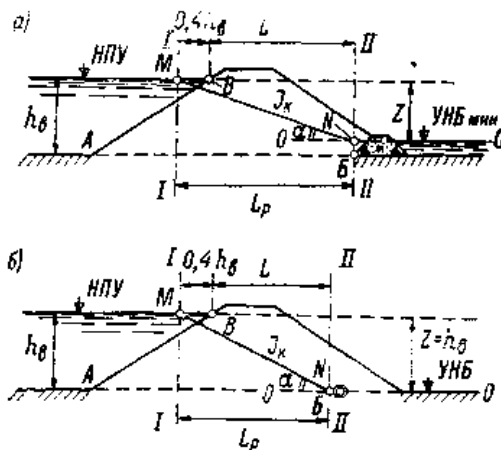


Рис 2 Расчетные схемы плотин

а - однородная земляная плотина с каменным банкетом; б—то же с трубчатым дренажем.

В этом случае прежде всего проводим вертикаль I-I на расстоянии, равном  $0,4 h_B$  от уреза верхнего бьефа и вертикаль II-II через самую крайнюю левую точку Б дренажа (рис. 2, а, б). Далее фиксируется точка М пересечения вертикали I-I с горизонтом воды верхнего бьефа и точка N пересечения вертикали II-II с линией О — О, проведенной на уровне горизонта воды нижнего бьефа. После этого проводим «прямую депрессии» MN, контролирующую казуальную прочность грунта тела плотины.

Величина  $J_k$  в данном случае будет равна

$$J_k = \operatorname{tg} \alpha = \frac{Z}{L_p} = \frac{Z}{L + 0,4h_B}, \quad (2)$$



где  $\alpha$  — угол наклона линии MN к горизонту;  $L_p$  — расчетная ширина плотины;  $h_b$  — глубина в верхнем бьефе;  $L$  — горизонтальное расстояние между урезом воды верхнего бьефа и левой крайней точкой дренажа (см. рис. 2).

б) В случае наклонного дренажа или в случае отсутствия дренажа (рис. 3). Здесь, в отличие от предыдущего случая, вертикаль II—II проводится на расстоянии  $0,4h_n$  от уреза воды нижнего бьефа.

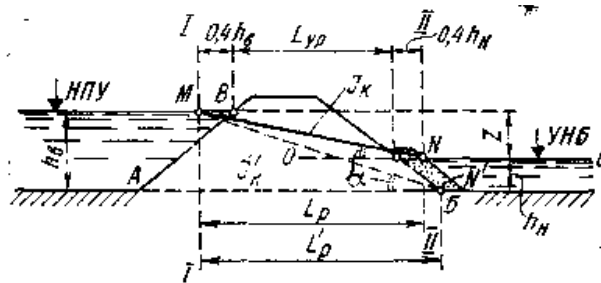


Рис. 3. Плотина с наклонным дренажем

$J_k$  — контролирующий градиент в случае наклонного дренажа;  $J_k'$  — в случае отсутствия наклонного дренажа

Величина  $J_k$  вычисляется по формуле

$$J_k = \frac{Z}{L_p} = \frac{Z}{L_{yp} + 0,4h_b + 0,4h_n} \quad (3)$$

где  $L_{yp}$  — расстояние по горизонтали между урезами верхнего и нижнего бьефов;  $h_n$  — глубина нижнего бьефа.

При  $h_n = 0$  «прямая депрессии» получает вид прямой MN' (рис.3).

В этом случае величина контролирующего градиента будет равна

$$J_k' = \frac{h_a}{L_p'} \quad (4)$$

где  $L_p'$  — расстояние по горизонтали между точками M и N'.

в) В случае, когда дренаж расположен относительно близко к верхнему бьефу; вода в нижнем бьефе отсутствует (рис. 4).

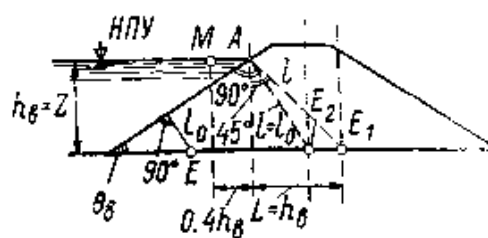


Рис. 4. Плотина с внутренним дренажем  
 $E_1$ ;  $E_2$ ;  $E$  — места расположения дренажа

В этом случае для определения величины  $J_k$  поступают следующим образом: из точки A действительного уреза воды в верхнем бьефе следует провести два луча  $A - E_1$  и  $A - E_2$ . Луч  $A - E_1$  составляет с вертикалью угол  $45^\circ$ ; луч  $A - E_2$  с линией откоса составляет угол  $90^\circ$ .

1) Если точка  $E$  начала дренажа лежит правее точки  $E_1$  тогда  $J_k$  следует определять по формуле (2).

2) В случае, когда точка  $E$  начала дренажа лежит между точками  $E_1$  и  $E_2$  величину  $J_k$  следует определять по формуле:

$$J_k = \frac{h_b}{l}, \quad (5)$$

где  $l$  — расстояние от точки A действительного уреза воды до точки E начала дренажа.

3) В случае, если точка  $E$  начала дренажа лежит левее точки  $E_2$ , величину  $J_k$  следует определять по формуле:

$$J_k = \frac{h_B}{l_0}, \quad (6)$$

где  $l_0$  — длина перпендикуляра, опущенного из начальной точки  $E$  дренажа на линию верхового откоса.

2°. *Тело плотины с ядром или экраном.* В этом случае следует определять два значения  $J_k$ : а) для ядра  $(J_k)_я$  или экрана  $(J_k)_э$  и б) для остальной части тела плотины  $(J_k)_т$ .

В результате соответствующих фильтрационных расчетов [2, глава III; 5] определяется величина перепада свободной поверхности фильтрационного потока на ядре или экране -  $Z'$  (рис.5)

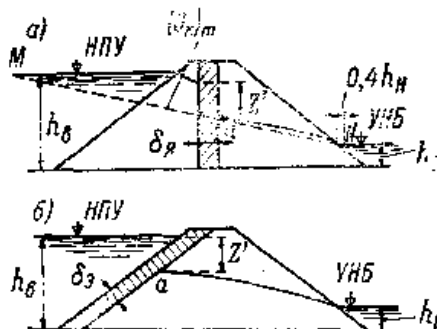


Рис 5 Плотина с ядром и экраном  
 $Z'$  – перепад свободной поверхности фильтрационного потока;  
 $\delta_я$  и  $\delta_э$  – толщины ядра и экрана (осредненные)

После этого значения  $(J_k)_я$  или  $(J_k)_э$  определяется по формулам:

$$(J_k)_я = \frac{Z'}{\delta_я} \quad \text{и} \quad (J_k)_э = \frac{Z'}{\delta_э}. \quad (7)$$

где  $\delta_я$  и  $\delta_э$  — толщины ядра и экрана (осредненные).

Полученные величины  $J_k$  относятся только к нижней части ядра или экрана, т. е. к части, расположенной ниже точки  $a$ , указанной на рис. 5; выше этой точки значения  $J_k$  будут меньше.

При отсутствии воды в нижнем бьефе плотины, в этом случае величины  $(J_k)_я$  и  $(J_k)_э$  с запасом будут равны:

$$(J_k)_я = \frac{h_B}{\delta_я} \quad \text{и} \quad (J_k)_э = \frac{h_B}{\delta_э}. \quad (8)$$

Величину  $(J_k)_т$  при устройстве ядра или экрана, следует устанавливать как указано в п. 1°, проводя на рис. 5 (пунктир MN) прямую депрессии MN через точку  $a$  и выбирая точку N так, как указано на рис. 2—4 (в зависимости от типа имеющегося дренажа).

## 2.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ $J_k$ ДЛЯ ОСНОВАНИЯ ПЛОТИНЫ

1°. *Однородное основание плотины; плотина без зуба.*

Для получения величины  $J_k$  основания плотины следует выполнить соответствующие построения, используя способ удлиненной контурной линии [2, 4]. Для этой цели поступаем следующим образом (рис. 6). Обозначаем A и B крайние точки подошвы плотины. Сносим эти точки по вертикали соответственно на горизонт воды верхнего и нижнего бьефов, причем получаем точки  $A_1$  и  $B_1$ . От точек  $A_1$  и  $B_1$  соответственно влево и вправо отк-

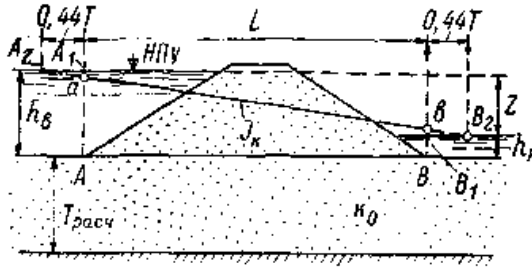


Рис. 6. Плотины без зуба на однородном основании

$T_{расч}$  - заглубление расчетного водоупора ( $T_{расч} = 0,5L$ );  $A_1abB_1$  - пьезометрическая линия для подошвы плотины  $AB$  ( $ab - J_k$ )

ладываем по горизонтали отрезки длиной  $0,44 T_{расч}$  и получаем точки  $A_2$  и  $B_2$ . Соединяем эти точки прямой  $A_2B_2$ .

После этого намечаем искомую пьезометрическую линию для подошвы  $AB$  плотины в виде ломаной линии  $A_1abB_1$ .

Полученная линия  $ab$  дает искомое значение величины  $J_k$  для случая наклонного дренажа (рис. 3), которое равно

$$J_k = \frac{Z}{L + 0,88T_{расч}} \quad (9)$$

где  $L$  — ширина тела плотины по низу;  $T_{расч}$  — заглубление расчетного водоупора, величина которого может быть принята равной  $0,5L$ , т. е. (рис. 6):

$$T_{расч} = 0,5L \quad (9')$$

если  $T_{действ} < 0,5L$ , то  $T_{расч} = T_{действ}$ .

В случае дренажа, отличного от наклонного, за величину  $L$  в формуле (9) следует принимать длину линии  $AB$ , показанной на рис. 2,  $a, б$ .

2°. *Однородное основание; плотина с висячим зубом.* В этом случае (рис. 7), также как и в предыдущем (п. 1°), используется способ удлиненной контурной линии. При этом только, строя развернутый в горизонтальную прямую  $M'N'$  удлиненный подземный контур плотины, помимо длины горизонтальных участков контура  $L_2$ , учитывается еще и длина вертикальных участков подземного контура тела плотины.

$$L_B = 2S \quad (10)$$

При наличии понура размер  $L_2$  увеличивается на величину, равную длине понура —  $L_п$ .

С учетом указанных добавлений  $J_k$  определяется по формуле (9), где вместо  $L$  подставляются значения  $L_p = L_2 + L_B$  или  $L_p = L_2 + L_п$ , т. е.

$$J_k = \frac{Z}{L_p + 0,88T_{расч}} \quad (11)$$

Как следует из приведенного выше, для уменьшения величины  $J_k$  в данном случае можно увеличить глубину зуба  $S$  или сделать, например, два зуба, выполненных из маловодопроницаемого грунта.

Величину  $(J_k)_з$  для самого зуба можно определить, используя указанный способ, определив напоры на левой и правой вертикальных гранях зуба. Разность напоров на левой и правой

гранях зуба следует разделить на его действительную ширину  $\delta_з$ , т. е. получим  $(J_e)_з = \frac{h'_a - h'_t}{\delta_з}$

(имея в виду поперечную горизонтальную фильтрацию воды через зуб).

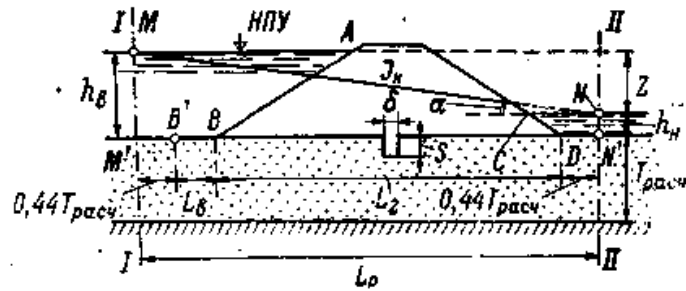


Рис 7. Плотина с висячим зубом на однородном основании  
 $L_p$  — расчетная горизонтальная длина;  $S$  — глубина зуба;  $\delta$  - толщина зуба.

3°. Однородное основание; плотина с ядром и маловодопроницаемым зубом, доходящим до водоупора (рис. 8).

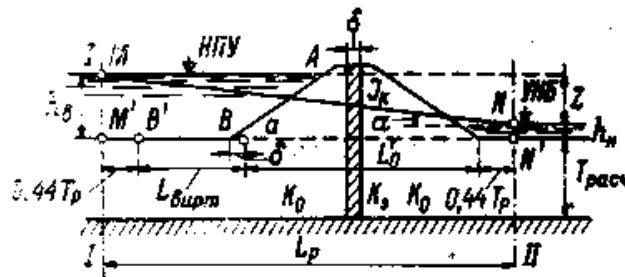


Рис. 8. Плотина с ядром и маловодопроницаемым - зубом, доходящим до водоупора; основание однородное  
 $k_0$  — коэффициент фильтрации грунта основания;  
 $k_3$  — коэффициент фильтрации грунта зуба.

В данном случае, для определения величины  $J_k$  основания, следует грунт зуба привести к грунту основания.

Для этой цели используется первый виртуальный способ, когда вода фильтрует поперек слоев [2].

В данном случае виртуальная длина (толщина) грунта зуба, имеющего коэффициент фильтрации  $k_3$ , приведенная к коэффициенту фильтрации грунта основания  $k_0$ , может быть определена из условия:

$$L_{\text{вир}} = \delta_3 \frac{k_0}{k_3}. \quad (12)$$

Таким образом, расчетная длина основания плотины будет равна (рис. 8):  $L_p = L_0' + L_{\text{вир}} + 0,88T_{\text{расч}}$ .

Величина  $J_k$  для основания плотины будет равна

$$J_k = \frac{Z}{L_0' + L_{\text{вир}} + 0,88T_{\text{расч}}}. \quad (13)$$

По этим данным расчета можно определить величину  $(J_k)_3$  для грунта, образующего зуб (п. 2° в конце).

4°. Однородное основание; плотина имеет понур (рис. 9) В этом случае следует водопроницаемый понур длиной  $l_{\text{п}}$  заме нить абсолютно водонепроницаемым понуром длиной  $l_{\text{п}}^{\circ}$ .

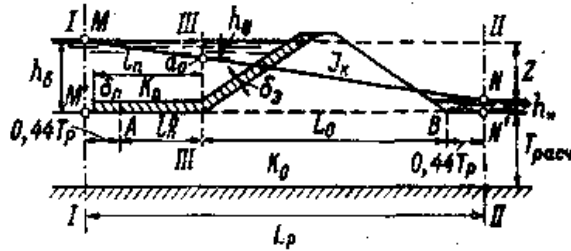


Рис. 9. Плотина с понуром на однородном основании  
 $l$  — длина понура;  $l_n^\circ$  — длина укороченного эквивалентного (водонепроницаемого) понура;  $h_0$  — потеря напора на длине всего основания понура.

Величина  $l_n^\circ$  определяется по графику рис. 10. Под величиной  $T_n$ , указанной на графике, следует понимать величину  $T_{расч} = 0,5 l_n + L_0$ , где  $l_n$  — длина действительного понура;  $L_0$  — ширина плотины по низу: здесь имеется в виду глубина активной зоны фильтрации.

Приведенная толщина заданного понура определяется по зависимости:

$$\delta_{пр} = \delta_n \frac{k_0}{k_n} \quad (14)$$

где  $\delta_n$  — толщина заданного понура;  $k_0$  и  $k_n$  — коэффициенты фильтрации соответственно основания и понура.

Далее, пользуясь способом удлиненной контурной линии, строим пьезометрическую линию для подошвы АВ (рис. 9). Для этого, от точки А на расстоянии  $0,44 T_{расч}$  проводим вертикаль I—I до пересечения с урезом воды верхнего бьефа и на расстоянии  $0,44 T_{расч}$  от точки В вертикаль II—II до пересечения с урезом воды нижнего бьефа. Полученные на пересечениях точки М и N соединяем «прямой депрессии», которая является пьезометрическим уклоном, контролирующим казуальную прочность грунта основания  $J_k$ .

Следовательно, в данном случае величина  $J_k$  будет равна (рис. 9):

$$J_k = \frac{Z}{L_n} = \frac{Z}{L_0 + l_n + 0,88 T_{расч}} \quad (15)$$

Расстояние от уреза НПУ до фиксированной точки  $a_0$  на вертикали III—III, проходящей в примыкании понура к сооружению, равно  $h_0$ , составляет потерю напора на длине всего основания понура.

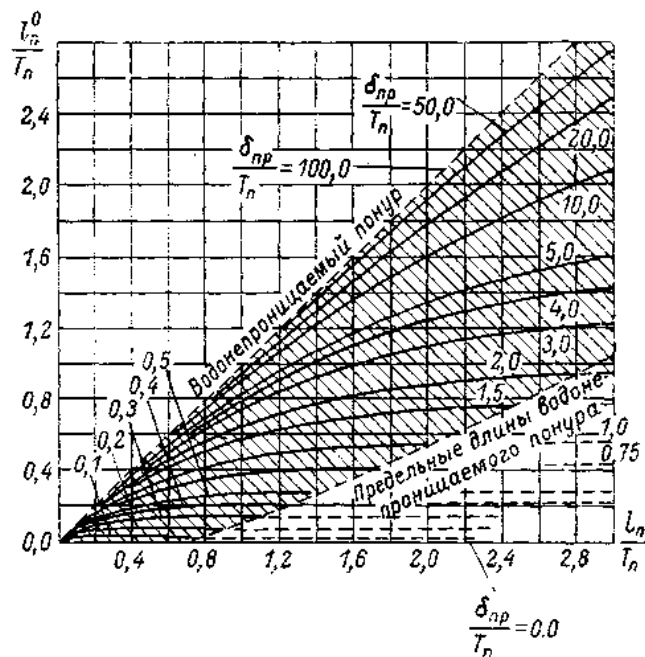


Рис. 10. График Р. Р. Чугаева для определения  $l_n^\circ$  — длины укороченного эквивалентного

(водонепроницаемого) понура

$l_{\text{п}}$  — длина действительного водопроницаемого понура;  $T_{\text{п}}$  — действительное заглубление водоупора под подошвой понура;  $\delta_{\text{пр}}$  — приведенная толщина понура.

Зная величину  $h_0$ , находим максимальный контролирующий градиент напора для грунта понура:

$$J_{\text{к}} = \frac{h_0}{\delta_{\text{п}}}, \quad (16)$$

где  $\delta_{\text{п}}$  — толщина действительного понура.

5°. *Неоднородное основание.* В случае неоднородного основания, образованного горизонтальным напластованием отдельных грунтов, коэффициенты фильтрации которых не сильно разнятся, для оценки казуальной прочности основания рекомендуется придерживаться следующего пути расчета.

Величину контролирующего градиента напора  $J_{\text{к}}$  условно следует определять, как и для однородного грунта.

Однако, величину  $[(J_{\text{к}})_{\text{д}}]_{\text{неоднор.грунта}}$  при этом следует снизить [2], принимая:

$$[(J_{\text{к}})_{\text{д}}]_{\text{неоднор.грунта}} = \alpha [(J_{\text{к}})_{\text{д}}]_{\text{однородн.грунта}}. \quad (17)$$

где  $\alpha$  — коэффициент снижения (меньше единицы), величину которого следует принимать в зависимости от степени неоднородности сопрягающихся мелкозернистых и крупнозернистых грунтов - опасности возникновения суффозионных явлений.

Учитывая вышеизложенное, допускаемый контролирующий градиент напора  $[(J_{\text{к}})_{\text{д}}]_{\text{однородн.грунта}}$  следует принимать по табл.1 для наиболее мелкозернистого состава грунта, слагающего основание с учетом (3.3, п. 4°, а, б и 3.4).

## 2.5. ФИЛЬТРАЦИЯ В ТЕЛЕ ПЛОТИНЫ В ОБХОД ЗУБА (НЕ ЗАВЕРШЕННОГО СВЕРХУ ЯДРОМ ИЛИ ЭКРАНОМ)

Если в основании плотины имеется сильно водопроницаемый подстилающий слой, то последний, как правило, пересекается зубом, выполненным, например, из глинистого материала.

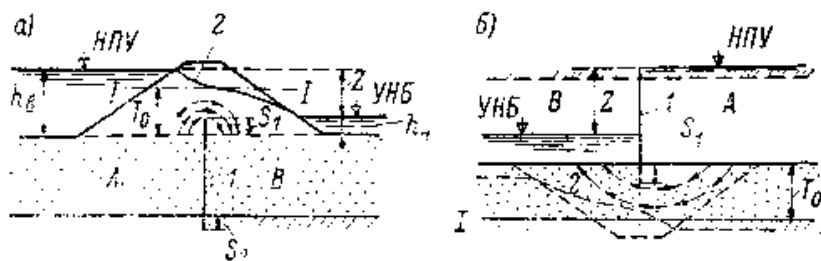


Рис. 11. Плотина с зубом, не завершённым сверху ядром или экраном  
1 — зуб, пересекающий водопроницаемый подстилающий слой грунта основания;  $S_1$  — заглубление в теле плотины; 2 — кривая депрессии.

Опасаясь фильтрации в обход зуба сверху (рис. 11), почти всегда данный зуб наращивают ядром или диафрагмой, доходящей до гребня плотины (рис. 8, п. 3°).

В некоторых случаях зуб, преграждающий водопроницаемое основание, не доводится до гребня плотины, а оставляется на некотором уровне в теле плотины (рис. 11).

В данном случае требуется оценить фильтрационную прочность сопряжения и величину (размер  $S_1$ ) заглубления зуба в тело плотины.

Для решения поставленных вопросов поступают следующим образом.

Пренебрегая потерей напора в слое основания (вследствие большой водопроницаемости этого слоя), принимаем, что в области А имеется напор, соответствующий напору верхнего бьефа, а в области В — напор, соответствующий напору нижнего бьефа.

Далее, примерно на уровне кривой депрессии (над зубом) проводится горизонталь  $I-I$ , считая, что эта горизонталь представляет собой нижнюю поверхность воображаемого водоупора, находящегося выше этой линии.

Затем плотину следует повернуть на  $180^\circ$  гребнем вниз (как показано на рис. 11,б). Таким образом получается, что схему рис. 11, а мы заменили аналогичной расчетной схемой, приведенной на рис. 11,б.

Представленная расчетная схема на рис. 11,б соответствует схеме подземного контура в виде чистого шпунта, достаточно заглубленного в грунт.

В этом случае максимальный выходной градиент  $J_{\text{вых}}$  на поверхность дна нижнего бьефа представляет собой величину, характеризующую весь фильтрационный поток в целом, т. е. основную область фильтрации, которая представляет интерес (исключая острие шпунта) при рассмотрении казуальной фильтрационной прочности основания.

Учитывая изложенное выше, в качестве контролирующего уклона  $J_k$  для чистого шпунта можно принять величину  $J_{\text{вых}}$ , т. е.

$$J_k = J_{\text{вых}}. \quad (18)$$

Величина  $J_{\text{вых}}$  (а следовательно и  $J_k$ ) определяется по следующей формуле [4]:

$$J_k = J_{\text{вых}} = 0,318 \frac{Z}{S_1}. \quad (19)$$

Если вычисленный по формуле (19)  $J_k \leq (J_k)_d$  для данного грунта тела плотины, то это указывает, что размер зуба  $S_1$  назначен правильно.

В противном случае следует изменить величину  $S_1$  которая может быть определена из уравнения (19). В этом случае в уравнение (19) вместо  $J_k$  следует подставить значение  $(J_k)_d$  для данного материала плотины и решить его относительно  $S_1$ .

Величина  $S_2$ , показанная на рис. 11, а, может быть определена по изложенному выше методу.

### **Раздел 3. РАСЧЕТ НОРМАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ГРУНТА ТЕЛА ПЛОТИНЫ И ГРУНТА ОСНОВАНИЯ**

#### **3.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

Фильтрационно-суффозионной прочностью грунта (или земляного сооружения) называют способность грунта сопротивляться возникновению фильтрационных деформаций.

Фильтрационно-суффозионная прочность грунта, которая может быть нарушена в ряде известных наиболее слабых мест поперечного профиля сооружения (плотины) называется местной фильтрационной прочностью.

Фильтрационными деформациями грунта называются такие деформации его твердой фазы, которые вызываются, главным образом, силами гидравлического воздействия и возникают в результате суффозии, кольматажа, контактного размыва, выпора и пр.

Следует различать безопасные фильтрационные деформации, которые с течением времени прекращаются и не грозят целостности сооружения, и опасные фильтрационные деформации в результате которых сооружение может разрушиться.

Безопасные фильтрационные деформации (в виде безопасных суффозии и кольматажа) в большей или в меньшей мере всегда наблюдаются в грунтовом массиве в начальный период его эксплуатации.

Анализ картины фильтрации в земляных и каменно-земляных плотинах и их основаниях (п. 3.2) показывает, что при наличии фильтрации, фильтрационный поток будет взаимодействовать (с различными элементами плотины и может создавать, при соответствующих гидродинамических условиях, соответствующие фильтрационно-суффозионные деформации, указанные в п. 3.2.

Фильтрационно-суффозионная прочность любого элемента плотины (понура, ядра, крепления, дренажа и пр.) зависит, главным образом, от величины действующих градиентов напора (рис. 12) и от фильтрационно-суффозионных свойств (суффозионности, связности, гранулометрического состава и пр.) материала грунта.

Следовательно, чтобы не происходило нарушения фильтрационно-суффозионной прочности и устойчивости любого элемента плотины, а следовательно и сооружения в целом, должно быть выполнено следующее основное условие:

$$J_{\text{фп}} \leq J_{\text{доп}} \quad (20)$$

где  $J_{\text{фп}}$  — градиент напора в области рассматриваемого элемента плотины, или в ее основании (рис. 12);  $J_{\text{доп}}$  — допустимый градиент напора для данного конкретного случая.

При этом  $J_{\text{доп}}$  должен быть меньше  $J_{\text{кр}}$  с учетом коэффициента запаса  $k_{\text{зап}}$ , т. е.

$$J_{\text{доп}} = J_{\text{кр}} \frac{1}{k_{\text{зап}}} \quad (21)$$

Из приведенного выше следует, что нарушение фильтрационно-суффозионной прочности может иметь место в том случае, если не будут соблюдены условия (20) и (21).

Руководствуясь приведенными выше положениями следует в каждом конкретном случае:

а) устанавливать основные виды фильтрационно-суффозионных деформаций, которые могут иметь место в процессе фильтрации в данном сооружении и его конструктивных элементах в данных конкретных условиях;

б) определять их количественные (численные) значения, которые должны являться исходными данными и критериями при оценке материала грунта и при проектировании конструкций и размеров противофильтрационных устройств.

В общем случае должны решаться следующие основные вопросы, как-то:

а) определение геофизических и расчетных характеристик грунтов рассматриваемого земляного сооружения и его основания;

б) определение суффозионности (несуффозионности) рассматриваемых грунтов;

в) определение критических (местных) градиентов суффозии, контактного размыва, выпора, высачивания и т. п.;

г) определение размеров выносимых фильтрационным потоком суффозионных частиц ( $d_{\text{сг}}$ ) грунта и их количества, в зависимости от величины действующих градиентов напора;

д) установление допустимых и расчетных градиентов напора и допустимого процента выноса из рассматриваемого грунта мелких суффозионных частиц, от выноса которых не нарушается прочность и устойчивость элементов и сооружения в целом.

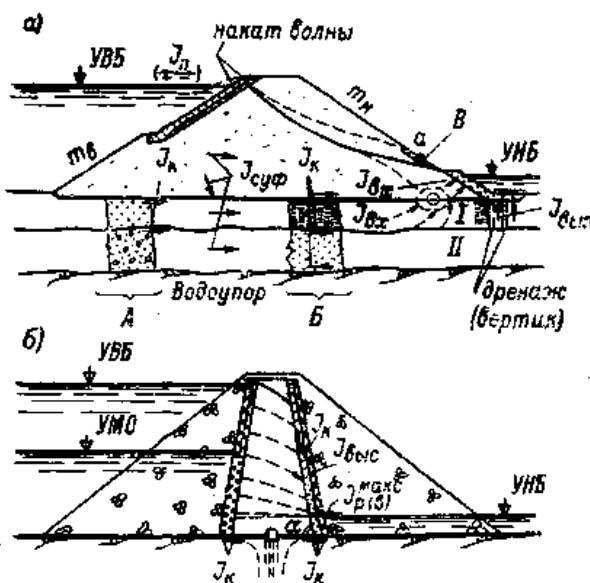


Рис. 12. Возможные фильтрационно-суффозионные деформации в земляных и каменно-земляных плотинах и их основаниях

а — однородная плотина на слоистом основании; б — каменно-земляная плотина на скальном основании;  $J_{\text{суф}}$  — градиент суффозии в теле плотины, в грунтах основания;  $J_{\text{к}}$  — градиент контактного размыва (тело плотины — основание; между слоями основания; скала — грунт основания плотины и пр);  $J_{\text{вып}}$



— градиент выпора грунта;  $J_{\text{вх}}$  — градиент входа фильтрационного потока в дренаж;  $J_{\text{п}}$  — градиент пульсации в фильтровой подготовке (от наката и спада волны);  $B$  — область местного выпора грунта в случае выхода кривой депрессии на откос;  $A, B$  — сопряжение связного и несвязного грунтов основания;  $J_{\frac{\partial \hat{h}}{\partial \hat{a}}}$  — расчетный (максимальный) градиент высачивания на уровне воды нижнего бьефа;  $\alpha$  — угол наклона низового откоса ядра к горизонту.

В тех случаях, когда фильтрационно-суффозионная прочность сооружения или его отдельных конструктивных элементов не обеспечивается, должны быть намечены и осуществлены соответствующие рациональные инженерно-конструктивные мероприятия по упрочнению проектируемого или существующего сооружения или его отдельных элементов с тем, чтобы была обеспечена его надежность и долговечность, как в период ввода в эксплуатацию, так и в процессе его дальнейшей длительной работы.

### 3.2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ЗЕМЛЯНЫХ И КАМЕННО-ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИНАХ

На рис. 12 представлены поперечные разрезы земляной и каменно-земляной плотин, из которых следует, что в зависимости от конструкции плотины и ее элементов, от состава грунта тела плотины, а также от грунта основания и его строения, при воздействии фильтрационного потока на сооружение, могут иметь место (при определенных гидродинамических условиях) соответствующие фильтрационно-суффозионные деформации как в самом теле плотины и ее основании, так и в отдельных конструктивных элементах.

В земляных гидротехнических сооружениях могут иметь место следующие виды фильтрационных деформаций грунта.

1) Суффозия грунта тела плотины и грунта (грунтов) основания, рис. 12,а —  $J_{\text{суф}}$  (см. п. 1.2 — суффозия).

В процессе суффозии (внутренней) может иметь место и кольматаж грунта тела плотины или грунта основания, когда мелкие частицы, движущиеся в порах грунта, будут не проноситься через толщу грунта, а отлагаться в какой-либо области грунтового массива.

Может иметь место суффозия на контактах крупнозернистых и мелкозернистых грунтов — контактная суффозия (см. рис. 12, а,  $J_{\text{суф}}$  — наклонная стрелка).

В этом случае оба примыкающие друг к другу грунта могут быть и несущими. Однако, при наличии определенных соотношений гранулометрических составов и гидродинамических условий, контакт между ними может характеризоваться большими фильтрационными деформациями.

Для установления наличия и определения величины фильтрационно-суффозионных деформаций:

а) следует установить суффозионность грунтов тела и основания плотины, т. е. установить, являются ли данные грунты суффозионными или несущими (см. 3.3, п. 2°);

б) если окажется, что грунты являются суффозионными, то в этом случае следует определить величину критических градиентов суффозии  $J_{\text{кр}}$  и сравнить их с действительными для данного сооружения [с учетом (20), (21) и 3.3, п. 3°], т. е. установить, являются ли в данном случае для сооружения как суффозия, так и фильтрационные деформации опасными или безопасными;

в) решить вопрос о необходимости выполнения, соответствующих инженерных мероприятий по обеспечению фильтрационной прочности сооружения.

2) Контактный размыв грунта тела плотины (ядра) и грунта основания, рис. 12, а, б —  $J_{\text{к}}$ .

В гидротехнических сооружениях и их основаниях могут встречаться контакты между мелкозернистым и крупнозернистым грунтами. Например, грунта тела плотины с грунтом основания, между слоями грунтов основания (рис. 12, а —  $J_{\text{к}}$ ), грунта ядра плотины с грунтом первого слоя фильтра переходной зоны (рис. 12,б —  $J_{\text{к}}$ ).

Необходимо различать следующие виды контактного размыва:

- а) мелкозернистый грунт — крупнозернистый грунт;
- б) глинистый (связный) грунт — крупнозернистый грунт;
- в) мелкозернистый или глинистый (связный) грунт — трещиноватая скала (рис. 12, а,

$\bar{b}$ , см. область А и Б).

Под воздействием фильтрационного потока, идущего в крупнозернистом грунте или в трещиноватой скале основания (рис. 12,б), при соответствующих гидродинамических условиях и крупности зерновых составов, мелкозернистый грунт может подвергаться контактному размыву, в результате которого в контактной зоне могут иметь место фильтрационные деформации, а в некоторых случаях значительные, опасные для прочности и устойчивости сооружения.

В данном случае контактирующие между собой грунты должны быть проверены на возможность контактного размыва с учетом данных гидродинамических условий с тем, чтобы установить величину и размеры возможных деформаций, а также наметить соответствующие мероприятия по их предупреждению (или устранению), если в этом имеется необходимость (см. 3.3, п. 4°).

3) Местный фильтрационный выпор грунта, когда под действием фильтрационных сил может произойти отрыв и перемещение некоторого объема грунта (рис. 12, а —  $J_{\text{вып}}$  или в точке «а»).

Данный вид фильтрационных деформаций может иметь место в практике гидротехнического строительства в том случае, когда плотина расположена на относительно тонком слое глинистого или маловодопроницаемого грунта, а под слоем глинистого или маловодопроницаемого грунта залегает песчаный слой с относительно большей водопроницаемостью, рис. 12, а: слой I — глинистый, слой II — песчаный.

В случае отсутствия дренажа на низовом клине плотины, или в случае, когда дренаж низового клина плотины закольматировался (или засорился при стекании воды по откосу), кривая депрессии может выклиниваться на низовом откосе (рис. 12, а; точка «а»). При этом в зоне «В» под действием фильтрационных сил может произойти местный фильтрационный выпор.

В первом случае, по гидротехническим условиям фильтрационного потока в основании сооружения (с учетом действующих градиентов напора) следует установить возможность (невозможность) таких деформаций и наметить соответствующие мероприятия по их устранению, если в этом есть необходимость.

Во втором случае следует или увеличить пологость откоса или покрыть поверхность откоса водопроницаемой пригрузкой (см. п. 3).

4) Деформации грунта в области дренажа, при входе фильтрационного потока в дренаж, рис. 12, а —  $J_{\text{вх}}$  (пунктиром показан трубчатый дренаж).

В этом случае, при недостаточных размерах призмы трубчатого дренажа и толщины наклонного дренажа, а также сосредоточенных градиентов входа фильтрационного потока в дренаж, а в некоторых случаях от неправильно (или не совсем тщательно) запроектированного (подобранного) первого слоя фильтра, возможен вынос грунта тела плотины и грунта основания в призму дренажа, что может вызвать недопустимую просадку и его заиливание (кольматаж), а в некоторых случаях выход из строя.

В данном случае размер призмы (трубчатого) дренажа, толщина слоя (слоев) наклонного дренажа и гранулометрический состав первого слоя фильтра должны быть запроектированы таким образом, чтобы исключались указанные деформации (см. п. 3.6).

5) Деформации грунта земляных откосов от воздействия волн на откос (рис. 12, а —  $J_{\text{н}}$ ). При накате и спаде волны на откос сооружения, имеющий каменное или железобетонное покрытие, устроенное на фильтровой подготовке, в слое фильтровой подготовки возникает пульсирующая фильтрация, от действия которой может быть нарушена прочность фильтровой подготовки, а следовательно и устойчивость самого откоса.

Во избежание нежелательных последствий, запроектированная (подобранная) фильтровая подготовка должна быть проверена на условие работы при пульсирующей фильтрации, принимая во внимание ее гранулометрический состав грунта и заложение откоса данного сооружения (см. п. 3.7).

6) Деформации грунта понура, экрана, ядра. При проектировании противофильтрационных устройств в целях предотвращения нарушения фильтрационной прочности и недопустимых деформаций грунта понура, экрана, ядра, необходимо учитывать следующие условия:

а) толщина понура, экрана и ядра должна соответствовать гидродинамическим условиям и требованиям, предъявляемым к грунту противофильтрационных устройств;

б) грунт основания под понуром должен быть такого гранулометрического состава, при котором обеспечивалась бы фильтрационная прочность понура, а для экрана и ядра плотины с низовой стороны должен быть подобран и уложен или карьерный грунт или фильтр, гранулометрический состав которых должен обеспечивать фильтрационную прочность и устойчивость экрана и ядра.

Указанные выше условия должны учитываться, согласно п. 3.8.

7) Деформации в зоне сопряжения ядра (экрана) плотины с основанием. В зоне примыкания материала ядра (экрана) к трещиноватой скале основания, бетонной подушке или бетонной пробке (устраиваемой в русле реки) могут иметь место деформации грунта ядра (экрана) вследствие нарушения его фильтрационной прочности: контактной фильтрации, размыва грунта ядра по существующим трещинам скалы основания или трещинам, образующимся в основании в период эксплуатации сооружения.

Контактная зона сопряжения материала ядра с основанием является слабым местом, так как при производстве работ по укладке и уплотнению грунта, особенно в узких каньонах, не всегда достигается требуемая плотность, качественная площадная цементация и пр. Поэтому сопряжению грунта ядра (экрана) плотины с основанием должно уделяться особое внимание, а намечаемые практические мероприятия должны быть эффективными (см. п. 3.9).

### 3.3. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ГРУНТОВ

Фильтрационные деформации грунта, сопровождающиеся нарушением его твердой фазы, вызываются, главным образом, силами гидравлического воздействия, которые и приводят к нарушению его прочности.

Определение их количественных (численных) значений, которые должны являться исходными данными и критериями при оценке материала грунта и при назначении размеров и конструктивных элементов противофильтрационных устройств, рекомендуется определять по методике, изложенной ниже.

1°. *Определение основных геофизических и расчетных характеристик* грунтов. Для определения фильтрационно-суффозионных свойств грунтов проектируемого (или осуществленного) сооружения и его основания должны быть известны их геофизические и расчетные характеристики, в состав которых должны входить:

— гранулометрический состав грунта, с указанием размеров следующих расчетных фракций:  $d_{\text{мин}}$ ,  $d_3$ ,  $d_{10}$ ,  $d_{17}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{100}$ , мм;

- объемный вес грунта  $\gamma_{\text{ск}}$ , г/см<sup>3</sup>;
- удельный вес частиц грунта  $\Delta$ , г/см<sup>3</sup>;
- пористость,  $n$ ;
- коэффициент разнотерности,  $\eta = d_{60}/d_{10}$ ;
- коэффициент фильтрации  $k$ , см/сек.

Для связных грунтов (суглинков и глин) дополнительно:

- содержание глинистых частиц  $d \leq 0,005$  мм, %;
- влажность (естественная),  $W$ ;
- предел текучести,  $W_T$ ;
- предел раскатывания,  $W_p$ ;
- число пластичности,  $W_p$ .

Приведенные выше характеристики грунта сооружения или его основания являются расчетными параметрами для каждого грунта, при определении его фильтрационно-суффозионных свойств (суффозии, критических градиентов суффозии, контактного размыва и пр.), должны быть обобщающими и наилучшим образом характеризовать рассматриваемый состав грунта.

2°. *Определение суффозионности (несуффозионности) грунтов и процента выноса суффозионных частиц* \*. Для решения вопроса, является ли данный грунт суффозионным или несуффозионным, рекомендуется следующий метод расчета.

а) По заданным параметрам (п. 3.3, 1°) исследуемого грунта определяется диаметр максимальных фильтрационных пор в грунте  $d_0^{\text{изв}}$  по следующей зависимости М. П. Павчича [6]:

$$d_0^{\text{макс}} = 0,455 \chi \sqrt[n]{\eta} \frac{n}{1-n} d_{17}, \quad (22)$$

где  $\chi$  — коэффициент неравномерности раскладки частиц в грунте или коэффициент локальности суффозии:

$$\chi = 1 + 0,05 r, \quad (23)$$

\* Оценка грунта по геометрическим критериям (без учета гидродинамики фильтрационного потока, которую следует учитывать в каждом конкретном случае работы сооружения).

$\eta = \frac{d_{60}}{d_{10}}$  — коэффициент разнородности грунта;  $n$  — пористость (в долях единицы);  $d_{17}$  — диаметр частиц, которых содержится в грунте 17% и меньше (по весу).

б) Максимальный размер частиц, которые могут быть вынесены фильтрационным потоком из данного грунта (при определенных гидродинамических условиях), определяется следующей зависимостью:

$$d_{ci}^{\text{макс}} = 0,77 d_0^{\text{макс}}. \quad (24)$$

Если окажется, что найденный по зависимости (24) максимальный размер суффозионных частиц  $d_{ci}^{\text{макс}}$  меньше минимального размера частиц грунта  $d_{\text{мин}}$ , т. е.

$$d_{ci}^{\text{макс}} < d_{\text{мин}}, \quad (25)$$

то такой грунт следует считать несуффозионным, так как из такого грунта не могут выноситься и самые мелкие его частицы.

Если окажется, что

$$d_{ci}^{\text{макс}} > d_{\text{мин}}, \quad (26)$$

то такой грунт следует считать суффозионным. Из такого грунта могут быть вынесены все частицы, крупность которых меньше, или равна  $d_{ci}^{\text{макс}}$ , если скорость фильтрации (градиент напора) будет больше критической  $v_{\text{кр}}(J_{\text{к}})$ .

в) Практика показывает, что если из грунта будут вынесены самые мелкие незащемленные его частицы в количестве не более 3—5% по весу, то прочность грунта не нарушится.

Следовательно, если  $d_{ci}^{\text{макс}} < 3\%$  (5%) по весу, то такой грунт следует считать практически несуффозионным.

г) Связные (глинистые) грунты, обладающие молекулярным сцеплением между отдельными частицами и их агрегатами, имеющие число пластичности  $W_p \geq 5$ , являются несуффозионными.

д) Определение максимального возможного процента (%) выноса суффозионных частиц из суффозионного грунта по геометрическому критерию (без учета гидродинамических условий) производится следующим образом.

Вычисленный по зависимости (24) максимальный размер суффозионных частиц  $d_{ci}^{\text{макс}}$  находим по графику кривой гранулометрического состава грунта искомый и определяем максимальный процент выноса (на оси ординат).

е) Если два несуффозионных грунта (п. 3.2, 1) — мелкозернистый и крупнозернистый — контактируются между собой (рис. 12, а;  $J_{\text{суф}}$  — наклонная стрелка), то в таких случаях фильтрационных деформаций наблюдаться не будет, если эти два примыкающие друг к другу грунта по гранулометрическим составам будут удовлетворять следующему условию:

$$\frac{D_0}{d_s} \leq 5,4, \quad (27)$$

где  $D_0$  — средний размер диаметра фильтрационных пор крупнозернистого грунта

$$D_0 = 0,455 \sqrt[6]{\frac{n}{\gamma_r}} \frac{n}{1-n} D_{17}; \quad (28)$$

буквенные обозначения те же, что и в зависимости (22);  $d_3$  — размер частиц, содержащихся в мелкозернистом грунте 3% и меньше по весу.

Если условие (27) не удовлетворяется, то в таком случае может иметь место контактная суффозия.

Для предотвращения контактной суффозии — фильтрационных деформаций — проектом должны быть предусмотрены соответствующие мероприятия (например, укладка на контакте переходного слоя грунта), обеспечивающие ее фильтрационную прочность.

3°. *Определение критических градиентов и скоростей суффозии.* В суффозионных песчано-гравийно-галечниковых (или щебеночных) грунтах будет развиваться механическая суффозия в том случае, если градиент напора или скорость фильтрации в нем будут больше критических, т. е.  $J > J_{кр}$  или  $v > v_{кр}$ .

В таких случаях из толщи грунта (незащищенного фильтром) могут быть вынесены, при определенных гидродинамических условиях, все его суффозионные частицы  $d_{ci}$  (от  $d_{ci}^{i\hat{a}e\hat{n}}$  и меньше).

Однако надо иметь в виду, что в земляных сооружениях (плотинах, перемычках и пр.), выполненных из суффозионного грунта и на основании из суффозионных грунтов, могут иметь место такие гидродинамические условия фильтрационного потока, при которых из данных суффозионных грунтов не будут выноситься даже самые мелкие его суффозионные частицы, потому что в сооружении и его основании для их выноса нет по величине градиентов напора (общих и местных) больше критических.

В таких случаях следует считать, что данные грунты по геометрическому критерию являются хотя и суффозионными, однако для данных конкретных гидродинамических условий они являются практически суффозионнопрочными, в которых не будут развиваться опасные суффозионные процессы и суффозионные деформации.

Следовательно, для того, чтобы установить степень фильтрационно-суффозионной прочности грунта (грунта сооружения или грунта основания) необходимо знать:

а) гидродинамику фильтрационного потока, который будет воздействовать на рассматриваемый грунт;

б) критические скорости или градиенты выноса, величина которых зависит, главным образом, от размера (крупности) выносимых суффозионных частиц  $d_{ci}$  (а также от коэффициента фильтрации грунта, пористости, от характера расположения суффозионных частиц в порах грунта и пр.).

Гидродинамика фильтрационного потока определяется или фильтрационными расчетами или методом ЭГДА, а определение критических скоростей или критических градиентов напора для анализируемого суффозионного грунта производится по формулам, приведенным ниже.

Критический градиент напора ( $J_{кр}$ ) по отношению механической суффозии, при котором могут выноситься суффозионные частицы  $d_{ci}$  толщи грунта, начиная от  $d_{ci}^{i\hat{a}e\hat{n}}$  и меньше, определяется по следующей зависимости А. Н. Патрашева [6]:

$$J_{кр} = \varphi_0 d_{ci} \sqrt{\frac{n_r g}{v k_\phi}}; \quad (29)$$

где

$$\varphi_0 = 0,60 \left( \frac{\gamma_r}{\gamma_b} - 1 \right) f_* \sin \left( 30^\circ + \frac{\theta}{8} \right); \quad (30)$$

$$f_* = 0,82 - 1,8n_r + 0,0062 (\eta_r - 5); \quad (31)$$

$d_{ci}$  — диаметр суффозионных частиц, начиная от  $d_{ci}^{i\hat{a}e\hat{n}}$  и меньше, см;  $n_r$  — пористость грунта (в долях единицы);  $g$  — ускорения силы тяжести ( $g = 981$  см/сек<sup>2</sup>);  $\gamma_r$  — объемный вес скелета грунта, г/см<sup>3</sup>,  $\gamma_b \approx 1$  г/см<sup>3</sup> — объемный вес воды;  $v$  — коэффициент кинематической вязкости воды, см<sup>2</sup>/сек;  $\theta$  — угол между направлениями скорости фильтрации и силы тяжести;  $\eta_{\bar{a}} = \frac{d_{60}}{d_{10}}$  — коэффициент

разнозернистости грунта;  $k_{\phi}$  — коэффициент фильтрации грунта, см/сек.

Если коэффициент фильтрации грунта  $k_{\phi}$  неизвестен, то в таком случае он может быть определен по экспериментальной зависимости М. П. Павича:

$$k_{\phi} = \frac{4\varphi_1}{\sqrt{v}} \sqrt{\gamma_r} \cdot \frac{n_r^3}{(1 - n_r)^2} d_{17}^2, \text{ см/сек,} \quad (32)$$

где  $\varphi_1$  — коэффициент, учитывающий форму и шероховатость частиц грунта; по данным Г.Х.Праведного, рекомендуется:  $\varphi_1 = 1$  для песчано-гравийно-галечниковых грунтов;  $\varphi_1 = 0,35—0,40$  для щебеночных грунтов;  $d_{17}$  — диаметр частиц грунта, меньше которых в его составе содержится 17% по весу, см.

Подставляя в формулу (29) разные значения  $d_{ci}$  и другие параметры анализируемого грунта, представляется возможным определить величину критического градиента выноса ( $J_{кр}$ ) для каждого заданного размера суффозионных частиц диаметром  $d_{ci} \leq d_{ci}^{i\ddot{a}e\ddot{n}}$ , а также величину процента выноса этих частиц (3.3. п. 2°, д), для которых определено значение  $J_{кр}$ , что позволяет оценить степень суффозионности и фильтрационную прочность данного грунта.

Чтобы не возникало механической суффозии и нарушения прочности грунта должно быть соблюдено условие (20), т. е. действующий градиент напора в грунте  $J_d$  должен быть меньше критического градиента суффозии  $J_{кр}$  для данного грунта ( $J_d < J_{кр}$ ).

Критическая скорость суффозии. Для определения критической скорости суффозии, при которой нарушается предельное равновесие суффозионных частиц  $d_{ci}$  в грунте, следует пользоваться формулой А. Н. Патрашева [6]:

$$v_{кр} = \varphi_0 d_{ci} \sqrt{\frac{n_r g}{v} k_{\phi}}, \quad (33)$$

где буквенные обозначения те же, что и в формуле (29).

4°. *Определение критических градиентов и скоростей контактного размыва несвязных и связных (глинистых) грунтов.* Как указывалось в (3.2, п. 2) в гидротехнических сооружениях могут встречаться контакты между мелкозернистым и крупнозернистым грунтами (рис. 12, б)

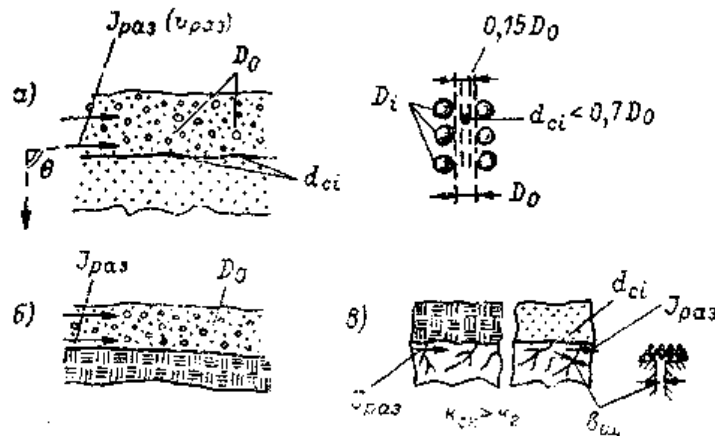


Рис.13. Контактный размыв грунта

*а* - крупнозернистый грунт — мелкозернистый грунт; *б* — крупнозернистый грунт — глинистый грунт; *в* — трещиноватая скала — глинистый или мелкозернистый грунт;  $\theta$  — угол между направлениями скорости фильтрации и силы тяжести;  $D_0$ —средний диаметр фильтрационных пор крупнозернистого грунта;  $d_{ci}$  — диаметр (суффозионных) частиц мелкозернистого грунта, которые могут быть вынесены фильтрационным потоком при контактном размыве (при  $J > J_{раз}$ ).

На рис. 13 представлены виды контактов, которые могут иметь место в гидротехнических сооружениях и их основаниях.

Контактирующие между собой грунты должны быть проверены на условие возможного размыва мелкозернистого (или связного) грунта фильтрационным потоком, идущим в крупнозер-

нистом грунте или трещиноватой скале основания ( $k_{ск} > k_{г}$ ).

Для этой цели сначала следует определить критический градиент контактного размыва  $J_{раз}$  мелкозернистого (или связного) грунта, величина которого зависит, главным образом, от соотношения крупности фракций зерновых составов контактирующихся грунтов.

Затем полученное значение (величину)  $J_{раз}$  следует сравнить с конкретными гидродинамическими условиями фильтрационного потока в данном сооружении или его элементе (например, в первом слое переходной зоны ядра плотины, или в основании сооружения), чтобы установить наличие или отсутствие размыва контактной зоны и фильтрационных деформаций.

Определение величины  $J_{раз}$  для несвязных и связных (глинистых) грунтов, в зависимости от крупности их зерновых составов приводится ниже.

а) Определение критических градиентов (скоростей) контактного размыва несвязных грунтов.

Если между собой контактируются два разнородных несвязных грунта (или грунт с трещиноватой скалой), критический градиент размыва мелкозернистого грунта и размер выносимых его частиц диаметром  $d_{ci} \geq 3\%$ \* определяется по экспериментальной зависимости Г. Х. Праведного:

$$J_{раз} = \frac{1}{\sqrt{\varphi_1}} \left( 2,3 + 15 \frac{d_{ci}}{D_0} \right) \frac{d_{ci}}{D_0} \sin \left( 30^\circ + \frac{\theta}{8} \right), \quad (34)$$

причем отношение  $\frac{d_{ci}}{D_0} < 0,7$ , рис. 13, а; при отношении  $\frac{d_{ci}}{D_0} \geq 0,7$  размыва и выноса фракций мелкозернистого грунта быть не может;  $\varphi_1$ ,  $d_{ci}$  и  $\theta$  — обозначения те же, что в формулах (30) и (32).

Средний диаметр фильтрационных пор крупнозернистого грунта  $D_0$  определяется по зависимости (28).

При определении критического градиента размыва мелкозернистого грунта на контакте с трещиноватой скалой (рис. 13, в), в этом случае можно пользоваться зависимостью (34); только вместо  $D_0$  в данную зависимость (34) следует подставить значение (преобладающего размера) ширины трещин в скале  $b_{щ}$  и  $\varphi_1 = 0,35—0,40$ .

Формула (34) справедлива в том случае, если число Рейнольдса  $Re$ , отнесенное к среднему диаметру фильтрационного хода в крупнозернистом грунте  $D_0$ :

$$Re = \frac{k_{ф} J_{раз} D_0}{\nu} \leq 20, \quad (35)$$

где  $k_{ф}$  — коэффициент фильтрации крупнозернистого грунта, определяется по зависимости (32), или  $k_{ск}$  — коэффициент фильтрации скалы;  $D_0$  — определяется по зависимости (28);  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости воды.

\* При выносе мелких незащемленных частиц  $d_{ci} \leq 3\%$  прочность грунта не нарушается; поэтому величину критического градиента размыва  $J_{раз}$  следует определять при выносе мелких фракций, размер которых  $d_{ci} \geq 3\%$ , т. е.  $d_{ci} \geq d_{3\%}$ .

Примечание. При  $Re > 20$  формулой (34) можно пользоваться лишь для ориентировочных расчетов или  $J_{раз}$  следует определять опытным путем.

Критическая размывающая скорость  $v_{раз}$  на контакте: мелкозернистый грунт — крупнозернистый грунт (или трещиноватая скала) может быть определена по зависимости:

$$v_{раз} = k_{ф} J_{раз}, \quad (36)$$

где  $k_{ф}$  — то же, что и в зависимости (35);  $J_{раз}$  — принимается по зависимости (34).

б) Определение критических градиентов контактного размыва связных (глинистых) грунтов

В тех случаях, когда могут встречаться контакты между связным (глинистым) грунтом и крупнозернистым материалом (рис. 13, б, в) или с трещиноватой скалой, связной грунт может подвергаться размыву.

Значение критического градиента размыва  $J_{кр}$  при контактной фильтрации: связной (глинистый) грунт с числом пластичности  $W_p \geq 5$ , крупнозернистый грунт (или трещиноватая скала), может быть определено по экспериментальной зависимости Г. Х. Праведного:

$$J_{кр} = \frac{1}{D_0^{i\hat{a}e\hat{n}}_{\max}} - 0,75, \quad (37)$$

где  $D_0^{i\hat{a}e\hat{n}}$  — в см — определяется по зависимости (22) для крупнозернистого грунта, причем  $D_0^{i\hat{a}e\hat{n}} \leq 1,8$  см (при  $D_0^{i\hat{a}e\hat{n}} > 1,8$  см будет происходить отслаивание связного грунта в порах крупнозернистого материала и размыв контакта, при  $J > 0$ ).

Данная зависимость (37) может быть использована для определения  $J_{кр}$  на контакте: связной грунт — трещиноватая скала (рис. 13, в). В этом случае вместо  $D_0^{i\hat{a}e\hat{n}}$  в зависимость (37) следует подставлять максимальное значение ширины трещин в см.

### 3.4. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К РАСЧЕТАМ ФИЛЬТРАЦИОННО-СУФФОЗИОННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ГРУНТОВ (по 3.3. п. 2°, 3°, 4°)

На основании выполненных расчетов (3.3, п. 2°, 3°, 4°), для наглядности, результаты расчетов для каждого проанализированного грунта могут быть представлены в виде табл. 3, из которой видно: размеры диаметров суффозионных частиц от  $d_{ci}^{i\hat{a}e\hat{n}}$  до  $d_{ci} = 3\%$ , критические градиенты выноса (или размыва), соответствующие данной крупности суффозионных частиц, и процент выноса их.

Таким образом представляется возможным установить пределы местных критических градиентов напора механической суффозии  $J_{кр}$  и контактного размыва  $J_{раз}$ , при которых вынос мелких фракций должен быть  $d_{ci} \leq 3\%$ , так как в зависимости от этого значения должны быть установлены для данного грунта допускаемые градиенты суффозии или контактного размыва (с учетом коэффициента запаса), т. е. должны быть выполнены условия (20) и (21):

$$J_{фп} \leq J_{доп} = \frac{1}{k_{зап}} J_{кр}$$

где  $J_{фп}$  - градиент напора в области рассматриваемого элемента плотины или ее основании, при котором обеспечивается фильтрационная прочность грунта;  $k_{зап}$  - коэффициент запаса (который устанавливается в зависимости от категории сооружения по капитальности, опасности возникновения суффозии и пр. условий).

Таблица 3

$d_{ci}$ , мм	$J_{кр}$ ( $J_p$ )	% выноса	Примечание
$d_{ci}^{i\hat{a}e\hat{n}}$ .....	.....	.....	
.....	.....	.....	
.....	.....	.....	
$d_{ci}$ .....	.....	3%	

Данным методом можно пользоваться при определении допускаемого контролирующего градиента напора ( $J_{кр}$ )<sub>доп</sub> в случае неоднородного основания сооружения, образованного горизонтальным напластованием отдельных грунтов (см. 2.4 п.



5°).

В результате выполненных расчетов по методу, указанному в (3.3, п. 2°, 3°, 4°), определяется  $J_{\text{доп}}$  для каждого слоя грунта, слагающего основание, и по наименьшему значению  $J_{\text{доп}}$ , как наиболее опасному в отношении суффозии (внутренней и на контактах) с учетом табл. 1, принимается соответствующее значение ( $J_{\text{к}})_{\text{доп}}$ .

### 3.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗРУШАЮЩИХ ГРАДИЕНТОВ ВЫПОРА ГРУНТА И МЕРЫ БОРЬБЫ С МЕСТНЫМ ФИЛЬТРАЦИОННЫМ ВЫПОРОМ

1°. Расчетные формулы для решения задач, связанных с выпором грунта. а) В восходящем фильтрационном потоке, под действием взвешивающих и фильтрационных сил может происходить Фильтрационный выпор грунта (отрыв и перемещение некоторого объема грунта), т. е. если в какой-либо области вертикальные составляющие гидродинамических сил превысят критические значения и не будут уравновешены силами, препятствующими выпору, то в этом случае может произойти выпор грунта.

Силами, препятствующими выпору, является вес грунта основания и вес пригрузки (дренажа).

Следовательно, основной мерой борьбы с выпором грунта является пригрузка его слоем дренажного материала \*.

б) В работе [3] Р. Р. Чугаевым в общем виде рассматривается выпор грунта восходящим фильтрационным потоком при наличии пригрузки по схеме, приведенной на рис. 14, где слой  $t$  подвержен действию направленных вверх фильтрационных сил  $f_{\phi}$ . Чтобы не допустить выпора грунта  $ab\gamma$  фильтрационными силами, данный грунт должен быть пригружен слоем дренажного грунта, толщиной  $T$ .

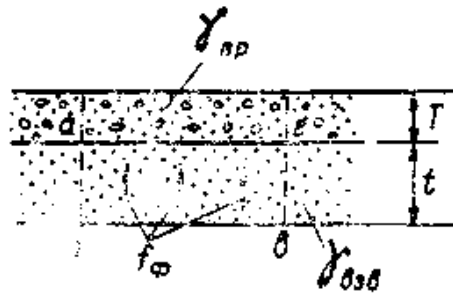


Рис. 14. Схема выпора грунта

$T$  - толщина слоя пригрузки;  $t$  - толщина слоя грунта, подверженного

В соответствии с указанным проф. Р.Р.Чугаевым было предложено для решения вопросов выпора грунта следующее уравнение [3]:

$$T\gamma_{\text{взв}} + t\gamma_{\text{взв}} = k_{\text{зап}} t f_{\phi} \quad (38)$$

где  $\gamma_{\text{взв}}$  — объемный вес взвешенного грунта;  $\gamma_{\text{пр}}$  — объемный вес материала пригрузки (в сухом или во взвешенном состоянии);  $k_{\text{зап}}$  — коэффициент запаса;  $t$  — толщина слоя грунта, подверженного выпору;  $f_{\phi}$  — удельная фильтрационная сила, приложенная к единице объема грунта, величина которой (согласно К. Терцаги) равна:

$$f_{\phi} = \gamma_{\text{в}} J \quad (39)$$

где  $\gamma_{\text{в}}$  — объемный вес воды;  $J$  — пьезометрический уклон (градиент напора).

Объемный вес грунта, взвешенного в воде  $\gamma_{\text{взв}}$ :

$$\gamma_{\text{взв}} = \gamma_{\text{ск}} - (1 - n) \gamma_{\text{в}} \quad (40)$$

где  $\gamma_{\text{ск}}$  — объемный вес скелета (сухого) грунта;  $n$  — пористость в долях единицы.

Из приведенного уравнения (38) представляется возможным определить:

к р и т и ч е с к и й градиент выпора грунта при отсутствии пригрузки;

в ы х о д н о й градиент напора при наличии пригрузки;

толщину слоя пригрузки в зависимости от величины выходного градиента напора  $J_{\text{вых}}$ .

в) Величина критического градиента выпора  $J_{\text{крит}}^{\text{в}}$  может быть получена из уравнения (38) в случае отсутствия пригрузки, т. е. при  $T = 0$  и  $k_{\text{зап}} = 1$ .

При заданных условиях вместо (38) будем иметь  $\gamma_{\text{взв}} = f_{\text{ф}}$  или  $\gamma_{\text{взв}} = \gamma_{\text{в}} J_{\text{крит}}^{\text{в}}$ . Подставляя значения  $f_{\text{ф}}$  и  $\gamma_{\text{взв}}$  из (39) и (40) и  $\gamma_{\text{ск}} = \Delta(1-n)$ , после несложных преобразований, получим формулу для определения величины критического градиента выпора  $J_{\text{крит}}^{\text{в}}$  в слое грунта, подверженного выпору, при отсутствии пригрузки в месте выхода фильтрационного потока:

$$J_{\text{крит}}^{\text{в}} = \left( \frac{\Delta}{\gamma_{\text{в}}} - 1 \right) (1 - n), \quad (41)$$

\* Могут иметь место и конструктивные мероприятия, как например: разгрузочный дренаж, уположение откоса, в случае выхода кривой депрессии на его поверхность (см. ниже). где  $\Delta$  — удельный вес частиц грунта;  $\gamma_{\text{в}}$  — объемный вес воды;  $n$  — пористость грунта в долях единицы.

Данной формуле (41) соответствуют формула К. Терцаги, а также Е. А. Замарина \*

$$J_{\text{крит}}^{\text{в}} = \left( \frac{\Delta}{\gamma_{\text{в}}} - 1 \right) (1 - n) + 0,5n, \text{ но без последнего члена.}$$

При определении  $J_{\text{крит}}^{\text{в}}$  для мелкозернистых песчаных грунтов, имеющих средний размер частиц  $d_{50} = 0,07—0,20$  мм, в формулу (41), как показали эксперименты, следует ввести поправочный коэффициент  $\alpha$ :

$$J_{\text{крит}}^{\text{в}} = \left( \frac{\Delta}{\gamma_{\text{в}}} - 1 \right) (1 - n) \alpha, \quad (41')$$

где  $\alpha = 0,90—0,95$ .

г) Для определения величины выходного градиента напора  $J_{\text{вых}}$  при наличии пригрузки толщиной слоя  $T$ , расчетная зависимость может быть получена из уравнения (38).

Принимая  $k_{\text{зап}} = 1$ , а также учитывая, что  $\frac{\gamma_{\text{акв}}}{\gamma_{\text{в}}} = J_{\text{крит}}^{\text{в}}$  и решая уравнение (38) относительно

$J_{\text{вых}}$ , получим:

$$J_{\text{вых}} = \frac{T}{t} \frac{\gamma_{\text{пр}}}{\gamma_{\text{в}}} + J_{\text{крит}}^{\text{в}}, \quad (42)$$

где буквенные обозначения те же, что в уравнении (38).

Из приведенной зависимости (42) следует, что необходимость в пригрузке грунта основания в месте выхода фильтрационного потока требуется в том случае, когда  $J_{\text{вых}} > J_{\text{крит}}^{\text{в}}$ , где  $J_{\text{крит}}^{\text{в}}$  — критический градиент выпора для данного грунта основания, значение которого определяется по зависимости (41) или (41').

д) Толщина слоя пригрузки  $T$ , с учетом коэффициента запаса  $k_{\text{зап}}$ , может быть определена из зависимости (42):

$$T = t \left( J_{\text{вых}} - J_{\text{крит}}^{\text{в}} \right) \frac{\gamma_{\text{в}}}{\gamma_{\text{пр}}} k_{\text{зап}}, \quad (43)$$

где коэффициент запаса рекомендуется принимать  $k_{\text{зап}} = 1,2—1,5$ .

Зависимости (38) — (43) могут быть использованы для решения задач, связанных:

а) с определением длины подземного контура плотин;

б) с определением критических градиентов выпора для грунтов основания и тела плотины;  
 в) с определением толщины пригрузки (при  $J_{\text{вых}} > J_{\text{ед}}^a$ ) для области грунта, подверженного выпору и пр.

Ниже предлагаются методы решения этих задач, применительно к гидротехническим сооружениям.

\* Замарин Е. А. Движение грунтовых вод под гидротехническими сооружениями, изд. ВНИИХИ, 1931, 112 с. с илл.

2°. Меры борьбы с местным фильтрационным выпором.

### а) Выпор грунта при выходе фильтрационного потока в нижний бьеф (рис. 15 и 16)

Выпор грунта может появиться за пределами подземного контура сооружения, при выходе фильтрационного потока в нижний бьеф, где должен располагаться дренаж, выполняющий одновременно и роль пригрузки грунта основания (рис. 15).

Проверку грунта на выпор в области нижнего бьефа следует выполнять при условии, если максимальный выходной градиент напора в нижнем бьефе  $J_{\text{вых}} > 0,60—0,70$  [2].

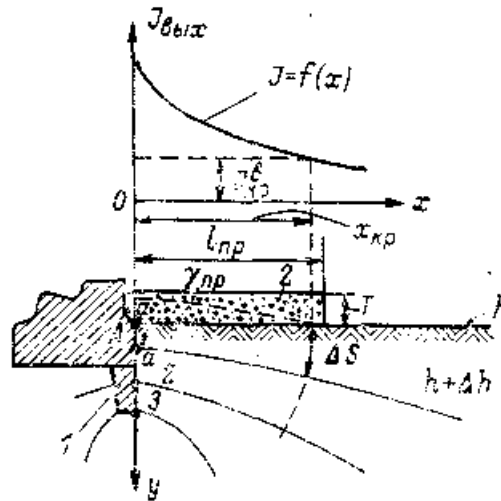


Рис. 15. К определению толщины пригрузки  $T$

1 — выходной фрагмент подземного контура сооружения; 2 — пригрузка;  $h$  и  $h + \Delta h$  — линии равных напоров; „ $y$ ” — расчетная вертикаль для построения эпюры градиентов  $J_y = f(y)$ ;

$J_{\text{вых}} = f(x)$  — эпюра выходных градиентов;  $J_{\text{ед}}^a$  — критический градиент выпора для грунта основания (при отсутствии пригрузки);  $l_{\text{пр}}$  — длина пригрузки

При максимальном значении выходного градиента напора в нижнем бьефе:

$$J_{\text{вых}}^{\text{макс}} \geq J_{\text{кр}}^b \quad (44)$$

где  $J_{\text{ед}}^a$  критический градиент выпора для данного грунта основания, величина которого определяется по зависимости (41) или (41'), следует предусматривать соответствующие мероприятия по предотвращению этого нежелательного явления.

При исследовании фильтрации (например, методом ЭГДА) в теле и основании земляной или бетонной плотины строится эпюра выходных градиентов напора, как показано на рис. 15 и 16.

В целях выявления максимальных значений выходных градиентов напора, эпюры

выходных градиентов следует строить для области грунта основания, прилегающей возможно ближе к линии поверхности дна нижнего бьефа.

Эпюры выходных градиентов дают возможность оценить прочность и устойчивость основания сооружения.

### 1. Определение толщины и длины пригрузки

На рис. 15 приведен выходной фрагмент подземного контура сооружения с линиями равных напоров и эпюрой выходных градиентов  $J_{\text{вых}} = f(x)$  ■

На рис. 16 приведены: а) низовой клин земляной плотины с дренажной призмой, линиями равных напоров и эпюрой выходных градиентов; б) низовой клин земляной плотины с наклонным дренажом и отводящей канавой.

Для решения вопроса о толщине пригрузки в области выхода фильтрационного потока в нижний бьеф, где возможен выпор грунта (при  $J_{\text{вых}} > J_{\text{до}}^a$ ) необходимо иметь гидродинамическую сетку фильтрации, при выходе фильтрационного потока в нижний бьеф, и эпюру выходных градиентов  $J_{\text{вых}} = f(x)$ , как показано на рис. 15.

На выходном фрагменте подземного контура сооружения, через его конечную точку проводится расчетная вертикаль «у» (рис. 15). На этой расчетной вертикали строится эпюра рас-

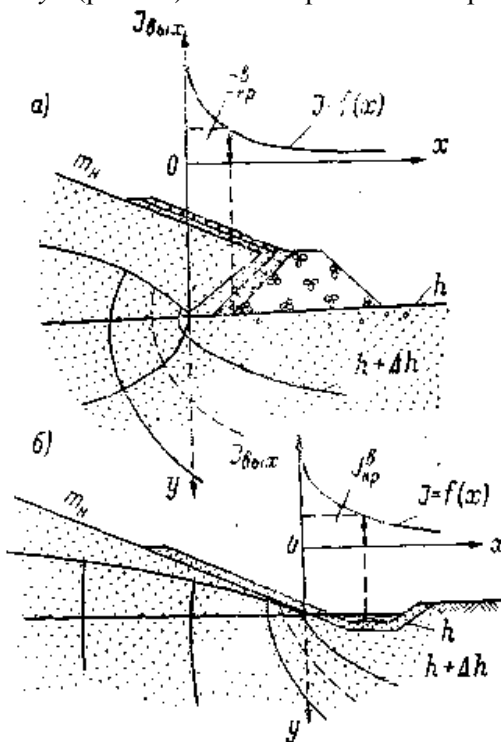


Рис 16. К определению выпора грунта

а - низовой клин земляной плотины с дренажной призмой с показанием линий равных напоров и эпюры выходных градиентов; б — то же с наклонным дренажом и отводящей дренажной канавой

предела градиентов в точках пересечения расчетной вертикали «у» с линиями равных напоров (1,2,3....).

На рис.17 представлена эпюра  $J_y = f(y)$ , полученная на расчетной вертикали «у», где по вертикальной «оси» «у» отложены расстояния от поверхности нижнего бьефа (от точки А)  $y_1, y_2$  и  $y_3$ , соответствующие заглублениям точек 1, 2 и 3 (рис. 15), а по оси  $J_y$  соответствующие этим точкам 1, 2 и 3 градиенты напора  $J_{y1}, J_{y2}$  и  $J_{y3}$ , полученные как соотношения  $J_{\text{от}} = \frac{\Delta h}{y_1}$ .

В результате получаем на расчетной вертикали «у» эпюру распределения градиентов

напора  $J_y = f(y)$ .

Затем по зависимости (41) или (41') определяется величина критического градиента выпора  $J_{\text{ед}}^{\text{а}}$  для данного конкретного грунта основания.

По полученному значению  $J_{\text{ед}}^{\text{а}}$  и эпюре градиентов  $J_y = f(y)$ , рис. 17, определяется толщина слоя  $t$ , соответствующая критической глубине зоны выпора  $y_{\text{ед}}^{\text{а}}$  где градиент напора равен  $J_{\text{ед}}^{\text{а}}$ .

Зная величину  $t$ , по формуле (43) определяется толщина слоя пригрузки

$$T = t \left( J_{\text{вых}} - J_{\text{кр}}^{\text{в}} \right) \frac{\gamma_{\text{в}}}{\gamma_{\text{пр}}} k_{\text{зап}},$$

где  $\gamma_{\text{пр}}$  — объемный вес пригрузки может быть в сухом или во взвешенном состоянии (в некоторых случаях бетонные плиты);  $k_{\text{зап}} = 1,2—1,5$ .

Длина пригрузки  $l_{\text{пр}}$  (рис. 15) может быть определена по эпюре выходных градиентов напора  $J_{\text{вых}} = f(x)$ .

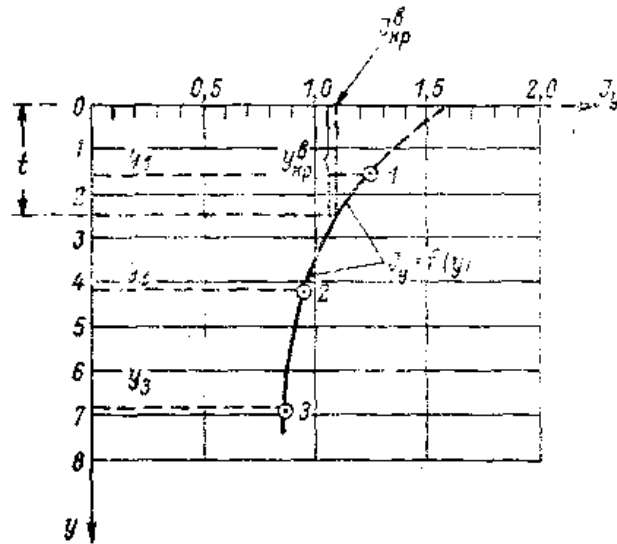


Рис. 17. Эпюра  $J_y = f(y)$  на расчетной вертикали „у“ (для определения толщины слоя  $t$ , соответствующего глубине зоны выпора)

1, 2, 3 — точки пересечения расчетной вертикали „у“ с линиями равных напоров (рис. 15);  $y_1, y_2, y_3$  — соответствующие заглубления точек 1, 2, 3 — от поверхности нижнего бьефа.

Зная величину  $J_{\text{ед}}^{\text{а}}$ , значение которого, как указывалось выше, определяется по зависимости (41) или (41') для данного грунта основания, на эпюре  $J_{\text{вых}} = f(x)$  откладывается его значение и определяется в масштабе  $x_{\text{кр}}$  по оси «х».

Длина пригрузки от водонепроницаемой части выходного фрагмента сооружения в направлении оси «х» с учетом коэффициента запаса ( $k_{\text{зап}}$ ) будет:

$$l_{\text{пр}} = k_{\text{зап}} x_{\text{кр}}. \quad (45)$$

Следует отметить, что в зависимости от состава грунта основания, гранулометрический состав пригрузки в зоне контакта с грунтом основания должен быть подобран по принципу обратного фильтра (рис. 15):

а) Для защищаемого связного (глинистого) грунта основания с числом пластичности  $W_{\text{п}} \geq 3—5$ , гранулометрический состав материала пригрузки (в зоне контакта) должен удовлетворять следующему условию:

$$D_0^{i\ddot{a}e\ddot{n}} \leq D_0^\delta = \sqrt{\frac{0,34}{0,5J_{\ddot{a}\ddot{u}\ddot{o}}}} = \frac{0,82}{\sqrt{J_{\ddot{a}\ddot{u}\ddot{o}}}}, \text{ см,} \quad (46)$$

где  $D_0^{i\ddot{a}e\ddot{n}}$  - максимальный диаметр пор пригрузки, определяется по зависимости (22);  $J_{\text{вых}}$  — градиент выпора, при выходе фильтрационного потока в нижний бьеф (рис. 17).

б) Для защищаемого несвязного (сыпучего) грунта основания гранулометрический состав материала пригрузки (в зоне контакта) должен удовлетворять условию не просыпаемости [6].

## 2. Разгрузочный дренаж

В 3.2 п. 3 отмечалось, что в практике гидротехнического строительства может иметь место такой вариант, когда плотина располагается на относительно тонком слое глинистого или маловодопроницаемого грунта, а под ним залегает слой грунта с относительно большей водопроницаемостью, рис. 12, а: слой I — глинистый, слой II — песчаный. В этом случае, под действием фильтрационного потока может произойти местный фильтрационный выпор на поверхности дна нижнего бьефа относительно тонкого маловодопроницаемого слоя грунта — I, рис. 12, а и 18.

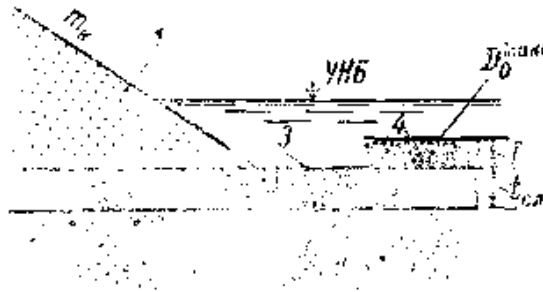


Рис.18. К выпору грунта в нижнем бьефе

1 — тело плотины; 2 — тонкий слой глины, толщиной  $t_{\text{сл}}$ ;

3 - разгрузочный дренаж; 4-слой пригрузки, толщиной  $T$ ;

$D_0^{i\ddot{a}e\ddot{n}}$  - максимальный размер фильтрационных пор материала пригрузки

Глинистый слой грунта (2) в нижнем бьефе (рис.18) будет подвержен выпору с достаточно большим значением градиента напора.

Действительно, если пренебречь потерями напора в песчаном слое II на ширине подошвы плотины (рис. 12. а), то действующий напор на сооружение распределится на слой глинистого грунта: на вход - в верхнем бьефе и выход — в нижний бьеф. Причем, на каждом из этих участков будет теряться величина напора, равная примерно  $0,5Z$ .

Следовательно, глинистый слой грунта толщиной  $t_{\text{сл}}$  в нижнем бьефе будет иметь градиент выпора\*

$$J_{\text{вып}} \approx \frac{0,5Z}{t_{\text{сл}}}, \quad (47)$$

где  $Z$  — напор на сооружение.

В данном случае, для предотвращения недопустимого явления выпора, необходимо в области нижнего бьефа устроить вертикальный разгрузочный дренаж, как показано на рис. 18\*\*.

При наличии такого дренажа в нижнем бьефе практически снимаются выходные градиенты напора, тем самым исключается опасность выпора грунта.

Примечание Диаметр и конструкция разгрузочных скважин вертикального дренажа, их размещение (шаг) определяются по результатам фильтрационных исследований с учетом гидрогеологических и других условий.

\*  $J_{\text{вып}}$  принимается по результатам фильтрационных исследований (расчетов), а для ориентировочно-приближенных расчетов по формуле (47).

\*\* Устройство пригрузки в данном случае, при наличии значительных по величине

выходных градиентов напора, является нецелесообразным, так как ее толщина может достигать нескольких метров.

### б) Выпор грунта при выходе фильтрационного потока на откос

В случае отсутствия дренажа на низовом клине плотины, или в случае, когда дренаж низового клина плотины закольматировался (или засорился при стекании воды по откосу), кривая депрессии может выклиниваться на поверхность низового откоса плотины, рис. 19. При этом в зоне «В» под действием фильтрационных сил может произойти местный фильтрационный выпор грунта, в результате которого будет нарушена прочность и устойчивость низового откоса.

Грунт в области «В» следует считать устойчивым, если удовлетворяется следующее неравенство [3]:

$$m_t > \frac{2}{\operatorname{tg} \varphi} \quad (48)$$

где  $\varphi$  — угол внутреннего трения грунта

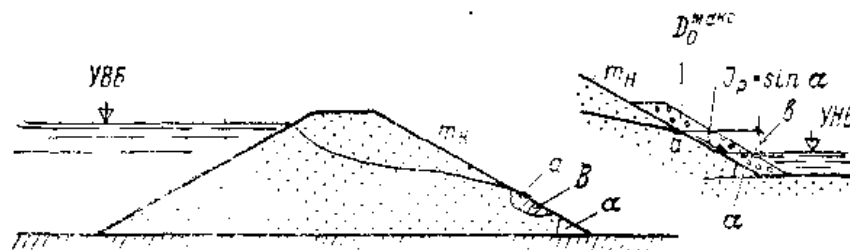


Рис. 19. Выпор грунта при выходе кривой депрессии на откос  
 $a$  — точка выхода кривой депрессии на откос; „В” — зона местного фильтрационного выпора;  $\alpha$  — угол наклона низового откоса к горизонту;  $m_H = \operatorname{ctg} \alpha$  — коэффициент низового откоса;  $D_0^{\max}$  — максимальный размер фильтрационных пор материала пригрузки.

Если неравенство (48) не удовлетворяется, то в этом случае для обеспечения устойчивости откоса (грунта в области «В» рис. 19) необходимо:

- 1) увеличить пологость низового откоса, т. е. уменьшить  $\alpha$  — угол наклона низового откоса к горизонту;
- 2) или покрыть поверхность откоса слоем водопроницаемой пригрузки (рис. 19).

При этом гранулометрический состав пригрузки ( $D_0$  или  $D_0^{\max}$ ) должен быть таким, чтобы удовлетворялось следующее условие:

$$J_p \leq \frac{1}{k_{\text{зап}}} J_{\text{раз}} \quad (49)$$

где  $J_{\text{зап}} = \sin \alpha$  — максимальный расчетный градиент напора (рис. 19);  $k_{\text{зап}} = 1,10 - 1,20$  — коэффициент запаса;  $J_{\text{раз}}$  — критический градиент размыва мелкозернистого или связного грунта на контакте с крупнозернистым материалом, определяется: а) для несвязных грунтов по формуле (34); б) для связных грунтов по зависимости (37), см. 3.3, п. 4°.

Условие (49) должно удовлетворяться и при назначении гранулометрического состава первого слоя фильтра для наклонного дренажа низового откоса плотины.

### 3.6. НОРМАЛЬНАЯ (МЕСТНАЯ) ФИЛЬТРАЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ ГРУНТА В ОБЛАСТИ ТРУБЧАТОГО ДРЕНАЖА

Трубчатый дренаж устраивается, главным образом, на пойменных участках плотины, когда за дренажем отсутствует вода нижнего бьефа. В зависимости от местоположения трубчатого дренажа по отношению к оси плотины, а также его способности «оттягивать» па себя кривую депрессии, в области дренажа могут быть сосредоточены значительные по величине входные градиенты напора.

Если грунт основания или тела плотины является суффозионным, то благодаря значительным по величине входным градиентам напора, в области дренажа могут возникнуть суффозионные явления, в результате которых может быть вынос из толщи грунта основания и тела плотины суффозионных фракций в дренажную призму, что может вызвать недопустимые просадки и кольматация дренажа.

При не тщательно подобранном фильтре в области дренажной призмы произойдет кольматация грунта, что может вызвать нарушение работы дренажа — подъем кривой депрессии и высачивание фильтрационного потока на откос.

В целях предотвращения указанных выше нежелательных явлений, кроме правильно подобранного состава фильтров [6], должны быть и правильно намечены соответствующие размеры дренажной призмы, от размера которой зависит величина входных градиентов напора в дренаж, нормальная работа дренажа и исключаются указанные выше нежелательные деформации.

Величина входного градиента напора в дренажную призму зависит от фильтрационного расхода, поступающего в дренаж, коэффициента фильтрации грунта основания или тела плотины и от площади живого сечения фильтрационного потока, при входе его в дренажную призму (рис. 20).

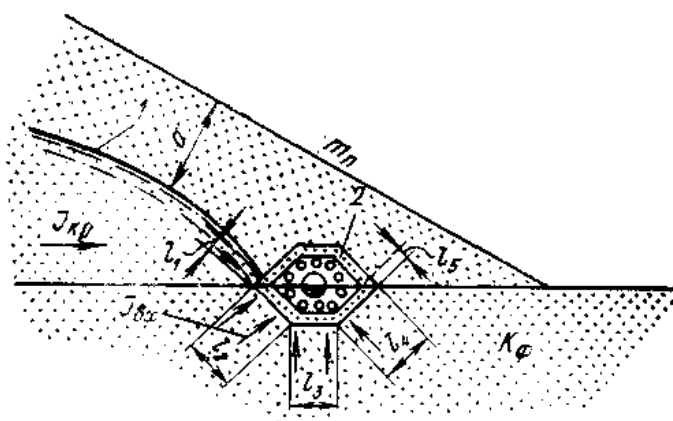


Рис. 20. Трубчатый дренаж

1 — кривая депрессии;  $a$  - наибольшая глубина промерзания; 2 - дренажная призма;  $l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 = L$  — смоченный периметр дренажной призмы;  $k_{\phi}$  - коэффициент фильтрации грунта основания.

Полагая, что в области дренажа фильтрация происходит при одномерном течении, тогда эта зависимость может быть выражена по закону Дарси:

$$J_{\text{вх}} = \frac{Q}{k_{\phi} \omega}, \quad (50)$$

где  $Q$  — фильтрационный расход, м<sup>3</sup>/сек;  $k_{\phi}$  — коэффициент фильтрации грунта основания или тела плотины, м/сек;  $\omega$  — площадь живого сечения фильтрационного потока, входящего в дренаж и отнесенная к 1 пог. м дренажа;  $\omega = L l = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5$ , где  $L = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5$  — смоченный периметр дренажной призмы (рис. 20), от размера которого, главным образом, зависит величина входного градиента напора  $J_{\text{вх}}$ .

Чтобы не происходило указанных выше деформаций грунта в области дренажа, размеры дренажной призмы должны быть такими, чтобы входной градиент напора  $J_{\text{вх}}$  был бы меньше или равен допустимому, т. е. должно удовлетворяться основное условие (20):

$$J_{\text{вх}} \leq J_{\text{доп}} = \frac{1}{k_{\text{зап}}} J_{\text{кр}},$$

где  $k_{\text{зап}} = 1,10—1,20$  — коэффициент запаса;  $J_{\text{кр}}$  — критический градиент напора для данного грунта основания, определяется по формуле (29), причем  $d_{ci} \leq d_{3\%}$



Примечания: 1. При несущих грунтах тела и основания плотины, величина входного градиента напора в дренажную призму должна быть  $J_{вх} \leq 0,70—0,75$ .

2. Приведенные выше рекомендации могут быть использованы для расчета дренажных канав, дренажных призм и др.

### 3.7. ДЕФОРМАЦИЯ ВЕРХОВЫХ ОТКОСОВ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОЛН

Наиболее распространенными типами покрытия откосов волнового воздействия в настоящее время являются покрытия, образованные монолитными армированными плитами большого размера в плане (10X10 или 20X20 м) или покрытия из сборных плит (соединенных между собой шарнирно), размерами в плане от 1,5X1,5 до 5,0X5,0 м, уложенными на сплошной фильтровой подготовке.

Кроме того, широко распространены покрытия из каменной наброски.. Каменная наброска

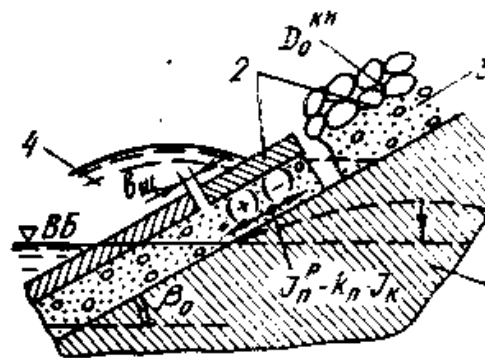


Рис- 21. К вопросу деформации верхних откосов от воздействия волн

1 - тело плотины; 2 - верхнее покрытие откоса (каменное или железобетонными плитами); 3 - слой фильтровой подготовки; 4 — накат волны;  $\beta_0$  — угол наклона верхнего откоса к горизонту;  $J_i^\delta = k_i J_e$  - расчетный градиент напора при пульсирующем режиме фильтрации

также располагается на слое сплошной фильтровой подготовки.

При накате и спаде волны на откос в слое фильтровой подготовки возникает пульсирующая фильтрация, от действия которой может быть нарушена прочность грунта откоса плотины, верхнего покрытия и, как следствие, устойчивость самого откоса.

Во избежание нежелательных последствий, запроектированная или подобранная из карьерных или искусственно получаемых грунтов фильтровая подготовка должна быть проверена на контактный размыв верхнего откоса плотины, при условии пульсирующего режима продольной фильтрации (от наката и спада волны) в слое фильтровой подготовки.

Фильтровая подготовка будет надежно защищать от контактного размыва откос плотины при пульсирующем режиме продольной фильтрации в том случае, если будет удовлетворять следующее условие:

$$\text{где } J_{пp} \leq 0,75 J_{кр} \quad (51)$$

где  $J_i^\delta$  — расчетный градиент напора при пульсирующем режиме фильтрации:

$$J_{пp} = k_{п} J_{к} \quad (52)$$

где  $k_{п}$  — коэффициент, учитывающий пульсирующий режим продольной фильтрации (по отношению к размывающему градиенту напора, при равномерной установившейся продольной фильтрации):  $k_{п} = 1,13—1,50$  (для расчетов рекомендуется среднее значение  $k_{п} = 1,35$ );  $J_{к}$  — градиент в слое фильтровой подготовки на контакте с грунтом тела плотины:

$$J_e = \sin \beta_0 \quad (53)$$

где  $\beta_0$  — угол наклона верхового откоса к горизонту (рис. 21).

Значение  $J_{кр}$  определяется:

- а) для несвязного грунта тела плотины по зависимости (34);
- б) для связного грунта тела плотины по зависимости (37).

Если условие (51) не удовлетворяется, тогда следует изменить гранулометрический состав фильтровой подготовки (в сторону уменьшения его крупности).

**П р и м е ч а н и е.** Фильтрационно-суффозионная прочность самой фильтровой подготовки может быть проверена по методу, указанному в п. 3.3, п. 3°.

### 3.8. ФИЛЬТРАЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ: ПОНУРА, ЭКРАНА, ЯДРА ПЛОТИНЫ

Противофильтрационные устройства в теле плотины устраиваются с целью:

- а) уменьшить фильтрационный расход воды, поступающей в нижний бьеф;
- б) снизить кривую депрессии в низовой части плотины для увеличения устойчивости низового откоса плотины;
- в) уменьшить пьезометрические уклоны фильтрационного потока в теле плотины для повышения ее общей (казуальной) и местной (нормальной) фильтрационной прочности.

Особенно в тех случаях, когда грунт, из которого отсыпается плотина, является суффозионным. В этом случае создание противофильтрационных устройств является обязательным.

Однако, противофильтрационные устройства (понура, экран, ядро) будут выполнять свою положительную роль в том случае, если будет обеспечена их фильтрационная прочность, т.е. в процессе эксплуатации не будет происходить отслаивания агрегатов частиц связного грунта или грунта экрана (ядра) в поры грунта призмы плотины или первого слоя фильтра при данных конкретных гидродинамических условиях и контактируемых крупнозернистых грунтах.

В данном случае следует по гранулометрическому составу контактируемых крупнозернистых грунтов (подстилающих понура, или грунтов, контактируемых с экраном, ядром призм плотины или фильтров) назначать (или проверять) размеры (толщину) противофильтрационных устройств.

Фильтрационная прочность связного грунта с числом пластичности  $W_p \geq 5$  понура, экрана, ядра будет обеспечена в том случае, если при принятых размерах (толщине) будут удовлетворяться приведенные ниже условия:

- а) Для понура

$$J_i = \frac{h_0}{\delta_i} \leq J_\delta \quad (54)$$

где  $J_p$  — максимальный контролирующий градиент напора для грунта понура, определяется как указано в 2.4, п. 4°, рис. 9;  $h_0$  — потеря напора на длине всего основания понура (см. 2.4, п. 4°, рис. 22;  $\delta_p$  — толщина действительного понура;  $J_i$  — допустимый расчетный градиент напора подстилающего слоя грунта под понуром:

$$= \frac{1}{\varphi} \left[ \frac{0,34}{(D_0^{i\delta n})^2} - 1 \right] \quad (55)$$

Значения коэффициента  $\varphi$

$D_0^{i\delta n}$ , см.	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,55	0,583
$\varphi$	0,50	0,46	0,42	0,32	0,18	0,08	0

$D_0^{i\delta n}$  . - максимальный размер фильтрационных пор подстилающего понур грунта (рис. 22), определяется

по зависимости (22); причем  $D_0^{i\dot{a}e\dot{n}} \leq 0,583 \text{ см.}$

Если условие (54) не удовлетворяется, то в таком случае или должна быть увеличена толщина понура  $\delta_{\text{п}}$ , или под понур должен быть уложен дополнительный подстилающий слой грунта толщиной  $0,3 \div 0,5 \text{ м}$  с меньшим значением  $D_0^{i\dot{a}e\dot{n}}$ , т. е. по крупности более мелкого гранулометрического состава.

б) Для экрана

$$J_y = \frac{Z}{\delta_y} \leq J_{\delta} \quad (56)$$

где  $J_y$  — градиент напора, действующий на экран;  $Z$  — напор, действующий на плотине;  $\delta_y$  — толщина экрана (ниже точки «С», указанной на рис. 22).

В случае отсутствия воды в нижнем бьефе (точка «С» лежит на поверхности основания) величина градиента напора, действующего на экран, принимается:

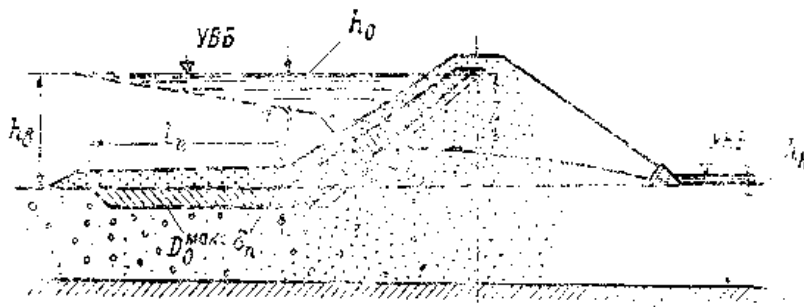


Рис. 22. К расчету фильтрационной прочности понура, экрана

$h_0$  — потеря напора на длине всего основания понура;  $\delta_{\text{п}}$  — толщина действительного понура;  $Z$  — напор, действующий на плотине;  $\delta_s$  — толщина экрана (ниже точки „С“);  $D_0^{i\dot{a}e\dot{n}}$  — подстилающий грунт, имеющий максимальный размер пор  $D_0^{i\dot{a}e\dot{n}}$  ..

$$J_y' = \frac{h_{\text{в}}}{\delta_s'} \quad (57)$$

где  $h_{\text{в}}$  — глубина воды в верхнем бьефе (рис. 22);  $\delta_s'$  — толщина экрана по низу (нормально к оси экрана).  $D_0^{i\dot{a}e\dot{n}}$ , входящее в формулу (55), может быть отнесено к грунту призмы плотины, при отсутствии фильтра с низовой стороны, экрана, или к грунту первого слоя фильтра, при наличии такового.

в) Для ядра

$$J_{\text{я}} = \text{tg } \alpha \leq J_{\text{р}} \quad (58)$$

где  $J_{\text{я}}$  — максимальный градиент напора ядра плотины на уровне воды нижнего, бьефа;  $\alpha$  — угол наклона низовой грани ядра к горизонту (см. рис. 12,б).  $J_{\text{р}}$  — определяется по формуле (55), где  $D_0^{i\dot{a}e\dot{n}}$  — максимальный размер фильтрационных пор грунта тела плотины (при отсутствии фильтра), или грунта первого слоя фильтра.

В зависимости от напора на сооружение  $Z$  может быть определена требуемая по условиям фильтрационной прочности толщина глинистого экрана (ядра) плотины  $\delta$  по зависимости:

$$\delta = \frac{Z}{J_{\text{р}}}, \quad (59)$$

где  $Z$  — напор, действующий на сооружение;  $J_{\text{р}}$  — определяется по формуле (55).

Окончательное решение вопроса о толщине глинистого экрана (ядра) должно решаться путем сравнительных технико-экономических расчетов в каждом конкретном случае, с учетом всех требований, предъявляемых к экранам (ядрам).

### 3.9. ФИЛЬТРАЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ ГРУНТА ЯДРА (ЭКРАНА) В ЗОНЕ КОНТАКТА (ПРИ СОПРЯЖЕНИИ) СО СКАЛОЙ ОСНОВАНИЯ

В практике гидротехнического строительства особое внимание должно быть обращено на сопряжение материала ядра (экрана) с основанием, которое может быть выполнено в виде бетонной подушки, бетонной пробки (в русле реки), и естественной трещиноватой скалой (зацементированной или незацементированной).

В зоне примыкания, т. е. на контакте материала ядра (экрана) с основанием, при неблагоприятных условиях [некачественной (недоуплотненной) укладке грунта ядра или экрана, образовании трещин и пр.] может иметь место усиленная контактная фильтрация (см. рис. 12,б;  $J_k$ ), в результате которой будет происходить нарушение прочности материала ядра или экрана, что может привести к нежелательным последствиям.

В целях обеспечения фильтрационной прочности материала ядра (экрана) в зоне примыкания со скалой основания, бетонной подушкой, бетонной пробкой необходимо из того же материала ядра (экрана) подобрать более качественный состав. Поэтому, при назначении «зоны гранулометрического состава грунта ядра (экрана) плотины, пригодного для укладки в примыкании с основанием» (рис. 23, «Зоны П»), необходимо, чтобы этот запроектированный или подобранный гранулометрический состав материала ядра (экрана) удовлетворял бы двум основным условиям:

I. Нижний предел гранулометрического состава грунта «Зоны П» (рис. 23,а: НП), уложенного в недоуплотненном состоянии (что может иметь место в зоне контакта в произво-

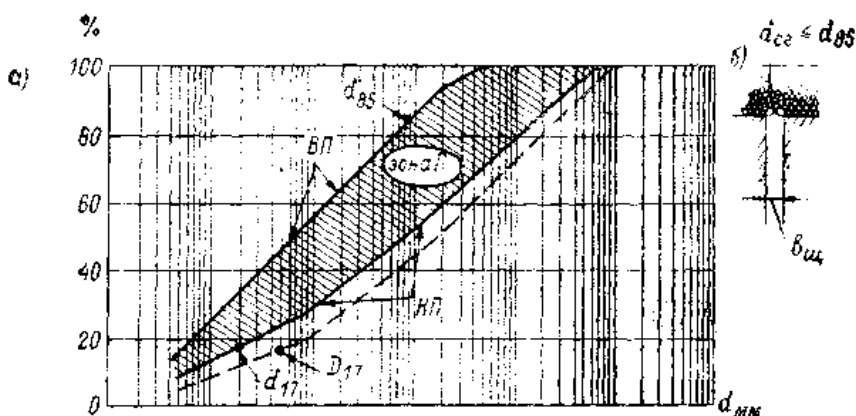


Рис. 23. К вопросу сопряжения материала ядра (экрана) с основанием

*a* — «зона П» — «Зона гранулометрического состава грунта ядра (экрана) плотины, пригодного для укладки в примыкании с основанием»; *ВП* - верхний предел гранулометрического состава грунта «Зоны П»;

*НП* - нижний предел гранулометрического состава грунта «Зоны П»; — — — (пунктир)-нижний предел гранулометрического состава грунта, укладываемого в ядро плотины (не в зоне контакта);  $d_{17}$ ;  $D_{17}$  - диаметр фракций грунта нижнего предела «Зоны П» и укладываемого в ядро плотины (вне контакта с основанием);

$d_{85}$  - расчетный размер фракций грунта *ВП* «Зоны П»; *б* - схема трещины в скальном (или бетонном) основании;  $b_{щ}$  - ширина щели (трещины)

дственных условиях), по водопроницаемости должен быть меньше, чем уплотненный грунт (вне зоны контакта) тела ядра или экрана плотины. Нижний предел грунта «Зоны П» по своему гранулометрическому составу должен быть более мелкого зернового состава, чем грунт нижнего предела ядра плотины (рис 23 а; пунктир), укладываемый в его толщу, т. е. по водопроницаемости должно удовлетворяться следующее условие:

$$\frac{k_{я}}{k_{н.п}} \approx 2 - 5, \quad (60)$$

где  $k_{н.п}$  — коэффициент фильтрации грунта нижнего предела «Зоны П» при минимальном объемном весе (на пределе пластичности  $W_T$ ).

Причем минимальный объемный вес грунта  $\gamma_{ск}'$  в зоне контакта должен быть:

$$\gamma_{\text{н\acute{e}}} \geq \frac{\Delta}{1 + \varepsilon_{\delta}} \quad (61)$$

где  $\Delta$  — удельный вес частиц грунта ( $\text{г/см}^3$ );  $\varepsilon_{\delta}$  — коэффициент пористости на границе текучести  $W_{\text{T}}$ :

$$\varepsilon_{\delta} = \frac{\Delta W_{\delta}}{100 \gamma_{\text{в}}} \quad (62)$$

где  $\gamma_{\text{в}}$  — объемный вес воды  $\approx 1 \text{ г/см}^3$ .

Для ориентировочных расчетов условие (60) может быть представлено в следующем виде (рис. 23, а):

$$\frac{D_{17(\beta)}}{d_{17(i, \dot{i})}^2} \approx 2 - 5 \quad (63)$$

где  $d_{17(\text{н.п})}$  — диаметр фракций грунта нижнего предела «Зоны П».  $D_{17(\text{я})}$  — диаметр фракций нижнего предела грунта, укладываемого в толщу ядра плотины.

II. Гранулометрический состав материала ядра верхнего предела «Зоны П» (рис. 23) должен назначаться с таким расчетом, чтобы обеспечивалась его неразрываемость по существующим трещинам или ожидаемым в процессе эксплуатации сооружения.

Это условие выражается следующей зависимостью:

$$d_{85(\dot{A}, \dot{i})} \geq 0,55 b_{\dot{a}} \quad (64)$$

откуда

$$b_{\dot{a}} \leq 1,8 d_{85(\dot{A}, \dot{i})} \quad (65)$$

где  $d_{85(\text{в.п})}$  — диаметр фракций грунта верхнего предела «Зоны П» (рис. 23, а и б);  $b_{\text{щ}}$  — преобладающий размер раскрытия трещин в скале основания и в бетонной подушке (пробке).

Следовательно, верхний предел гранулометрического состава грунта «Зоны П», предназначенного для укладки в контактную зону, должен назначаться исходя из условий трещиноватости скалы основания (преобладающего размера существующих трещин) или с учетом возможного трещинообразования в период эксплуатации сооружения.

Кроме того, для получения наилучшего сопряжения грунта ядра с поверхностью основания, в зоне контакта следует укладывать грунт ядра «методом отсыпки грунта в воду».

Ширина контактного слоя у примыкания к основанию должна быть по нормали к поверхности 3—4 м.

При укладке «насухо» грунт ядра плотины в зоне контакта должен укладываться с повышенной влажностью, против оптимальной на 2—4%.

При выполнении указанных выше условий, обеспечивается надежное сопряжение грунта ядра плотины с основанием, т. е. обеспечивается фильтрационная прочность грунта ядра (экрана) плотины в зоне примыкания с трещиноватой скалой основания, с бетонной подушкой и с бетонной пробкой.

### 3.10. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УСИЛЕНИЮ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ГРУНТОВ ЯДЕР (ЭКРАНОВ) ПЛОТИН В КОНТАКТНЫХ ЗОНАХ

При проектировании и строительстве плотин из грунтовых материалов необходимо, в частности, решать вопрос о фильтрационной прочности грунта ядер (экранов) плотин в контактных зонах.

В этом случае следует различать два вида фильтрационной прочности грунта:

- 1) казуальную, зависящую от длины пути фильтрации, противопоставляемой действующему напору на сооружение и
- 2) нормальную (местную) фильтрационную прочность, зависящую от конструктивных решений по защите грунта (3.1).

Проектные проработки по вопросам усиления фильтрационной прочности грунтов земляных сооружений, с учетом указанного выше, должны решаться следующим образом:

- 1) удлинением пути фильтрации и

2) усовершенствованием конструктивных элементов плотины по защите грунтов.

Исходя из указанных выше двух принципиальных положений, усиление фильтрационной прочности грунтов ядер (экранов) в контактных зонах (особенно высоких плотин) следует осуществлять как показано на рис. 24.

1°. В целях усиления фильтрационной прочности грунта ядра (экрана) в зоне контакта с основанием котлована и в бортах каньона рекомендуется уширение ядра в зоне примыкания к скале на длину  $a_{\phi}$ , как указано на рис. 24, *a*, с таким расчетом, чтобы в пределах колебания уровня воды в нижнем бьефе образовался новый откос у основания ядра с углом наклона  $\alpha'$ .

В этом случае удлиняется путь фильтрации на величину  $2a_{\phi}$  (с учетом уширения основания ядра в верхнем бьефе), в значительной степени уменьшается расчетный градиент напора (на уровне воды нижнего бьефа), т. е.

$$j'_{\text{расч}} = \text{tg } \alpha' \quad (\text{tg } \alpha' < \text{tg } \alpha)$$

и создается запас прочности для материала ядра плотины, по гидродинамическим условиям.

Для уширенной части ядра относительный коэффициент запаса, по гидродинамическим условиям, составит:

$$k_{\text{зап}} = \frac{\text{tg } \alpha}{\text{tg } \alpha'}$$

В этом случае, т. е. при уширении ядра в основании (рис. 24, *a*) при подборе состава фильтров, за расчетный (макс.) градиент напора следует принимать:

$$j'_{\text{расч}}^{\text{макс}} \approx \text{tg } \theta, \tag{66}$$

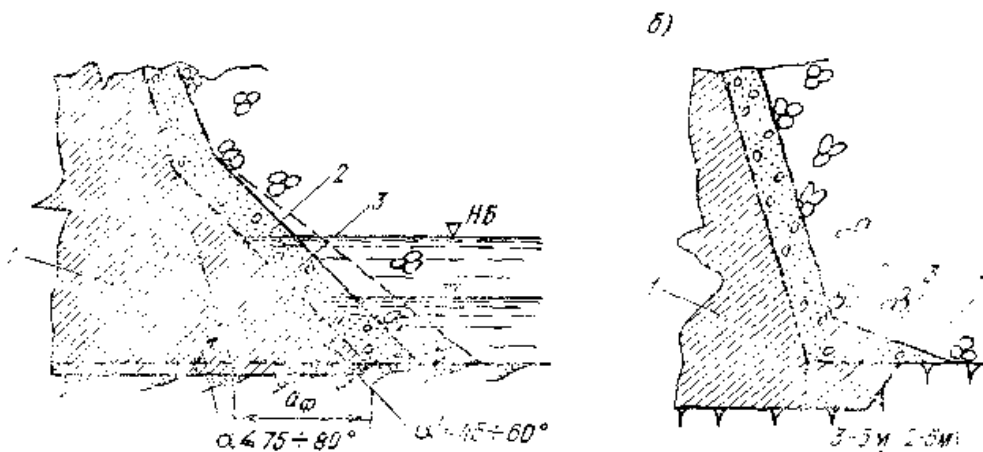
$$\theta = \frac{\alpha + \alpha'}{2}$$

где

Удлинение пути фильтрации в основании ядра по контакту со скалой может быть осуществлено, как показано на рис. 24, *б*, врезкой ядра в скальное основание, а уложенный грунт ядра должен быть сверху прикрыт материалом фильтра.

Это мероприятие в значительной степени усилит фильтрационную прочность грунта в примыкании со скалой.

В данном случае объем дополнительного грунта, уложенного в ядро, будет меньше, чем по рис. 24, *a*.



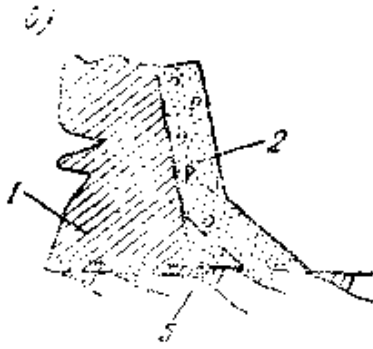


Рис. 24. Варианты сопряжения ядер (экранов) плотин со скальным основанием  
 1 — ядро плотины; 2 — переходная зона; 3 — уширение (удлинение) контактной зоны ядра (экрана) плотины; 4 — уширение переходной зоны; 5 — дополнительный (по периметру) слой фильтра с низовой и верховой стороны ядра (экрана);  $a_f$  — удлинение пути фильтрации

2°. Контактную зону примыкания ядра к скальному основанию котлована можно упрочнить за счет укладки дополнительного слоя фильтра, имеющего более мелкий зерновой состав, по сравнению с первым слоем фильтра переходной зоны, рис. 24, в.

Такой дополнительный фильтр устраивается по всему периметру основания, чтобы не допускать выноса материала ядра (экрана) при усиленной фильтрации по контакту.

Приведенные выше рекомендации (в пп. 1° и 2°) должны применяться в каждом конкретном случае на основании технико-экономического сопоставления вариантов.

### 3.11. ПРОВЕРКА НА МЕСТНУЮ ФИЛЬТРАЦИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ ГРУНТА ОСНОВАНИЯ ПЛОТИНЫ В ЗОНЕ СОПРЯЖЕНИЯ С ВИСЯЧЕЙ ШПУНТОВОЙ СТЕНКОЙ ИЛИ ЗУБОМ

В практике гидротехнического строительства возводятся плотины из грунтовых материалов с противофильтрационными устройствами, конструкция которых (схематично) представлена на рис. 25.

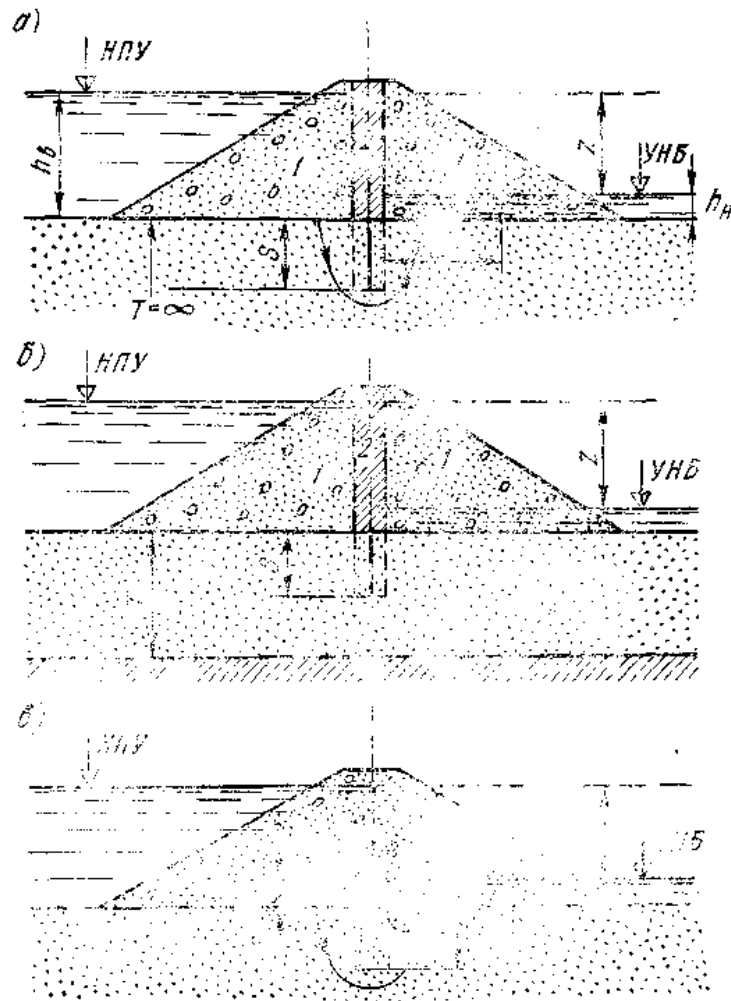


Рис. 25. Плотина с ядром (диафрагмой) и всячим зубом (грунтовым, бетонным, шпунтовым)

*a* - водопроницаемое основание с неограниченной мощностью ( $T = \infty$ ); *б*— водопроницаемое основание с ограниченной мощностью ( $T$ ); *в* — диафрагма с заделкой в шпунтовую стенку, заполненную глинистым грунтом; 1 — призма плотины; 2 — ядро, диафрагма (асфальтобетонная, шпунтовая и др.);  $S$  — длина зуба;  $Z$  — напор на плотину (при отсутствии нижнего бьефа  $Z = h_B$ );  $x$  — расстояние от низовой грани ядра (диафрагмы) до рассматриваемой точки выхода фильтрационного потока в основании низовой призмы плотины; 3 — зуб— двухрядный шпунт, сверху, в сопряжении со шпунтовой диафрагмой плотины, заполненный суглинистым грунтом.

В разделе II, п. 2 4, 2° для плотины с всячим зубом приведены расчеты казуальной прочности грунта основания, которые сводятся к определению такой длины пути фильтрации, при которой исключается возможность раскрытия ходов сосредоточенной фильтрации в данном грунте.

Однако устраивая в грунте основания противофильтрационные элементы (зубья разной конструкции), в местах сопряжения их с грунтом могут иметь место нарушения местной фильтрационной прочности грунта, если противофильтрационные элементы имеют недостаточные размеры или сопряжение грунта основания с материалом (галечником, каменной наброской) низовой призмы плотины по своему гранулометрическому составу не удовлетворяет, в данном случае, гидродинамическим условиям при выходе фильтрационного потока в низовую призму плотины.



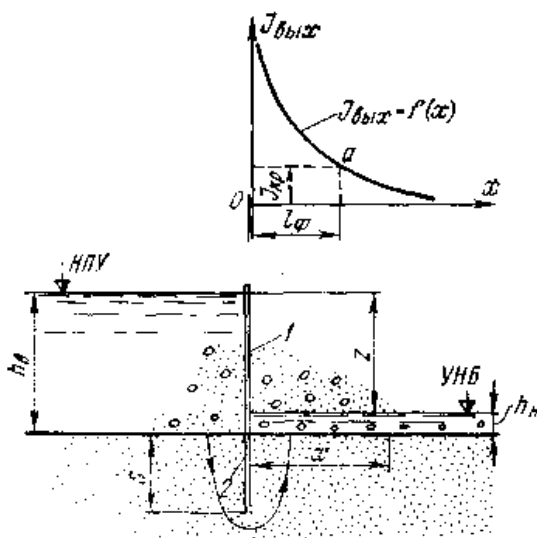


Рис. 26. Расчетная схема

1 – диафрагма (ядро) плотины; 2 – зуб шпунт) глубиной  $S$ ;  $J_{\text{вых}} = f(x)$  – эпюра выходных градиентов напора;  $J_{\text{кр}}$  – критический градиент напора для данного грунта основания;  $l_{\text{ф}}$  – длина укладки фильтра в основании низовой призмы плотины;  $Z$  – напор воды на плотину (при отсутствии НБ  $Z = h_{\text{в}}$ )

В целях исключения нежелательных явлений (выпора грунта основания в каменную наброску, местных просадок грунта и др.) ниже приводятся практические рекомендации по проверке местной фильтрационной прочности грунта основания в области сопряжения его с зубом и материалом низовой призмы плотины.

1°. Расчетная схема конструкций плотин из грунтовых материалов с ядром (диафрагмой) и висячим зубом (рис. 25) представлена на рис. 26.

а) Если водопроницаемое основание плотины имеет неограниченную мощность ( $T = \infty$ ), то график выходных градиентов напора  $J_{\text{вых}} = f(x)$  фильтрационного потока по основанию низовой призмы плотины, по дну нижнего бьефа, будет иметь следующее уравнение [5]:

$$J_{\text{вых}} = \frac{Z}{\pi \sqrt{S^2 + x^2}}, \quad (67)$$

где буквенные обозначения указаны на рис. 25 и 26.

При  $x = 0$  получим формулу для определения максимального значения выходного градиента напора, которая соответствует формуле (19):

$$J_{\text{вых}}^{\text{макс}} = 0,318 \frac{Z}{S}. \quad (19)$$

б) Чтобы не происходило нарушения фильтрационно-суффозионной прочности грунта основания, при выходе фильтрационного потока воды в низовую призму плотины, должно быть выполнено основное условие (20):

$$J_{\text{вых}}^{\text{макс}} \leq J_{\text{доп}}, \quad (20)$$

где

$$J_{\text{доп}} = \frac{1}{k_{\text{зап}}} J_{\text{кр}} \quad (21)$$

$k_{\text{зап}} = 1,2 \div 1,5$ .

В данном случае значение критического градиента напора ( $J_{\text{кр}}$ ) следует определить по формуле (41):

$$J_{кр} = \left( \frac{\Delta}{\gamma_{в}} - 1 \right) (1 - n), \quad (41)$$

где  $\Delta$  — удельный вес частиц грунта основания;  $\gamma_{в}$  — объемный вес воды  $\approx 1$  г/см<sup>3</sup>;  $n$  — пористость (в долях единицы).

Если основное условие (20) удовлетворяется, то в этом случае фильтрационная прочность грунта основания будет обеспечена.

в) Если основное условие (20) не удовлетворяется, то в таком случае следует выполнить проверку на условие непрорываемости (невдавливаемости) грунта основания в поры материала низовой призмы плотины [6]:

$$\frac{D_0^n}{d_{cr}} \ll 1,8, \quad (68)$$

где  $D_0^n$  — средний диаметр пор материала низовой призмы, определяется по формуле (28);  $d_{cr} \leq d_{50}$  — размер сводообразующих частиц, если грунт основания является практически несупфозионным;  $d_{cr} \leq d_{25}$  — размер сводообразующих частиц для супфозионных грунтов основания (см. 3.3, п. 2°).

Если условие (68) удовлетворяется, то фильтрационная прочность грунта основания будет обеспечена.

В противном случае, т. е. если не удовлетворяется основное условие (20) и условие (68), необходимо предусмотреть одно из двух мероприятий:

- 1) или увеличить длину зуба —  $S$ , чтобы удовлетворялось основное условие (20);
- 2) или в основании низовой призмы плотины предусмотреть укладку слоя фильтра, подобранного по условию (68), где вместо  $D_0^n$  следует принять  $D_0^{\phi}$  — средний диаметр пор материала фильтра.

Укладка фильтра должна быть осуществлена от низовой грани ядра (диафрагмы) на длине  $l_{\phi}$  (рис. 26).

Выбор того или другого дополнительного варианта мероприятий должен определяться технико-экономическим сравнением вариантов.

г) Для определения длины укладки фильтра  $l_{\phi}$  в основании низовой призмы плотины следует:

- 1) по уравнению (67) построить (в масштабе) график  $J_{вых} = f(x)$ , как показано на рис. 26;
- 2) по зависимости (41) определить  $J_{кр}$  и на кривой полученного графика отложить полученное значение  $J_{кр}$ .

Координата по оси абсцисс « $x$ » от «0» до точки « $a$ » (рис. 26) будет соответствовать требуемой длине укладки слоя фильтра в основание низовой призмы плотины.

Окончательная длина укладки слоя фильтра должна быть назначена с учетом коэффициента запаса  $k_{зап} = 1,2 \div 1,3$ .

$$L_{\phi} = (1,2 \div 1,3)l_{\phi} \quad (69)$$

2°. На рис. 25, в представлена конструкция зуба, выполненная в виде двухрядного шпунта, сверху, в сопряжении со шпунтовой диафрагмой плотины, шпунтовая стенка заполнена суглинистым (связным) грунтом.

При такой конструкции противофильтрационных устройств должны быть выполнены две проверки:

- 1) на фильтрационную прочность грунта основания в области, где устраивается висячий зуб из двухрядного шпунта глубиной —  $S$  и
- 2) на фильтрационную прочность глинистого (связного) грунта в месте его сопряжения с диафрагмой плотины, имеющей заделку в виде висячего шпунтового зуба глубиной  $S'$  (рис. 25, в).

В том и другом случае расчетная схема принимается по рис. 26, а расчеты по проверке фильтрационной прочности грунтов выполняются по способу, изложенному в п. 1°.

Однако расчет по проверке фильтрационной прочности глинистого (связного) грунта основания должен выполняться, как указано ниже.

В этом случае, если основное условие (20) не удовлетворяется, то проверка на сопряжение суглинистого (связного) грунта с материалом низовой призмы плотины должна быть выполнена, как указано в п. 3.5, а, по зависимости (46).

а) Связный (глинистый) грунт основания с числом пластичности  $W_p \geq 3 \div 5$  будет обладать фильтрационной прочностью в том случае, если гранулометрический состав материала низовой призмы плотины, в месте контакта со связным глинистым грунтом будет удовлетворять условию (46):

$$D_j^{\text{макс}} \leq D_{0P} = \frac{0,82}{\sqrt{J_{\text{вых}}^{\text{макс}}}} \text{ (см)}, \quad (46)$$

где  $D_0^{\text{и\u0430\u0435\u043d}}$  — максимальный размер пор материала низовой призмы плотины на контакте с глинистым грунтом, определяется по зависимости (22);  $D_0^\delta$  — счетный диаметр пор материала низовой призмы плотины, зависящий от величины  $J_{\text{а\u0443\u043e}}^{\text{и\u0430\u0435\u043d}}$ ;  $J_{\text{а\u0443\u043e}}^{\text{и\u0430\u0435\u043d}}$  — максимальный градиент напора, при выходе фильтрационного потока в низовую призму плотины, определяется по зависимости (19).

Если условие (46) удовлетворяется, то фильтрационная прочность суглинистого грунта будет обеспечена.

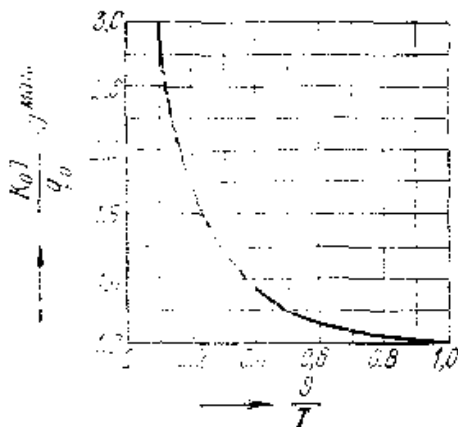


Рис. 27. График для определения  $J_{\text{а\u0443\u043e}}^{\text{и\u0430\u0435\u043d}}$  фильтрационного потока в основании низовой призмы плотины, при ограниченной мощности водопроницаемого основания (рис. 25, б).

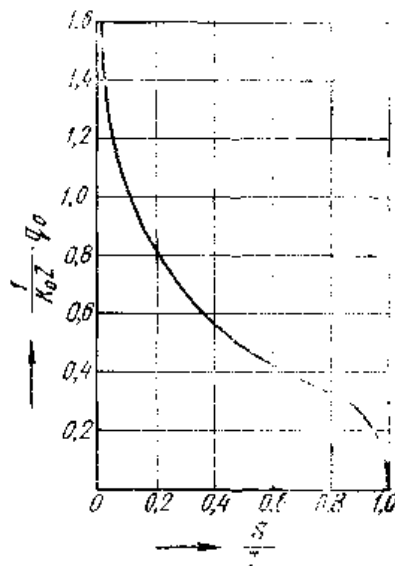


Рис. 28. График для определения удельного фильтрационного расхода воды в основании плотины  $q_0$ , при ограниченной мощности водопроницаемого основания ( $T$ , рис. 25, б)

б) Если не удовлетворяются основное условие (20) и условие (46), то в таком случае, необходимо предусмотреть, как указано выше в п. 1°, в одно из двух мероприятий:

1) или увеличить длину зуба  $S'$ , чтобы удовлетворялось условие (20)

2) или с низовой стороны диафрагмы плотины предусмотреть засыпку глинистого (связного) грунта слоем фильтра, подобранного по условию (46), т. е.  $D_0^{\text{и\u0430\u0435\u043d}} \leq D_0^\delta$ , где  $D_0^{\text{и\u0430\u0435\u043d}}$  — максимальный диаметр пор фильтра.

Примечание. Изложенная выше в п. 2° методика расчета по проверке местной фильтрационной прочности суглинистого (связного) грунта в месте сопряжения с диафрагмой плотины распространяется и на условия, когда в основании плотины залегает суглинистый (связный) грунт.

3°. Если водопроницаемое основание плотины имеет ограниченную мощность  $T$ , рис. 25, б, то максимальный градиент напора —  $J_{\text{а\u0443\u043e}}^{\text{и\u0430\u0435\u043d}}$  фильтрационного потока, при выходе в низовую призму плотины, может быть определен с помощью графика рис. 27 [5], где  $q_0$  — удельный фильтрационный расход в основании плотины;  $k_0$  — коэффициент фильтрации грунта основания,

определяется по формуле (32),  $S$ ,  $T$ ,  $z$  указаны на рис. 25, б.

Удельный фильтрационный расход в основании плотины—  $q_0$  определяется по графику рис. 28.

## **Раздел 4. РАСЧЕТЫ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ЗЕМЛЯНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ СРАБОТКЕ (СНИЖЕНИИ) УРОВНЯ ВОДЫ В ВОДОХРАНИЛИЩЕ**

### **4.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

В практике строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений приходится решать вопрос о режиме сработки (снижения и подъема) уровня воды в бьефе. От режима сработки (снижения) уровня воды в бьефе во многом зависят прочность и устойчивость сооружения и его элементов (ядер, экранов и др.).

Для решения вопроса о фильтрационной прочности откосов плотин, ядер, экранов (грунтовых и пленочных), при сработке (снижении) уровня воды в водохранилище следует различать два расчетных случая:

*I расчетный случай* — снижение уровня воды в бьефе происходит мгновенно, т. е. это такой случай, когда снижение уровня воды в бьефе опережает водоотдачу грунта тела откоса плотины (канала), ядра, экрана.

В этом случае временем снижения уровня воды в бьефе можно пренебречь и при расчетах устойчивости и фильтрационной прочности откосов следует условно предполагать, что произошло мгновенное снижение уровня воды в бьефе.

*II расчетный случай* — снижение уровня воды в бьефе соответствует снижению уровня грунтовых вод в теле откоса плотины, ядра, экрана или водоотдаче их грунта.

В первом случае — сооружение может претерпевать соответствующие деформации, вызванные нарушением его фильтрационной прочности (местный выпор, оползание откоса и др.), если не будут предусмотрены соответствующие мероприятия, обеспечивающие надежную работу сооружения в данном режиме.

Во втором случае сооружение будет находиться в наиболее благоприятных условиях.

Однако и в этом случае возможность проявления деформаций, сооружения также не исключается, если не выполнены, в период строительства, соответствующие требования к материалу сооружения.

Из приведенного выше следует, что для решения вопросов по фильтрационной прочности сооружения, при сработке (снижении) уровня воды в бьефе, необходимо прежде всего установить для каждого конкретного объекта расчетный случай (I или II). Метод установления расчетных случаев приводится ниже в п. 4.2.

### **4.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В ГРУНТЕ ОТКОСА ПЛОТИНЫ (КАНАЛА), ЯДРА, ЭКРАНА**

Скорость снижения уровня воды в грунте откоса плотины, ядра, экрана —  $v_d$  определяется по следующей зависимости [2]:

$$v_d = \frac{k_r}{n} J, \quad (70)$$

где  $k_r$  — коэффициент фильтрации грунта (откоса плотины, ядра, экрана);  $n$  — пористость грунта;  $J$  — градиент напора при фильтрации воды сверху — вниз.

Учитывая, что градиент напора  $J$  в данном случае не может быть больше 1,0, можно с некоторым приближением считать, что

$$v_d = k_r, \quad (71)$$

т. е. скорость снижения уровня воды в грунте равна примерно коэффициенту фильтрации данного грунта.

Если принять время снижения уровня воды в бьефе  $T$ , то величина снижения уровня

грунтовой воды (в ядре, экране) за это время будет:

$$Z_{\text{я}} \cong k_{y(y)} \dot{O} \quad (72)$$

а величина снижения уровня воды в бьефе за это время  $T$  будет:

$$Z = v_A \dot{O}, \quad (73)$$

где  $v_B$  — скорость снижения уровня воды в бьефе.

Из приведенного (72) и (73) следует:

1. Если величина снижения уровня грунтовой воды (в ядре, экране, откосе плотины) —  $Z_{\text{св}}$  за время  $T$  будет меньше снижения уровня воды в бьефе, т. е.

$$Z_{\text{сн}} < Z, \quad (74)$$

то в этом случае будет иметь место высачивание грунтовой воды на откос, что соответствует I расчетному случаю.

2. Если же за время  $T$  снижение уровня грунтовой воды —  $Z_{\text{сн}}$  будет равно или больше снижения уровня воды в бьефе, т. е.

$$Z_{\text{сн}} \geq Z, \quad (75)$$

то в этом случае высачивание грунтовой воды на откос происходить не будет, что соответствует II расчетному случаю.

Исходя из установления режима сработки (снижения уровня воды в водохранилище) ниже приводятся соответствующие расчеты по определению фильтрационной прочности земляных сооружений и их элементов.

#### 4.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ГРУНТОВЫХ ЯДЕР, ЭКРАНОВ, ПЕРЕХОДНЫХ ЗОН ПРИ СНИЖЕНИИ УРОВНЯ ВОДЫ В БЬЕФЕ

В основу расчета и проверки фильтрационной прочности ядер, экранов и переходных зон, при снижении уровня воды в бьефе должен быть положен I расчетный случай (см. 4.2), т. е. когда снижение уровня воды в бьефе опережает водоотдачу грунта ядра, экрана (откоса плотины), т. е. при  $Z > Z_{\text{сн}}$ .

В этом случае будет происходить высачивание грунтовой воды на откос и стекание ее по верховому откосу в зоне контакта с крупнозернистым материалом первого слоя фильтра переходной зоны (рис. 29). При стекании воды по откосу, последний не должен подвергаться контактному размыву и разрушению.

1°. *Связный грунт ядра (экрана) плотины, контактируемый с материалом первого слоя фильтра, не будет подвергаться контактному размыву и разрушению в том случае, если будет удовлетворяться следующее условие:*

$$D_0^{\text{макс}} \leq \frac{0,56}{(J_k + 0,56)^2} \text{ (см)}, \quad (76)$$

где  $D_0^{\text{макс}}$  в см — максимальный диаметр пор первого слоя фильтра, определяется по зависимости (22), причем

$$D_0^{\text{макс}} \leq 1,8 \text{ см};$$

$J_k$  — расчетный градиент напора в крупнозернистом грунте:  $J_k = \sin \alpha$ , где  $\alpha$  — угол наклона верхового откоса ядра (экрана) к горизонту (рис. 29).

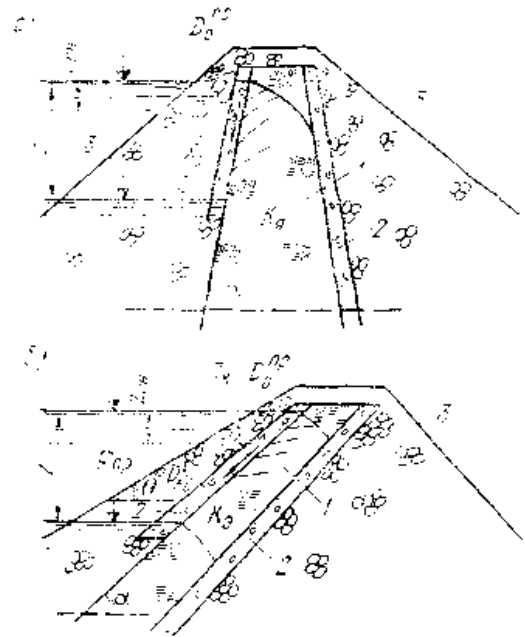
Если условие (76) не удовлетворяется, это указывает на то, что снижение уровня воды в бьефе  $Z$  нельзя допускать больше снижения уровня воды в грунте ядра, экрана  $Z_{\text{сн}}$ .

В этом случае сработка уровня воды в бьефе должна следовать за снижением уровня воды в грунте ядра, экрана, т. е. должно выдерживаться условие

$$Z = Z_{\text{сн}} = k_{\text{я(э)}} T. \quad (72)$$

Рис. 29. К расчету фильтрационной прочности земляных плотин при сработке (снижении) уровня воды в водохранилище

*a* — плотина с ядром; *b* — плотина с экраном; 1 — ядро (экран) плотины; 2 — переходные зоны; 3 — призмы плотины;  $K_{\text{я}}$ ,  $K_{\text{э}}$  — коэффициенты фильтрации ядра, экрана;  $\alpha$  — угол наклона верховой грани ядра (экрана) к горизонту;  $J_{\text{к}}$  — размывающий градиент напора, при стекании воды по откосу;  $D_0^{i\theta}$  — средний диаметр пор материала призмы плотины (пригрузки);  $D_{50}^I$  — размер фракций фильтра;  $\varphi_{\text{пр}}$  — угол внутреннего трения материала пригрузки;  $\theta$  — угол наклона верховой грани пригрузки к горизонту;  $Z$  — снижение уровня воды в бьефе за время  $T$ ;  $Z_{\text{сн}}$  — снижение уровня грунтовых вод в ядре (экране) за то же время  $T$ .



Если условие (76) удовлетворяется, сработку (снижение) уровня воды в бьефе (по данному условию) можно допускать с опережением снижения уровня грунтовой воды в ядре (экране), т. е. режим сработки водохранилища может выполняться по условию (74), т. е.

$$Z > Z_{\text{сн}}$$

2°. *Несвязный грунт ядра, экрана.* В этом случае проверка его на фильтрационную прочность, при контактном размыве, должна осуществляться, исходя из следующих условий:

I. Если удовлетворяется неравенство:

$$\frac{d_{ci}}{D_0} \geq 0,70, \quad (77)$$

где  $d_{ci}$  — диаметр фракций грунта ядра (экрана), которые могут быть вынесены фильтрационным потоком, при этом

$$d_{ci} \leq d_{5\%};$$

$D_0$  — средний размер диаметра пор грунта первого слоя фильтра, контактирующего с ядром, экраном, определяется по формуле (28).

При указанных условиях размыв и вынос фракций грунта ядра (экрана) быть не может.

II. Если неравенство (77) не удовлетворяется, т. е.

$$d_{ci} \leq 0,70 \cdot D_0, \quad (78)$$

тогда следует выполнить проверку на контактный размыв грунта ядра, экрана, если  $d_{ci} > d_{5\%}$ .

Фильтрационная прочность грунта ядра (экрана) не будет нарушена в том случае, если будет выполнено следующее условие:

$$J_{\text{к}} \leq J_{\text{разм}}, \quad (79)$$

где  $J_{\text{к}} = \sin \alpha$  (рис. 29);  $J_{\text{разм}}$  — градиент размыва мелкозернистого несвязного грунта в зоне контакта с крупнозернистым грунтом (фильтром) определяется по формуле (34);

$$J_{\text{разм}} = \frac{1}{\sqrt{\varphi_1}} \left( 2,3 + 15 \frac{d_{5\%}}{D_0} \right) \frac{d_{5\%}}{D_0} \sin \left( 30^\circ + \frac{\theta}{8} \right),$$

где  $\varphi_1 = 1$ —для окатанных фракций и  $\varphi_1 = 0,35$ —40 для угловатых;  $\theta$  — угол между направлениями скорости фильтрации и силы тяжести;  $d_{5\%}$  — расчетный размер фракций грунта ядра или экрана;  $D_0$  см. выше (77).

Если условие (79) удовлетворяется, режим сработки (снижения) уровня воды в бьефе (по данному условию) можно допустить по условию (74), т. е.

$$Z > Z_{\text{сн.}}$$

В противном случае режим сработки уровня воды в бьефе должен выполняться по условию (72), т. е.

$$Z = Z_{\text{сн}} = k_{\text{я(э)}} T.$$

Примечание. В случае тонкослойной пригрузки экрана ( $< 2,5$  м), когда распространяется пульсация (от волнового воздействия на откос) в переходную зону, фильтрационная прочность контактной зоны должна быть проверена, как указано в п. 3.7.

#### 4.4. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПРОВЕРКИ

В качестве дополнительных проверок сооружения на фильтрационную прочность, при сработке (снижении) уровня воды в бьефе, рекомендуется:

а) проверка на условие непрсыпаемости материала первого слоя фильтра переходной зоны в материал призмы плотины (или второй слой фильтра), так как при неправильном сопряжении материала первого слоя фильтра переходной зоны с материалом призмы плотины, при наполнении или сработке уровня воды в бьефе, могут произойти просадочные деформации. Следует учитывать, что сыпучий материал при смачивании водой имеет тенденцию к расплыванию и просадкам.

Нарушение прочности материала переходной зоны в зоне контакта с материалом призмы плотины происходит не будет в том случае, если удовлетворяется условие непрсыпаемости (рис.29):

$$\frac{D_0^{\text{ср}}}{D_{50}^I} \leq 1,8, \quad (68)$$

где  $D_0^{\text{ср}}$  — средний диаметр пор грунта призмы плотины (рис. 29), определяется по формуле (28);  $D_{50}^I$  — диаметр сводообразующих фракции грунта фильтра ( $D_{\text{НА}}^I$ ), контактирующего с материалом призмы плотины.

Если условие (68) не удовлетворяется, то в зоне контакта возможны некоторые просадочные деформации.

Предельно допустимое значение сводообразующих фракций  $D_{\text{НА}}^I < D_{85}$  при условии, что толщина слоя переходной зоны (фильтра) должна быть

$$T_{\text{сд}} \geq 3 \text{ м.}$$

б) Если гранулометрический состав первого слоя фильтра суффозионный\*, то в таком случае его следует проверить на фильтрационно-суффозионную прочность, при стекании воды по слою фильтра (для случая  $Z > Z_{\text{сн}}$ ).

\* Проверка грунта на суффозионность (несуффозионность) осуществляется, как указано в п. 3.3, 2°.

Гранулометрический состав грунта первого слоя фильтра следует считать суффозионнопрочным (при стекании воды по первому слою фильтра на откосе ядра, экрана, рис. 29), если выполняется следующее условие:

$$D_{5\%} \geq \frac{0,0032 \cdot \sin \alpha}{\varphi' \sqrt{\frac{n^I}{k'_o}}}; \quad (80)$$

$$\varphi' = 0,30(\gamma_{\bar{n}\bar{e}}^I - 1)f_* \quad (81)$$

$$f_* = 0,82 - 1,8n^I + 0,0062(\eta_I - 5)$$

где  $D_{5\%}$  — размер фракций грунта первого слоя фильтра, меньше которых в его составе содержится 5% по весу;  $\alpha$  — угол наклона верховой грани ядра (экрана) к горизонту (рис. 29);  $n^I$  — пористость материала первого слоя фильтра;  $k'_o$  — коэффициент фильтрации грунта фильтра;  $\gamma_{\bar{n}\bar{e}}^I$  — объемный вес скелета грунта фильтра;  $\eta_I$  — коэффициент разноразмерности фильтра.

Если условие (80) не удовлетворяется, сработка (снижение) уровня воды в бьефе должна следовать (по данному условию) за снижением уровня грунтовых вод в ядре (экране), т. е. должно выдерживаться условие

$$Z = Z_{сч} = k_{я(я)} I.$$

в) Если плотина с экраном, который имеет сверху пригрузку рис. 29, б, то в этом случае следует проверить общую устойчивость откоса пригрузки, от которой зависит общая устойчивость сооружения.

Откос следует считать устойчивым, если удовлетворяется следующее условие:

$$k = \frac{\text{tg} \varphi_{i\bar{o}}}{\text{tg} \Theta} \geq k_{\bar{c}\bar{a}\bar{i}}^{\bar{a}\bar{i}\bar{i}}, \quad (82)$$

где  $k$  — фактический коэффициент устойчивости откоса для данного грунта;  $k_{\bar{c}\bar{a}\bar{i}}^{\bar{a}\bar{i}\bar{i}}$  — допустимый коэффициент запаса (по СНиПу, часть II, 53—73);  $\varphi_{\text{пр}}$  — угол внутреннего трения материала пригрузки;  $\Theta$  — угол наклона верховой грани откоса к горизонту.

Если условие (82) не удовлетворяется, это указывает на то, что откос следует уположить, чтобы обеспечить общую устойчивость сооружения (см. сноску на стр. 63).

г) Земляные плотины или каналы, откосы которых не имеют покрытия (или имеют) см. рис. 19, проверяются на фильтрационную прочность и устойчивость по методике, приведенной в п. 3.5,2,б.

Земляные плотины, откосы которых покрыты каменным или железобетонным покрытием (плитами) на фильтровой подготовке (рис. 21), проверяются на фильтрационную прочность по методике, приведенной в п. 3.7.

д) При сработке (снижении) или наполнении бьефа следует устанавливать наблюдения за осадками сооружения, особенно в зимнее время, когда грунт может промерзнуть.

В некоторых случаях (при быстрой сработке или наполнении) оседающий незамерзший грунт может оторваться от замерзшего (рис. 30), в результате чего может произойти не только нарушение его фильтрационной прочности, но могут образоваться большие фильтрационные ходы, что может привести сооружение к нежелательным последствиям, если своевременно не будут приняты надлежащие меры.

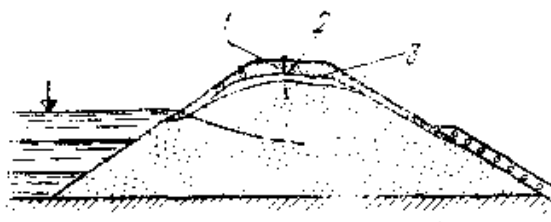


Рис. 30. Осадка тела плотины при наполнении водохранилища в зимнее время  
1 — замерзший грунт; 2 — осадка грунта; 3 — образовавшаяся щель



#### 4.5. РЕКОМЕНДАЦИИ

а) Окончательное решение о режиме сработки (снижения или наполнения) уровня воды должно приниматься после выполнения всех расчетов по проверке фильтрационной прочности всех элементов сооружения (ядра экрана, переходных зон и контактирующегося с ними материала), а также с учетом и других условий как например: климатических, возможности упрочнения сооружения, повторяемости циклов сработки и наполнения бьефа, классности сооружения и пр. В результате анализа, с учетом изложенного выше, устанавливают:

1. Если удовлетворяются все требования (условия) по обеспечению фильтрационной прочности, предъявляемые к элементам сооружения, режим сработки уровня воды бьефа может быть назначен независимо от снижения уровня грунтовых вод в ядре, экране, т. е. по условию:

$$Z > Z_{\text{сн}}$$

где  $Z$  — снижение уровня воды в бьефе;  $Z_{\text{сн}}$  — снижение уровня воды в ядре экране (откосе плотины).

2. Если не удовлетворяются все требования, предъявляемые к элементам сооружения (особенно условие (76), см. п. 4.3, 1°), режим сработки уровня воды в бьефе следует назначать по условию (72), т. е.

$$Z = Z_{\text{сн}} = Z k_{\text{я}(\text{э})} T,$$

где  $k_{\text{я}(\text{э})}$  — коэффициент фильтрации грунта ядра (экрана);  $T$  — время сработки воды в бьефе.

б) Рекомендации по режиму сработки (снижению) уровня воды в бьефе оформляются графически, как показано на рис. 32; приводится «График  $W=f(\nabla)$  объема воды в водохранилище в зависимости от отметки уровня воды в верхнем бьефе». На основе этого графика и принятого режима сработки («График сработки уровня воды в бьефе») строится «График расхода воды из водохранилища» (или «График подачи воды на ирригацию»).

Данная документация утверждается и является обязательной при проведении мероприятия по сработке водохранилища. Сработка водохранилища должна производиться в строгом соответствии с заданным режимом.

#### 4.6. ФИЛЬТРАЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ ОТКОСОВ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН И КАНАЛОВ С ЭКРАНАМИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК

На рис. 31 представлены два основных типа пленочных экранов:

**I тип** — полиэтиленовая пленка укладывается на подстилающий слой грунта и сверху покрывается незначительной толщины (~3 м) слоем грунта, без пригрузки (рис. 31, а).

**II тип** — тоже с пригрузкой (рис. 31, б).

Основным определяющим критерием надежности в работе пленочных экранов является общая устойчивость откосов плотин и каналов, а затем их фильтрационная прочность.

Исходя из указанного положения, ниже приводятся рекомендации по определению общей устойчивости и фильтрационной прочности откосов земляных плотин и каналов с экранами из полимерных пленок\*.

\* Приведенные ниже рекомендации по определению общей устойчивости откосов являются сигнальными (поверочными) и не исключают основных расчетов общей устойчивости сооружения, с учетом всех факторов и требований, предъявляемых к работе данного сооружения.

##### **I тип экрана, рис. 31, а.**

Для первого типа пленочных экранов должны быть выполнены, в основном, проверки по общей устойчивости откосов.

Откос с пленочным экраном будет обладать общей устойчивостью в том случае, если будут удовлетворяться два следующих условия [2]:

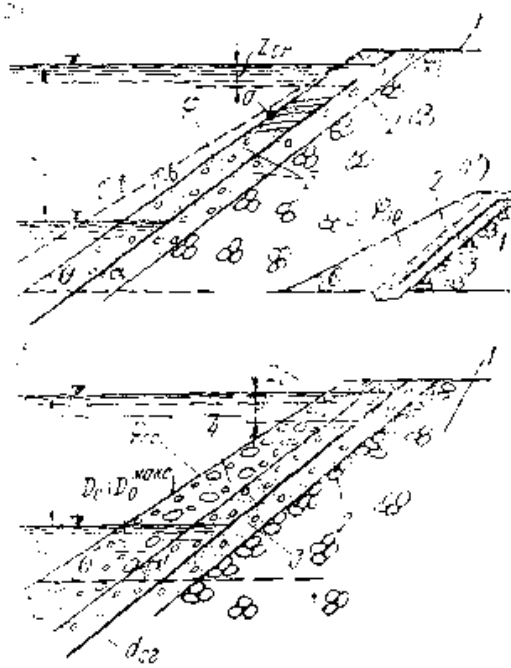


Рис. 31. Экраны из полимерных пленок земляных плотин и каналов

*a* — I тип — экран с полиэтиленовой пленкой без пригрузки; *b* — II тип — то же с пригрузкой; 1 - тело плотины (откос канала); 2 —полиэтиленовая пленка; 3 —подстилающий и прикрывающий пленку слой грунта; 4 — пригрузка;  $\theta$  — угол наклона верхней грани откоса к горизонту;  $\alpha$  — то же пленки;  $\alpha'$  — то же прикрывающего слоя грунта;  $a$  — область высачивания грунтовой воды на откос;  $m_B$  ( $m_B'$ ) — коэффициенты верхового откоса;  $\varphi$ ,  $\varphi_{пр}$  — угол внутреннего трения слоя грунта, прикрывающего пленку, и грунта пригрузки;  $D_0$ ,  $D_0^{max}$  — средний и максимальный диаметр пор материала пригрузки;  $d_{ст}$  - диаметр сводообразующих фракций грунта прикрывающего слоя;  $Z$  — снижение уровня воды в бьефе за время  $T$ ;  $Z_{сн}$  — снижение уровня грунтовых вод в грунте прикрывающего слоя за то же время  $T$ .

$$1) \quad k_3 = \frac{\text{tg } \varphi}{\text{tg } \theta} \geq k_{зап}^{доп}, \quad (83)$$

где  $k_3$  — фактический коэффициент устойчивости откоса для данного грунта;  $\varphi$  — угол внутреннего трения, прикрывающего пленку грунта;  $\theta$  — угол наклона верхней грани откоса к горизонту (рис. 31);  $k_{зап}^{доп}$  — допустимый коэффициент запаса устойчивости откоса (принимается по СНиПу, часть II, И-4-73).

$$2) \quad k_3 = \frac{f \cdot p}{\text{tg } \alpha} \geq k_{зап}^{доп}, \quad (84)$$

где  $f_{тр}$  — коэффициент трения, прикрывающего пленку грунта по пленке;  $\alpha$  — угол наклона пленки к горизонту (рис 31).

1°. Для пленочных экранов с незначительным по толщине прикрывающим слоем (толщиной  $T_{сл} < 5\text{м}$ ) должны удовлетворяться два указанных выше условия (рис. 31, *a*).

2°. Для мощных по толщине прикрывающих слоев ( $T_{сл} > 5\text{м}$ ) определяющим условием общей устойчивости откоса с пленочным экраном является первое условие (83), рис. 31, *a'*.

Примечание. В этом случае дополнительно нужно провести поверочный расчет по методу плоских поверхностей скольжения (см. «Указания по расчету устойчивости земляных откосов», ВСН-04-71, Минэнерго СССР), принимая за плоскость скольжения поверхность пленки.

3) Вопрос о фильтрационной прочности грунта откоса, прикрывающего пленку, должен решаться из условий, как указано в п. 4.2, в зависимости от режима снижения уровня воды

в бьефе  $Z$  и снижения воды в грунте откоса  $Z_{\text{сн}}$ :

а) если величина снижения уровня воды в грунте откоса за время  $T$  будет  $Z_{\text{сн}} \geq Z$ , то фильтрационная прочность откоса обеспечивается;

б) если же  $Z_{\text{сн}} < Z$ , то в этом случае будет иметь место высачивание грунтовой воды на откос. При этом в зоне «а» (рис. 31, а) под действием фильтрационных сил может произойти местный выпор грунта.

В данном случае соответствующие расчеты и рекомендации по обеспечению прочности и устойчивости откоса следует выполнить по методике, изложенной в п. 3.5, 2, б) «Выпор грунта при выходе фильтрационного потока на откос».

**Примечание.** Если за экраном снижение грунтовых вод  $Z_{\text{сн}}$  происходит значительно медленнее снижения уровня воды в бьефе  $Z$ , то в этом случае следует проверить устойчивость экрана на противодействие.

4) В случае открытого канала с пленочным экраном допустимая неразмывающая скорость водного потока  $v_{\text{доп}}$  определяется гидравлическими расчетами, в зависимости от материала крепления русла (дна и стенок канала).

**II тип экрана (рис. 31,б)** отличается от первого тем, что на прикрывающий сверху пленки слой грунта укладывается пригрузка (толщиной слоя 5 м и более) из грунтового материала (песчано-гравелистого, щебеночного, каменная наброска).

Для такой конструкции пленочного экрана вопрос устойчивости откосов определяется устойчивостью откоса пригрузки.

1°. Откос пригрузки будет обладать общей устойчивостью в том случае, если удовлетворится условие (83), т. е.

$$k_3 = \frac{t_{\text{г}} \varphi_{\text{пр}}}{t_{\text{г}} \theta} \geq k_{3\text{ан}},$$

где буквенные обозначения те же, что и в (83);  $\varphi_{\text{пр}}$  — угол внутреннего трения материала пригрузки.

Если указанное выше условие (83) не удовлетворяется, то в этом случае, в первую очередь, следует решить вопрос об уположении откоса (как показано на рис. 31, а,  $m_b'$  — пунктир), при условии, что сопрягающиеся грунты откоса обладают фильтрационной прочностью (см. ниже).

Если же условие (83) удовлетворяется, то в этом случае следует выполнить проверочные расчеты по определению фильтрационно-суффозионной прочности сопрягающихся материалов экрана: прикрывающего слоя и пригрузки.

2°. Фильтрационная прочность при сопряжении грунтов прикрывающего пленку слоя и пригрузки должна решаться по следующим двум условиям:

1. Если прикрывающий пленку грунт является несвязным (сыпучим) грунтом, т. е. имеющим число пластичности  $W_{\text{п}} < 3$  (3), то в этом случае сопряжение его с пригрузкой должно удовлетворять условию непросыпаемости [6]:

$$\frac{D_0}{d_{\text{сг}}} \leq 1,8 \quad (68)$$

где  $D_0$  — средний диаметр пор материала пригрузки, определяется по формуле (28);  $d_{\text{сг}}$  — диаметр сводообразующих фракций грунта прикрывающего слоя (рис. 31,б).

Причем  $d_{\text{сг}} \leq d_{50}$  прикрывающего слоя грунта.

**Примечание.** За максимальный размер фракций  $d_{\text{сг}}$  могут быть приняты фракции прикрывающего пленку слоя грунта  $d_{\text{сг}} \leq d_{85}$ . При этом сработка (снижение) уровня воды в бьефе должна следовать за снижением грунтовых вод, т. е. должно выдерживаться условие (70)  $Z = Z_{\text{сн}} = k_{\text{пр}} T$ , где  $k_{\text{пр}}$  — коэффициент фильтрации грунта, прикрывающего пленку.

2. Если грунт прикрывающего пленку слоя является связным (с  $W_{\text{п}} \geq 5$ ), то в этом случае вопрос о фильтрационной прочности должен решаться из условия, как указано в п. 4.2, в зависимости от снижения уровня воды в бьефе  $Z$  и снижения уровня грунтовой воды в материале прикрывающего слоя  $Z_{\text{сн}}$ , т. е. если величина снижения уровня грунтовой воды  $Z_{\text{сн}}$  за время  $T$  будет  $Z_{\text{сн}} \geq Z$ , то фильтрационная прочность контактной зоны обеспечивается. Однако при этом максимальный диаметр пор пригрузки  $D_0^{\text{макс}} \leq 15$  мм.

Если же  $Z_{\text{сн}} < Z$ , то в этом случае будет иметь место высачивание грунтовой воды на откос и

стекание ее по откосу прикрывающего слоя грунта, вследствие чего может происходить контактный размыв грунта прикрывающего слоя.

В этом случае фильтрационная прочность контактной зоны будет обеспечена, если удовлетворяется следующее условие

$$J_{\text{раз}} \leq J_{\text{кр}} \quad (86)$$

где  $J_{\text{раз}} = \sin \alpha'$  (см. рис. 31, б);

$$J_{\text{кр}} = \frac{1}{\sqrt{D_0^{\text{макс}}}} = 0,75,$$

где  $D_0^{\text{макс}}$  — максимальный диаметр пор пригрузки, определяется по формуле (22).

При соблюдении приведенных выше условий будет обеспечена устойчивость и фильтрационная прочность сооружения с пленочным экраном, а следовательно, и надежная его работа в период эксплуатации.

Рекомендации по сработке (снижению) уровня воды в бьефе оформляются, как указано в п. 4.4, б (рис. 32).

## Раздел 5. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА МЕСТНОЙ ФИЛЬТРАЦИОННО-СУФФОЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ГРУНТА ТЕЛА ПЛОТИНЫ И ГРУНТА ОСНОВАНИЯ

**Пример 1.** Однородная плотина намыта из песка основания — слой I. В основании плотины залегает песчаный слой — I и песчано-гравелистый слой — II; рис. 12, а, область А.

Требуется определить:

- а) суффозионность (несуффозионность) грунта тела плотины и грунтов основания;
- б) критический градиент суффозии, допустимый;
- в) размывающие градиенты напора в зоне контактов.

Состав грунтов

а) Грунт тела плотины и I слоя основания:  
 $d_{\text{мин}} = 0,01$  мм;  $d_3 = 0,02$  мм;  $d_{10} = 0,10$  мм;  $d_{17} = 0,14$  мм;  $d_{60} = 1,0$  мм;  $d_{\text{макс}} = 3,0$  мм; объемный вес  $\gamma_{\text{ск}} = 1,77$  г/см<sup>3</sup>; коэффициент разности зернистости  $\eta = d_{60}/d_{10} = 10$ ; пористость  $n = 0,33$ ; коэффициент фильтрации  $k_{\text{ф}} = 0,012$  см/сек.

б) Грунт II слоя основания:  
 $D_{\text{мин}} = 0,20$  мм;  $D_{10} = 0,31$  мм;  $D_{17} = 0,44$  мм;  $D_{60} = 3,0$  мм;  $D_{\text{макс}} = 20,0$  мм; коэффициент разности зернистости  $\eta_{\text{II}} = 9,7$ ; пористость  $n_{\text{II}} = 0,33$ ; коэффициент фильтрации  $k_{\text{ф}} = 0,12$  см/сек.

1) Определяем суффозионность грунта тела плотины и грунта I слоя основания (тело плотины намыто из грунта основания I слоя).

По зависимости (22) определяем диаметр максимальных фильтрационных пор в грунте

$$d_0^{\text{макс}} = 0,455 \times \sqrt[3]{\frac{n}{1-n}} d_{17} = 0,455 \cdot 1,50 \sqrt[3]{10} \frac{0,33}{1-0,33} 0,14 \cong 0,07 \text{ мм.}$$

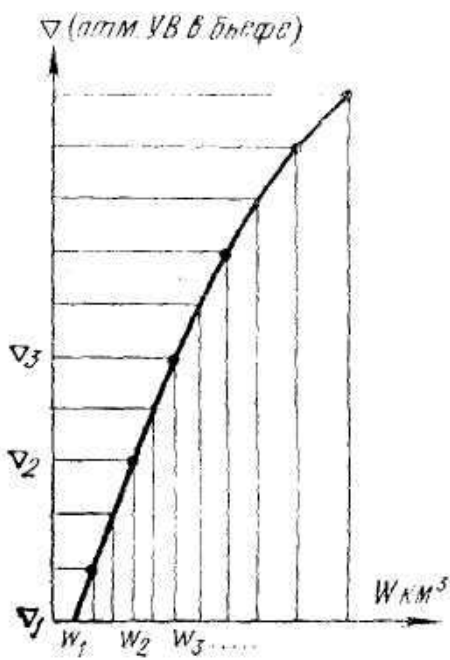
Коэффициент неравномерности раскладки частиц в грунте или коэффициент локальности суффозии  $k$  определяется по формуле (23):

$$k = 1 + 0,05\eta = 1 + 0,05 \cdot 10 = 1,50.$$

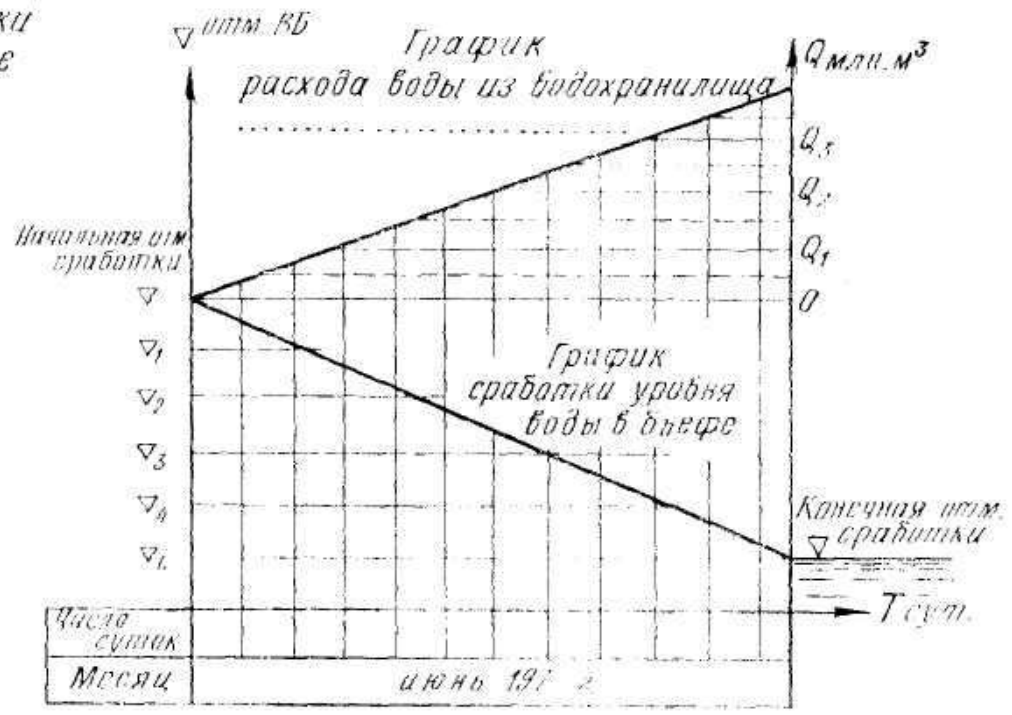
Максимальную крупность частиц, которые могут быть вынесены из грунта, определяем по формуле (24):

$$d_{\text{cl}}^{\text{макс}} = 0,77 d_0^{\text{макс}} = 0,77 \cdot 0,07 = 0,054 \text{ мм.}$$

График  $W = f(v)$   
 объема воды в водохранилище  
 в зависимости от отметки  
 уровня воды в верхнем бьефе



УТВЕРЖДАЮ: .....



СОСТАВИЛ: .....

Рис. 32. Оформление рекомендаций по сработке (снижению) уровня воды в водохранилище.

В данном грунте частиц, меньших 0,054 мм, содержится 8% (>3%), следовательно данный грунт следует считать суффозионным.

2) Определим значение критического градиента суффозии, при котором могут быть вынесены из грунта суффозионные частицы ( $d_{ci}$ ), начиная от  $d_{ci}^{i\hat{a}e\hat{n}}$  и меньше ( $d_{ci} = 3\%$ ).

Значение критического градиента суффозии определяется по зависимости (29)

$$J_{кр} = \varphi_0 d_{ci} \sqrt{\frac{ng}{\gamma k_{\phi}}}, \quad (29)$$

где  $\varphi_0$  — коэффициент критической скорости, определяется по формуле (30):

$$\varphi_0 = 0,60 \left( \frac{\gamma_{ск}}{\gamma_{в}} - 1 \right) f_* \sin \left( 30^\circ + \frac{\theta}{8} \right) = 0,60 \left( \frac{1,77}{1} - 1 \right) 0,26 \sin \left( 30^\circ + \frac{90^\circ}{8} \right) = 0,079;$$

$$\gamma_{ск} = 1,77 \text{ г/см}^3; \quad \gamma_{в} \approx 1 \text{ г/см}^3; \quad \theta \approx 90^\circ;$$

$$f_* = 0,82 - 1,8\pi + 0,0062(\eta - 5) = 0,82 - 1,8 \cdot 0,33 + 0,0062(10 - 5) = 0,26.$$

После подстановки значений в (29), получим

$$J_{кр} = 0,079 d_{ci} \sqrt{\frac{0,33 \cdot 981}{0,01 \cdot 0,012}} = 127 d_{ci};$$

$$J_{кр} = 127 d_{ci}. \quad (29')$$

Подставляя значения  $d_{ci}$  в (29'), от  $d_{ci}^{i\hat{a}e\hat{n}}$  и меньше, получим значение критического градиента суффозии для каждого размера суффозионных частиц (по которым может быть определен % выноса).

а) Если подставить в (29')  $d_{ci}^{i\hat{a}e\hat{n}} = 0,054 \text{ мм} = 0,0054 \text{ см}$ , то получим:

$$J_{кр} = 127 \cdot 0,0054 \approx 0,70,$$

т.е. для выноса частиц  $d_{ci}^{i\hat{a}e\hat{n}} = 0,054 \text{ мм}$  (8%) потребуется градиент напора  $J \geq 0,70$ .

б) Для определения градиента напора, при котором не нарушается прочность грунта, в (29') следует подставить  $d_{ci} = 3\%$ , т.е.  $d_{ci} = d_3 = 0,02 \text{ мм} = 0,002 \text{ см}$ .

После подстановки получим:

$$J_{кр} = 127 \cdot 0,002 = 0,254.$$

Следовательно, для того, чтобы в данном грунте тела плотины и в I слое основания не возникла бы опасная механическая суффозия, допустимый градиент напора в нем, с учетом коэффициента запаса ( $k_3$ ), должен быть:

$$J_{доп} \leq \frac{1}{k_3} J_{кр} = \frac{1}{1,10} 0,254 = 0,23.$$

При проверке тела плотины и основания на казуальную (общую) фильтрационную прочность грунта, допустимый контролирующий градиент напора ( $J_{кд}$ ), определяемый по табл. 1 и 2, должен быть меньше или равен допустимому, т. е.

$$(J_{к})_{доп} \leq J_{доп}. \quad (a)$$

3) Определяем суффозионность II слоя грунта основания.

По зависимости (22) определяем диаметр максимальных фильтрационных пор в грунте

$$D_0^{\max} = 0,455 \cdot 1,49 \sqrt[3]{9,7 \frac{0,33}{1 - 0,33}} 0,44 = 0,22 \text{ мм};$$

$$z = 1 + 0,05\eta = 1 + 0,05 \cdot 9,7 = 1,49.$$

Максимальная крупность частиц, которые могут быть вынесены из данного грунта, определим по формуле (24):

$$d_{ci}^{\max} = 0,77 D_0^{\max} = 0,77 \cdot 0,22 = 0,17 \text{ мм}.$$

Согласно зависимости (25), если максимальный размер суффозионных частиц  $d_{ci}^{i\ddot{a}e\ddot{n}}$  меньше минимального размера частиц грунта  $D^{мин}$ , что имеем в данном случае, т. е.

$$d_{ci}^{макс} < D^{мин} (0,17 \text{ мм} < 0,20 \text{ мм}),$$

то данный грунт (II слоя основания) является несущим. Из его состава не могут быть вынесены даже самые мелкие его частицы при любом значении градиента напора.

Следовательно, фильтрационная прочность его, в отношении механической суффозии, будет обеспечена при любых гидродинамических условиях.

4) Определение размывающих градиентов напора в зоне контактов. В данном примере принято — грунт тела плотины и I слой грунта основания одинаковы. Следовательно, контактная фильтрация будет иметь место между I и II слоями основания (рис. 12, а, область А).

Критический градиент контактного размыва несвязных грунтов определяется по зависимости (34):

$$J_{раз} = \frac{1}{\varphi_1} \left( 2,3 + 15 \frac{d_{ci}}{D_0} \right) \frac{d_{ci}}{D_0} \sin \left( 30^\circ + \frac{\theta}{8} \right),$$

где  $\varphi_1 = 1$  — коэффициент, учитывающий форму и шероховатость частиц;  $d_{ci} = d_{3\%} = 0,02$  мм — размер частиц мелкозернистого грунта I слоя основания, содержащихся в нем 3% и меньше, от выноса которых прочность контактной зоны не нарушается;  $D_0$  — средний диаметр фильтрационных пор крупнозернистого грунта II слоя основания, определяется по зависимости (28):

$$D_0 = 0,455 \sqrt[3]{\frac{n_{II}}{1-n_{II}}} \quad D_{IT} = 0,455 \sqrt[3]{\frac{0,33}{1-0,33}} \cdot 0,44 = 0,14 \text{ мм};$$

$\theta$  — угол между направлениями скорости фильтрации и силы тяжести.

После подстановки значений в (34), получим:

$$J_{раз} = \frac{1}{1} \left( 2,3 + 15 \frac{0,02}{0,14} \right) \frac{0,02}{0,14} \sin \left( 30^\circ + \frac{90^\circ}{8} \right) = 0,42.$$

Допустимый размывающий градиент напора, с учетом коэффициента запаса, будет:

$$(J_{раз})_{доп} \leq \frac{1}{k_{з.п}} J_p = \frac{1}{1,10} 0,42 = 0,38.$$

Из приведенных расчетов следует, что за расчетный допустимый контролирующий градиент напора для данного случая следует принять минимальный градиент суффозии по зависимости (а), т.е.

$$(J_k)_{доп} \leq J_{доп} = 0,23.$$

**Пример 2.** Плотина имеет трубчатый дренаж (рис. 12, а и рис. 20). Требуется определить для данного типа дренажа размеры дренажной призмы, если грунт тела и основания плотины имеет физические характеристики, принятые в примере 1.

В п. 3.6 сказано: чтобы не происходило деформаций грунта в области дренажа, размеры дренажной призмы должны быть такими, чтобы входной градиент напора  $J_{вх}$  был бы меньше или равен допустимому, т. е.

$$J_{вх} \leq J_{доп} = \frac{1}{k_{зап}} J_{кр}. \quad (20)$$

Из примера 1 имеем  $J_{а\ddot{r}} = \frac{1}{k_{с\ddot{a}i}} J_{с\ddot{d}} = 0,23$ , следовательно  $J_{вх} \leq 0,23$ .

Для определения размеров дренажной призмы, из формулы (50) следует определить  $\omega$  — площадь живого сечения фильтрационного потока, входящего в дренажную призму и отнесенную к 1 пог. м дренажа (рис. 20);

$$\omega = 1 \cdot L = \frac{Q}{k_{\phi} J_{вх}}. \quad (6)$$

Расчетные данные:

— фильтрационный расход в дренаж  $Q = 0,093$  л/сек =  $8,0$  м<sup>3</sup>/сут,

— коэффициент фильтрации грунта тела (и основания) плотины  $k_{\phi} = 0,012 \text{ см/сек} = 10,4 \text{ м/сут}$ ;

— входной градиент напора должен быть меньше или равен допустимому, принимаем  $J_{\text{вх}} = J_{\text{доп}} = 0,23$ .

После подстановки значений в (б) получим (рис. 20):

$$\omega = l \cdot L = \frac{Q}{k_{\phi} J_{\text{вх}}} = \frac{8,0}{10,4 \cdot 0,23} = 3,35 \text{ м}^2,$$

откуда

$$L = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 = 3,35 \text{ м},$$

При данном размере смоченного периметра дренажной призмы, входной градиент  $J_{\text{вх}}$  будет равен допустимому  $J_{\text{доп}}$ .

Отдельные размеры дренажной призмы по рис. 20 могут быть назначены:

$$\begin{aligned} l_1 &= 0,10 \text{ м} \\ l_2 &= 1,20 \text{ м} \\ l_3 &= 1,00 \text{ м} \\ l_4 &= 1,20 \text{ м} \\ l_5 &= 0,10 \text{ м} \\ \hline L &= 3,60 \text{ м}. \end{aligned}$$

**Пример 3.** Бетонная плотина расположена на песчаном основании, имеющем следующие основные физические характеристики грунта:

— объемный вес сухого грунта  $\gamma_{\text{ск}} = 1,77 \text{ г/см}^3$ ;

— пористость  $n = 0,33$ ;

— удельный вес материала частиц грунта  $\Delta = 2,65 \text{ г/см}^3$ ;

— напор на плотину  $Z = 20 \text{ м}$ .

На рис. 15 приведен выходной фрагмент подземного контура плотины с линиями равных напоров и эпюрой выходных градиентов напора  $J_{\text{вых}} = f(x)$ . Линии равных напоров построены через  $0,1Z$ .

Максимальное значение выходного градиента напора в нижний бьеф (согласно фильтрационным исследованиям) соответствует значению  $J_{\text{вых}} \approx 1,58$ .

Требуется определить:

а) критический градиент выпора для данного грунта основания;

б) толщину и длину пригрузки в области выхода фильтрационного потока в нижний бьеф.

Для решения указанных выше вопросов следует пользоваться указаниями, приведенными в п. 3.5, 2°(1).

1. Определение критического градиента выпора  $J_{\text{кр}}$  для данного грунта основания при отсутствии пригрузки в месте выхода фильтрационного потока в нижний бьеф.

Критический градиент выпора определяется по зависимости:

$$J_{\text{кр}}^{\text{в}} = \left( \frac{\Delta}{\gamma_{\text{в}}} - 1 \right) (1 - n) = \left( \frac{2,65}{1} - 1 \right) (1 - 0,33) = 1,10; \quad (41)$$

где  $\Delta = 2,65 \text{ г/см}^3$ ;  $\gamma \approx 1,0 \text{ г/см}^3$ ;  $n = 0,33$ .

Значение  $J_{\text{вых}} > J_{\text{кр}}^{\text{в}}$  ( $1,58 > 1,10$ ). В таком случае должна быть устроена пригрузка в область выхода фильтрационного потока в нижний бьеф.

2. Определение толщины и длины пригрузки. Толщина слоя пригрузки  $T$  определяется по формуле (43):



$$T = t \left( J_{\text{вых}} - J_{\text{кр}}^{\text{в}} \right) \frac{\gamma_{\text{в}}}{\gamma_{\text{пр}}} k_{\text{зап}}$$

Определим значения, входящие в формулу (43).

$t$  — толщина слоя грунта основания, соответствующая критической глубине зоны выпора, определяется по приведенной в п. 3.5, 2°(1) методике.

На выходном фрагменте подземного контура сооружения, через его конечную точку проводится расчетная вертикаль «у», как показано на рис. 15.

На этой расчетной вертикали строится эпюра распределения градиентов  $J = f(y)$  по точкам пересечения расчетной вертикали «у» с линиями равных напоров (точки 1, 2, 3, ...).

Для приведенного примера по рис. 15, расстояния по вертикали от поверхности нижнего бьефа (от точки А), соответствующие заглублениям точек 1, 2, 3, ..., напоры и градиенты будут:

$$y_1 = 1,6 \text{ м} \rightarrow \Delta h_{y_1} = 2 \text{ м} \rightarrow J_{y_1} = 1,25$$

$$y_2 = 4,2 \text{ м} \rightarrow \Delta h_{y_2} = 4 \text{ м} \rightarrow J_{y_2} = 0,96$$

$$y_3 = 6,8 \text{ м} \rightarrow \Delta h_{y_3} = 6 \text{ м} \rightarrow J_{y_3} = 0,88.$$

По полученным данным строится эпюра  $J_y = f(y)$ , как показано на рис. 17.

По полученному значению  $J_{\text{до}}^{\text{а}} = 1,10$ , отложенному по оси  $J_y$  (рис. 17), определяется толщина слоя  $t = y_{\text{до}}^{\text{а}}$ .

В данном случае  $t = 2,50 \text{ м}$ ;  $J_{\text{вых}} = 1,58$ ;  $J_{\text{до}}^{\text{а}} = 1,10$ ;  $\gamma_{\text{в}} \approx 1 \text{ т/м}^3$ ;  $\gamma_{\text{пр}} = 1,80 \text{ т/м}^3$  (объемный вес материала пригрузки);  $k_{\text{зап}} = 1,50$ .

После подстановки значений в (43) получим толщину слоя пригрузки

$$T = 2,50 (1,58 - 1,10) \frac{1}{1,80} 1,50 = 1,0 \text{ м}.$$

Длина пригрузки  $b_{\text{пр}}$  определяется по эпюре выходных градиентов  $J_{\text{вых}} = f(x)$ .

Зная  $J_{\text{кр}} = 1,10$ , находим на линии  $J_{\text{вых}} = f(x)$  точку, соответствующую  $J_{\text{кр}} = 1,10$ , и в масштабе определяем  $x_{\text{кр}} = 3 \text{ м}$ , с учетом  $k_{\text{зап}} = 1,5$  получим

$$l_{\text{пр}} = k_{\text{зап}} \cdot x_{\text{кр}} = 1,5 \cdot 3 = 4,5 \text{ м}.$$

Примечания: 1. Материал пригрузки может быть в сухом или во взвешенном состоянии (при наличии воды в НБ).

2. Материал пригрузки в зоне контакта с грунтом основания должен укладываться по принципу обратного фильтра.

**Пример 4.** В основании плотины (рис. 12, а, область Б; рис. 18) залегает относительно тонкий глинистый (I) слой грунта толщиной  $t_{\text{сл}} = 4 \text{ м}$ . Второй слой (II) песчано-гравелистый. Действующий на плотину напор  $Z = (V_{\text{УВБ}} - V_{\text{УНБ}}) = 20 \text{ м}$ .

В данном случае требуется:

а) проверить слой глинистого грунта основания в области нижнего бьефа на местный фильтрационный выпор;

б) наметить соответствующие мероприятия, обеспечивающие фильтрационную прочность грунта основания при выходе фильтрационного потока в нижний бьеф.

1. Определяем действующий градиент выпора в нижнем бьефе на слой глинистого грунта толщиной  $t_{\text{сл}} = 4 \text{ м}$  по приближенной зависимости (47)

$$J_{\text{вып}} \cong \frac{0,5Z}{t_{\text{сл}}} = \frac{0,5 \cdot 20}{4} = 2,5.$$

Для данного глинистого грунта основания критический градиент выпора (при отсутствии пригрузки) будет:

$$J_{\text{кр}}^{\text{в}} = \left( \frac{\Delta}{\gamma_{\text{в}}} - 1 \right) (1 - n) = \left( \frac{2,72}{1} - 1 \right) (1 - 0,37) = 1,08,$$

где  $\Delta = 2,72 \text{ г/см}^3$  — удельный вес частиц глинистого грунта;  $\gamma_{\text{в}} \approx 1 \text{ г/см}^3$  — объемный вес воды;  $n = 0,37$  — пористость глинистого грунта.

Из сопоставления градиентов, имеем:

$$J_{\text{вып}} > J_{\text{кр}}^B \quad (2,5 > 1,08),$$

что указывает на необходимость защиты глинистого грунта от выпора в области нижнего бьефа.

2. Выбор мероприятий для обеспечения фильтрационной прочности грунта основания в области нижнего бьефа.

Для обеспечения фильтрационной прочности глинистого грунта основания в нижнем бьефе могут быть намечены два варианта мероприятий (рис. 18):

- 1) пригрузка слоем более крупнозернистого грунта, соответствующей толщины и длины;
- 2) устройство вертикального разгрузочного дренажа.

В данном случае, при градиенте выпора  $J_{\text{вып}} = 2,5$ , потребуется толщина слоя пригрузки (при  $\gamma_{\text{пр}} = 1,75 \text{ т/м}^3$  и  $n = 0,34$ ), при отсутствии воды в нижнем бьефе:

$$T = t_{\text{сз}} (J_{\text{вып}} - J_{\text{кр}}^B) \frac{\gamma_{\text{в}}}{\gamma_{\text{пр}}} k_{\text{ззп}} = 4 (2,5 - 1,08) \frac{1}{1,75} \cdot 1,5 = 5 \text{ м.}$$

При наличии воды в нижнем бьефе, когда материал пригрузки взвешен, т. е. при

$$\gamma_{\text{пр}}^{\text{взв}} = \gamma_{\text{ск}} - (1 - n) \gamma_{\text{в}} = 1,75 - (1 - 0,34) \cdot 1 = 1,09 \text{ т/м}^3$$

толщина пригрузки

$$T = 4 (2,50 - 1,08) \frac{1}{1,09} \cdot 1,5 = 7,8 \text{ м.}$$

Очевидно, в данном случае потребуется устройство вертикального разгрузочного дренажа (рис. 18).

Окончательное решение может быть принято в результате технико-экономического сравнения вариантов.

**Пример 5.** Каменно-земляная плотина с суглинистым ядром устраивается в узком каньоне на трещиноватой скале основания, рис. 12, б.

Требуется, в целях обеспечения фильтрационной прочности материала ядра в зоне примыкания к трещиноватой скале основания, подобрать из материала ядра более качественный состав грунта для укладки его в контактную зону.

На рис. 23 представлена «Зона гранулометрического состава материала ядра плотины», очерченная снизу пунктиром и сверху сплошной линией (ВП).

Содержание глинистых частиц  $d < 0,005 \text{ мм}$  колеблется в пределах от 5 до 15%.

Максимальные фракции:

- а) нижний предел зоны (пунктир) — 100 мм;
- б) верхний предел зоны — 6 мм.

Преобладающий размер ширины трещин скалы основания составляет  $b_{\text{ш}} = 1,5 \text{ мм}$ .

Для подбора из того же состава материала ядра более качественного его состава, пригодного для укладки в зоне контакта с трещиноватой скалой основания, следует руководствоваться рекомендациями, приведенными в разделе 3.9.

1. Определение нижнего предела гранулометрического состава грунта-«Зоны П» (рис. 23, а, НП).

- а) Минимальный объемный вес грунта  $\gamma_{\text{ск}}'$ , укладываемого в зону контакта, должен быть:

$$\gamma_{\text{ск}}' \geq \frac{\Delta}{1 + s_{\text{T}}} \quad (61)$$

В данном случае имеем:

— удельный вес материала частиц грунта ядра  $\Delta = 2,70 \text{ г/см}^3$  ;

— верхний предел пластичности  $W_{\text{T}} = 35,5 \%$  ;

— объемный вес воды  $\gamma_{\text{в}} \cong 1 \text{ г/см}^3$ .

Коэффициент пористости на пределе текучести  $W_{\text{T}}$ , определяется по формуле (62):

$$e_{\text{T}} = \frac{\Delta W_{\text{T}}}{100 \gamma_{\text{в}}} = \frac{2,70 \cdot 35,5}{100 \cdot 1} = 0,96.$$

После подстановки значений в (61), получим:

$$\gamma_{ск}' \geq 1 + \frac{2,70}{0,96} = 1,33 \text{ г/см}^3.$$

б) Нижний предел гранулометрического состава грунта «Зоны П» должен удовлетворять условию (63):

$$\frac{D_{17(я)}^2}{D_{17(н.п)}^2} \approx 2 - 5.$$

где  $D_{17(я)} = 0,05$  мм — диаметр фракций нижнего предела грунта, укладываемого в толщину ядра плотины (вне зоны контакта);  $D_{17(н.п)} = 0,02$  мм — диаметр фракций грунта нижнего предела «Зоны П».

После подстановки значений в (63), получим:

$$\frac{0,05^2}{0,02^2} = 6,25.$$

условие (63) приблизительно удовлетворяется.

2. Определение верхнего предела гранулометрического состава грунта «Зоны П» (рис. 23, б).

Верхний предел гранулометрического состава грунта «Зоны П» назначается, исходя из условий трещиноватости скалы основания (преобладающего размера ширины трещин) или ожидаемой трещиноватости (бетонной подушки, пробки) в период эксплуатации сооружения.

В данном примере преобладающий размер трещин составляет  $b_{щ} = 1,5$  мм.

Неразмываемость грунта ядра плотины по трещинам будет обеспечена в том случае, если удовлетворится условие (65), т.е.

$$b_{щ} \leq 1,8d_{85(в.п)}.$$

В данном случае (рис. 23, а)  $d_{85} = 0,90$  мм, при этом размер трещин может быть:

$$b_{щ} \leq 1,8 \cdot 0,90 = 1,62 \text{ мм},$$

т. е. условие (65) удовлетворяется.

Следовательно, в целях обеспечения фильтрационной прочности грунта ядра в примыкании к бортам каньона может быть рекомендован для укладки в контактную зону гранулометрический состав грунта «Зоны П», рис. 23, а.

**Пример 6.** Плотина из грунтовых материалов с ядром (диафрагмой) и висячим зубом (шпунтовым, грунтовым, асфальтобетонным) расположена на водопроницаемом основании с неограниченной мощностью, рис. 25, а.

Требуется проверить на местную фильтрационную прочность грунт основания в области сопряжения зуба, при выходе фильтрационного потока в низовую призму плотины.

#### Расчетные данные

$Z = 60$  м — напор воды на плотину, рис. 25, а.

$S = 12$  м — глубина зуба.

Расчетная схема представлена на рис. 26.

#### Состав грунтов

а) Грунт основания плотины:

$$d_{\text{мин}} = 0,01 \text{ мм}; d_{10} = 0,10 \text{ мм}; d_{17} = 0,14 \text{ мм}; d_{25} = 0,20 \text{ мм};$$

$$d_{50} = 0,60 \text{ мм}; d_{60} = 1,0 \text{ мм}; d_{100} = 3,0 \text{ мм};$$

$$\eta = 10; n = 0,33; \gamma_{ск} = 1,77 \text{ г/см}^3; \Delta = 2,65 \text{ г/см}^3.$$

Грунт основания суффозионный (см. пример 1).

б) Материал низовой призмы плотины:

$$D_{10} = 10,0 \text{ мм}; D_{17} = 30,0 \text{ мм}; D_{50} = 200 \text{ мм}; \\ D_{60} = 350 \text{ мм}; D_{100} = 1500 \text{ мм}; \\ \eta = 35; n = 0,30.$$

1. Определяем максимальное значение градиента напора при выходе фильтрационного потока в низовую призму плотины по зависимости (19):

$$J_{\text{вых}}^{\text{макс}} = 0,318 \frac{Z}{S} = 0,318 \frac{60}{12} = 1,59.$$

2. Определяем для данного грунта основания допустимое значение градиента напора  $J_{\text{доп}}$ , при котором не будет происходить нарушение его фильтрационной прочности

$$J_{\text{доп}} = \frac{1}{k_{\text{зап}}} J_{\text{кр}}, \quad (21)$$

где

$$k_{\text{зап}} = 1,2; J_{\text{кр}} = \left( \frac{\Delta}{\gamma_{\text{в}}} - 1 \right) (1 - n) = \left( \frac{2,65}{1} - 1 \right) (1 - 0,33) = 1,1.$$

После подстановки значений в (21), получим:

$$J_{\text{доп}} = \frac{1}{1,2} \cdot 1,1 = 0,92.$$

Следовательно, основное условие (20) не удовлетворяется:

$$J_{\text{вых}}^{\text{макс}} > J_{\text{доп}} \quad (1,59 > 0,92).$$

В этом случае должна быть выполнена проверка на условие непросыпаемости (недавливаемости) грунта основания в поры материала низовой призмы плотины.

3) Условие непросыпаемости (недавливаемости) грунта основания в поры материала низовой призмы плотины будет обеспечено, если удовлетворяется неравенство (68), т. е.

$$\frac{D_0^n}{d_{\text{сг}}} \leq 1,8,$$

где  $D_0^n$  — средний диаметр пор материала низовой призмы определяем по формуле (28):

$$D_0^n = 0,455 \sqrt[n]{\frac{n_n}{1 - n_n}} D_{17} = 0,455 \sqrt[0,30]{\frac{35}{1 - 0,3}} \cdot 30 = 10,5 \text{ мм},$$

$d_{\text{сг}} = d_{25} = 0,25 \text{ мм}$  (для суффозионного грунта основания  $d_{\text{сг}} = d_{25}$ )

После подстановки значений, получим:

$$\frac{D_0^n}{d_{25}} = \frac{10,5}{0,25} = 52,5 \gg 1,8,$$

т. е. условие непросыпаемости не удовлетворяется.

Из приведенного выше следует, что не удовлетворяются основное условие (20) и условие (68).

В таком случае необходимо предусмотреть одно из двух мероприятий, т. е. или увеличить длину зуба  $S$ , или в основании низовой призмы плотины предусмотреть укладку слоя фильтра.

Технико-экономические расчеты показывают, что в целях обеспечения фильтрационной прочности грунта основания, предпочтительнее выполнить укладку слоя фильтра в основании низовой призмы плотины.

4) Гранулометрический состав фильтра может быть подобран из условия (68), где вместо  $D_0^n$  следует принять  $D_0^*$  — средний диаметр пор материала фильтра, т. е.

$$D_0^* \leq 1,8 d_{\text{сг}} = 1,8 \cdot 0,20 = 0,36 \text{ мм}.$$

В качестве материала фильтра может быть принят песчано-галечниковый грунт фракций:

$$D_{10} = 0,70 \text{ мм}; D_{17} = 1,0 \text{ мм}; D_{50} = 8,0 \text{ мм}; D_{60} = 10,5 \text{ мм}; \\ D_{100} = 80 \text{ мм}; \eta = 15; n = 0,31.$$

Средний диаметр пор данного грунта будет:

$$D_{0\Phi} = 0,455 \sqrt[6]{15} \frac{0,31}{1 - 0,31} \cdot 1,0 = 0,32 \text{ мм} < 0,36 \text{ мм},$$

условие непрорываемости (невдавливаемости) грунта основания в поры грунта фильтра происходить не будет.

Данный состав фильтра пригоден и для сопряжения с материалом низовой призмы плотины, т. е.

$$\frac{D_{0\Phi}}{D_{50\Phi}} = \frac{10,5}{8,0} = 1,32 < 1,8,$$

условие (68) удовлетворяется.

5) Для определения длины укладки фильтра  $l_{\Phi}$  следует выполнить расчеты, приведенные в п. 3.11, 1°, г, или определить значение  $x$  из формулы (67) после подстановки в нее следующих значений:

$$J_{\text{вых}} = J_{\text{кр}} = 1,1; S = 12 \text{ м}; Z = 60 \text{ м, т. е.}$$

$$J_{\text{вых}} = \frac{Z}{\pi \sqrt{S^2 + x^2}}; \quad 1,1 = \frac{60}{3,14 \sqrt{12^2 + x^2}},$$

$x = l_{\Phi} = 12,6 \text{ м}$ , с учетом  $k_{\text{зап}} = 1,2$ , получим:

$$L_{\Phi} = 1,2 l_{\Phi} = 1,2 \cdot 12,6 = 15 \text{ м}.$$

При осуществлении указанного мероприятия, т. е. укладки слоя фильтра в основании низовой призмы плотины от низовой грани ядра (диафрагмы) на длине  $L_{\Phi} = 15 \text{ м}$  будет обеспечена фильтрационная прочность грунта основания плотины.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Строительные** нормы и правила (СНиП), часть П-53-73. «Плотины из грунтовых материалов». Стройиздат, 1974, 29 с. с ил.
2. **Чугаев Р. Р.** Земляные гидротехнические сооружения (теоретические основы расчета), Л., «Энергия», 1967, 460 с. с ил.
3. **Чугаев Р. Р.** Плотины из местного материала, часть первая (курс лекций), Л., ЛПИ им. М. И. Калинина, 1968, 179 с. с ил.
4. **Чугаев Р. Р.** Подземный контур гидротехнических сооружений. М.-Л., Госэнергоиздат, 1962, 283 с. с ил.
5. **Аравин В. И., Нумеров С. Н.** Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений, изд. 2-е, М.-Л. Стройиздат, 1955, 291 с. с ил.
6. **Инструкция** по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений. ВСН 02-65. Л., «Энергия», 1965, 97 с. с ил. (ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева).
7. **Указания** по проектированию переходных зон каменно-земляных плотин. ВСН 47-71. Л., «Энергия», 1971, 52 с. с ил. (ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева).
8. **Указания** по проектированию противофильтрационных устройств подземного контура бетонных плотин на скальных основаниях с трещинами тектонического происхождения. ВСН 02-73. Л., «Энергия», 1970, 45 с. с ил. (ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева).
9. **Праведный Г. Х.** Проектирование и подбор гранулометрического состава фильтров переходных зон высоких плотин. М.-Л., «Энергия», 1966, 83 с. с ил.
10. **Временные указания** по проектированию и подбору гранулометрического состава фильтров переходных зон, защищающих связные (глинистые) грунты ядер (экранов) высоких и сверхвысоких плотин из местных материалов. Л., «Энергия», 1965, 51 с. с ил. (ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева).
11. **Павчич М. П.** Способ определения несущих гранулометрических составов грунта. — «Известия ВНИИГ», 1961, т. 68, с. 197—202.
12. **Истомина В. С.** Фильтрационная устойчивость грунтов. М., Госстройиздат, 1957, 295 с. с ил.
13. **Жиленков В. Н.** Водоупорные свойства грунтов ядер и экранов высоких плотин. Л., «Энергия», 1968, 113 с. с ил.
14. **ТУиН** проектирования гидротехнических сооружений. Подземный контур плотин на нескальном основании. М.-Л., Госэнергоиздат, 1958, 91 с. с ил.