МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР
ГЛАВНИИПРОЕКТ
ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ГИДРОТЕХНИКИ
имени Б. Е. ВЕДЕНЕЕВА

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ОБРАТНЫХ ФИЛЬТРОВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

П 92-80
ВНИИГ

ЛЕНИНГРАД
1981

gost.e-ecolog.ru

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР
ГЛАВНИИПРОЕКТ
ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ГИДРОТЕХНИКИ
имени Б. Е. ВЕДЕНЕЕВА

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ОБРАТНЫХ ФИЛЬТРОВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

П 92-80
ВНИИГ

ЛЕНИНГРАД
1981

УДК 624.137.034.9 : 626/627

«Рекомендации по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений» предназначены для инженерно-технических работников, занимающихся вопросами фильтрационной прочности сооружений из грунтовых материалов.

В Рекомендациях предусматривается широкое использование естественных карьерных грунтов без их дорогостоящей переработки, устройство фильтров из пористого бетона и конструкции дренажей, обеспечивающих нормальную работу и фильтрационную прочность сооружений.

Предложенная в Рекомендациях методика позволяет правильно и обоснованно решать весьма важные вопросы по фильтрационно-суффозионной прочности гидротехнических сооружений и их оснований с учетом гидродинамического воздействия фильтрационного потока и суффозионной прочности защищаемых грунтов и грунтов фильтра, определять суффозионность грунтов, устанавливать параметры суффозии: критические скорости фильтрации и градиенты напора, градиенты выноса частиц и процент выноса, допустимые градиенты напора и пр. при любом направлении фильтрационного потока в грунте и к фильтрам и др.

В Рекомендациях приведены практические примеры, в которых на научной основе рассмотрены все наиболее сложные случаи проектирования экономичных обратных фильтров, встречающиеся в практике гидротехнического строительства.

С выходом в свет настоящих Рекомендаций утрачивает силу «Инструкция по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений», ВСН 02-65, переведенная ранее в разряд пособий (решение Главниипроекта Минэнерго СССР № 178 от 21.08.72).

© Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники им. Б. Е. Веденеева (ВНИИГ), 1981

ПРЕДИСЛОВИЕ

В решениях XXVI съезда КПСС уделено большое внимание развитию гидроэнергетического строительства в Советском Союзе. Гигантские масштабы строительства в нашей стране требуют качественно новых и более совершенных методов решения ряда сложных технических задач в области рационального проектирования и строительства, в том числе обратных фильтров дренажных устройств как важного и ответственного элемента гидротехнических сооружений.

Как известно, от правильно запроектированного или подобранного материала обратных фильтров зависят прочность и устойчивость сооружения, надежность, долговечность, а также экономичность его возведения.

Учитывая запросы гидротехнического строительства, ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева на основании результатов многолетних широко поставленных опытных и теоретических исследований по изучению фильтрационно-суффозионных и прочностных свойств как несвязных (песчано-гравелистых), так и связных (глинистых) грунтов, с учетом разработок в этой области других научно-исследовательских организаций (НИС Гидропроекта, ВНИИ ВОДГЕО и др.), опыта проектирования и строительства гидротехнических сооружений, разработана научно обоснованная прогрессивная методика проектирования (подбора) гранулометрического состава грунтов обратных фильтров, защищающих как несвязные песчано-гравелистые, так и связные (глинистые) грунты для всех типов гидросооружений (плотин, каналов, шлюзов и др.).

Подготовка к выпуску в свет важного нормативного документа была проведена в широких масштабах.

В целях всестороннего охвата нужд и требований гидротехнического строительства в этой области в 1963 г. был выпущен «Проект инструкции по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений». Этот «Проект инструкции» был разослан во все заинтересованные организации. В результате ВНИИГом были получены положительные отзывы от 28 организаций. Высказанные пожелания были учтены в окончательной редакции инструкции.

В 1965 г. Минэнерго СССР утвердило разработанную ВНИИГом «Инструкцию по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений», ВСН 02-65, которая весьма ус-

пешно действовала в системе Минэнерго СССР до настоящего времени, т. е. 15 лет. «Инструкция» нашла широкое практическое применение не только в системе Минэнерго СССР, но и во всех ведомствах и организациях СССР (НИИГиМ, Гипроводхоз, Водоканалпроект, САНИИРИ и др.), а также и за рубежом. Она распространена во всех странах, входящих в состав СЭВ, переведена на многие иностранные языки. В содружестве с болгарскими специалистами ее методика запрограммирована на ЭВМ («система автоматизированного исследования обратных фильтров»).

По данной «Инструкции» (ВСН 02-65) в СССР запроектированы и успешно эксплуатируются обратные фильтры дренажей всех крупнейших гидроузлов: Братской, Усть-Илимской, Кременчугской, Киевской, Днепродзержинской, Каневской и многих других ГЭС, а также на многих зарубежных объектах.

В основу данных Рекомендаций, как указывалось выше, положены результаты теоретических, лабораторных и натурных исследований в области изучения фильтрационно-суффозионных и прочностных свойств грунтов и проектирования обратных фильтров, выполненных заслуженным деятелем науки и техники РСФСР, доктором техн. наук, проф. А. Н. Патрашевым, заведующим Комплексной лабораторией грунтовых сооружений ВНИИГа М. П. Павчичем, ст. научн. сотр., канд. техн. наук. Г. Х. Праведным и др., с учетом обобщения опыта проектирования и строительства гидротехнических сооружений за последние 12 лет.

В данных Рекомендациях предусматривается широкое использование естественных карьерных грунтов без их дорогостоящей переработки (отмыва мелких и отсева крупных фракций), а также устройство фильтров из пористого бетона и конструкции дренажей, обеспечивающих нормальную работу и фильтрационную прочность сооружений.

Предложенная в Рекомендациях методика позволяет правильно и обоснованно решать весьма важные вопросы по фильтрационно-суффозионной прочности и устойчивости гидротехнических сооружений и их оснований, выбору расчетных размеров фракций защищаемого грунта не только по геометрическому критерию , но и с учетом гидродинамического воздействия фильтрационного потока на суффозионную прочность защищаемых грунтов и грунтов фильтра, определять суффозионность грунтов, устанавливать параметры суффозии: критические скорости фильтрации и градиенты напора, градиенты выноса частиц и процент выноса, допустимые градиенты напора и прочее при любом направлении фильтрационного потока в грунте и к фильтрам.

Данные вопросы до настоящего времени не нашли широкого отражения в литературе, они являются прогрессивными разработками в СССР (ВНИИГ) в этой области.

Издание Рекомендаций по сравнению с «Инструкцией», ВСН 02-65 дополнено новыми разделами и положениями (согласно рецензии НИСа Гидропроекта) по:

1) контролю правильного определения коэффициентов фильтрации несвязных грунтов;

2) определению допустимых градиентов напора в области дренажа и размеров дренажных устройств;

3) устройству переходного слоя в фильтрах и допустимому значению его коэффициента фильтрации;

4) определению толщины слоев фильтра при частичном просыпании (вдавливании) защищаемого грунта в фильтровый материал;

5) обеспечению фильтрационной прочности контактной зоны верхового откоса плотины при накате и спаде волны;

6) проектированию (подбору) состава фильтров (фильтровой подготовки) под крепления верховых откосов плотин из связных (глинистых) грунтов;

7) определению коэффициента фильтрации суглинистых (связных) грунтов;

8) учету неравномерности раскладки (сегрегации) фракций грунта (коэффициента локальности суффозии) для грунтов с коэффициентом разнозернистости $\eta = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 25$;

9) определению критических значений градиентов напора и размера выносимых частиц мелкозернистого грунта при сопряжении с крупнозернистым грунтом, при контактном размыве;

10) конструкции дренажей облегченного типа из пористого бетона; по уточнению и усовершенствованию расчетных формул, которые позволяют решать вопросы фильтрационной прочности грунтовых сооружений, согласно «Руководству по расчетам фильтрационной прочности плотин из грунтовых материалов», П 55-76 и др.

В Рекомендациях приведены практические примеры, в которых на научной основе рассмотрены все наиболее сложные случаи проектирования и подбора экономичных обратных фильтров, встречающихся в практике гидротехнического строительства.

Настоящие «Рекомендации по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений» в данной редакции разработаны и составлены в Комплексной лаборатории грунтовых сооружений Всесоюзного ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательского института гидротехники (ВНИИГ) им. Б. Е. Веденеева ст. научн. сотр., канд. техн. наук Г. Х. Праведным при участии заведующего лабораторией М. П. Павчича.

Министерство энергетики и электрификации СССР	**Рекомендации по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений**	П 92-80 ВНИИГ

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Область применения. Настоящие Рекомендации предназначены для проектирования обратных фильтров и переходных зон из несвязных песчано-гравийно-галечниковых и щебеночных грунтов, а также обратных фильтров из пористого бетона, устраиваемых в гидротехнических сооружениях I, II и III, IV классов: земляных и каменнонабросных плотинах, земляных откосах, основаниях плотин, зданий ГЭС, судоходных шлюзов и других сооружений, водобойных частях плотин, одежде каналов, креплениях берегов и дна бьефов и др.

Для гидротехнических сооружений IV класса могут приниматься пониженные требования.

1.2. В тех случаях, когда расчетные характеристики карьерных грунтов, предназначенных для обратных фильтров, выходят за пределы требований, предусмотренных настоящими Рекомендациями, следует запроектированные фильтры проверять экспериментальным путем в лаборатории.

1.3. Отказ от устройства обратных фильтров в гидротехнических сооружениях допускается только при наличии соответствующего специального обоснования.

Принятые термины и обозначения

1.4. Основные термины:

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

Обратный фильтр — слои песчано-гравийно-галечниковых или щебеночных грунтов, предохраняющие грунты земляных соору-

Внесены Всесоюзным ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательским институтом гидротехники имени Б. Е. Веденеева	Утверждены ВНИИГом имени Б. Е. Веденеева Решением № 89 от 20 февраля 1981 г. и согласованы с Главниипроектом Минэнерго СССР	Срок введения III квартал 1981 г.

жений и нескальные грунты оснований сооружений от механической суффозии, а в отдельных случаях также от выпора.

Скелет грунта — совокупность всех частиц его, воспринимающих и передающих действие внешних сил и обеспечивающих прочность и устойчивость грунта.

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

Различают следующие виды суффозии: механическую и химическую. В настоящих Рекомендациях рассматривается только механическая суффозия.

Механическая суффозия — перемещение внутри грунта и вынос мелких 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 мелких частиц из контактной области грунта.

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

Кольматаж — отложение в порах грунта мелких частиц, несомых фильтрационным потоком.

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 части одного грунта в другой.

Просыпание грунта в фильтр — перемещение мелких частиц из контактирующего грунта в слой фильтра, происходящее под действием силы тяжести.

Вдавливание фильтра в грунт — внедрение частиц скелета фильтра в контактирующий грунт, происходящее под действием силы тяжести и внешней нагрузки.

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

Выпор — отрыв и перемещение грунта восходящим фильтрационным потоком.

Отслаивание грунта — отрыв агрегатов частиц связного (глинистого и суглинистого) грунта в зоне контакта с грунтом обратного фильтра.

Контактный размыв — размыв мелкозернистого грунта на контакте с крупнозернистым под действием продольной фильтрации.

1.5. Буквенные обозначения:

D — диаметр частиц грунта обратного фильтра;

d — диаметр частиц грунта, защищаемого обратным фильтром;

D_0 — средний диаметр пор в первом слое фильтра;

$d_{сг}$ — диаметр сводообразующих частиц грунта;

$d_{сl}$ — диаметр частиц грунта, выносимых фильтрационным потоком;

$d^{макс}_0$ — диаметр максимального фильтрационного хода;

$d_к$ — диаметр частиц, при наличии которых может происходить кольматаж первого слоя фильтра;

$D_{10} \dots D_{17} \dots D_{60}$ — диаметры частиц грунта обратного фильтра, меньше которых в его составе содержится 10...17...60% по массе;

$d_{10} \dots d_{17} \dots d_{60}$ — то же, защищаемого грунта;

$d^{мин}$ — минимальный диаметр частиц грунта, которых в его составе 0% по массе;

$\eta, \eta_г = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ — коэффициент разнозернистости грунта;

$\eta_ф = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ — коэффициент разнозернистости грунта обратного фильтра;

$n, n_г$ — пористость грунта (в долях единицы);

$n_ф$ — пористость грунта обратного фильтра;

$\eta_м$ — междуслойный коэффициент;

$k_г$ — коэффициент фильтрации грунта, защищаемого обратным фильтром;

$k_ф$ — коэффициент фильтрации грунта обратного фильтра;

$J_{кр}, v_{кр}$ — критические градиент напора и скорость фильтрации, при которых наступает механическая суффозия;

$J_{доп}, v_{доп}$ — допустимые градиент напора и скорость фильтрации, равные критическим, уменьшенным с учетом коэффициента запаса;

θ — угол между направлениями скорости фильтрации и силы тяжести;

$\varkappa$ — коэффициент неравномерности раскладки частиц в грунте, или коэффициент локальности суффозии;

φ_0 — коэффициент критической скорости;

f_* — приведенный коэффициент трения;
$\gamma_г$ — объемная масса скелета грунта;
Δ — плотность частиц грунта;
$\gamma_в$ — плотность воды;
W — влажность грунта;
$W_т$ — граница текучести грунта;
$W_р$ — граница раскатывания грунта;
$W_п$ — число пластичности грунта;
G — коэффициент водонасыщения грунта;
$\varepsilon_т$ — коэффициент пористости на границе текучести грунта;
$J_р$ — расчетный градиент напора;
$D^{расч}_0$ — расчетный диаметр пор грунта фильтра;
H — напор;
Re — число Рейнольдса;
ν — коэффициент кинематической вязкости воды;
g — ускорение силы тяжести.

Назначение обратных фильтров

1.6. Обратные фильтры представляют собой промежуточные слои грунта, сопрягающие защищаемый мелкозернистый грунт с крупнозернистым грунтом (дренажем).

1.7. Основное назначение обратных фильтров — предотвращать опасную механическую суффозию из защищаемого мелкозернистого грунта. В отдельных случаях они могут выполнять роль пригрузки против выпора.

1.8. Обратные фильтры могут быть самостоятельными конструкциями или частью дренажей (наслонных, трубчатых, каменных банкетов и др.).

Требования к обратным фильтрам

1.9. Водопроницаемость обратного фильтра должна быть значительно больше водопроницаемости защищаемого им грунта.

1.10. Гранулометрический состав обратного фильтра должен быть подобран так, чтобы:

а) обеспечивалась непросыпаемость частиц скелета защищаемого грунта в фильтр, а также непросыпаемость частиц скелета самого фильтра в дренаж или каменную наброску;

б) предотвращалось опасное для прочности и устойчивости защищаемого грунта развитие механической суффозии в области, примыкающей к фильтру;

в) обеспечивалась некольматируемость фильтра мелкими частицами, выносимыми фильтрационным потоком из защищаемого грунта; при этом те частицы грунта, вынос которых не вызывает существенных деформаций в защищаемом грунте и является допустимым, должны проходить через фильтр вместе с фильтрационным потоком;

г) предотвращалась опасная для прочности и устойчивости фильтра механическая суффозия в самом слое фильтра.

Если защищаемый грунт несуффозионный, то необходимость в выполнении второго и третьего из вышеуказанных условий при подборе состава фильтров отпадает. Если же состав фильтра оказывается несуффозионным, то отпадает необходимость в выполнении четвертого условия. В таком случае требуется удовлетворить только первому условию, т. е. обеспечить непросыпаемость частиц скелета грунта в фильтр.

Толщина любого слоя обратного фильтра должна значительно превышать толщину примыкающих контактных областей. Слой фильтра должен быть такой толщины, чтобы в нем сформировался грунтовый скелет соответствующего гранулометрического состава, способный воспринимать внешние нагрузки. Толщина слоев фильтра должна назначаться с учетом способа их укладки.

1.11. Производство работ по укладке слоев обратных фильтров должно вестись таким образом, чтобы обеспечить однородность гранулометрического состава грунта по толщине и площади каждого слоя фильтра. Нельзя допускать также расслоения грунта при укладке слоев фильтра.

Задачи проектирования обратных фильтров

1.12. Установление расчетных параметров (гранулометрического состава, объемной массы, пористости, коэффициента фильтрации и пр.) грунтов, защищаемых обратными фильтрами, оценка их суффозионной прочности (суффозионности) и определение расчетных размеров сводообразующих частиц грунта в зависимости от состава грунта и гидродинамических условий фильтрационного потока.

1.13. Выбор естественных карьерных грунтов или искусственных грунтов (щебеночных, гранулированных шлаков и др.), которые могут быть использованы для устройства обратных фильтров.

1.14. Определение гранулометрического состава первого слоя обратного фильтра и последующих его слоев из выбранных естественных карьерных или искусственных грунтов.

1.15. Оценка водопроницаемости грунтов запроектированных обратных фильтров.

1.16. Проверка суффозионной прочности и устойчивости грунтов, защищаемых запроектированным обратным фильтром, и грунтов обратных фильтров.

1.17. Установление толщины и числа слоев обратных фильтров.

1.18. Установление допустимых пределов возможных отступлений в гранулометрическом составе, толщине слоев и пористости грунтов фильтра при их укладке в дренажи.

Классификация обратных фильтров

При подборе гранулометрического состава грунтов обратных фильтров следует различать два основных их типа.

1.19. I тип. Определяющими состав фильтра факторами являются поперечная фильтрация (фильтрация поперек слоя фильтра) и проникновение грунта в поры фильтра под действием силы тяжести.

В этом типе фильтров следует различать два случая:

первый случай — направление скорости фильтрации и силы тяжести совпадают (рис. 1, *а*) и

второй случай — направления их противоположны (рис. 1, *б*).

1.20. II тип. Определяющим состав фильтра фактором является продольная фильтрация (фильтрация вдоль слоя фильтра); при этом контакты грунтов и слоев фильтра могут быть горизонтальными или наклонными (рис. 1, *в*, *г*, *д*).

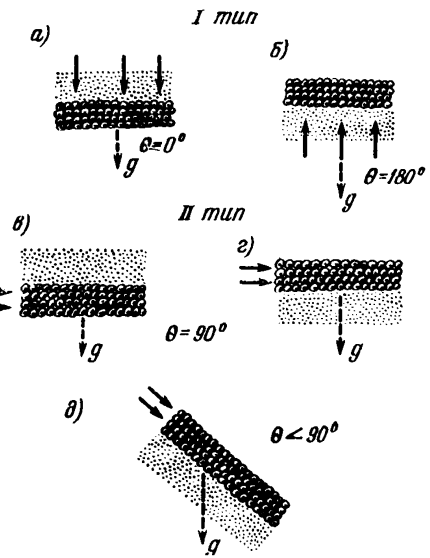

Рис. 1. Типы обратных фильтров.

1.21. Фильтры с вертикальным контактом двух смежных грунтов, которые устраиваются главным образом в скважинах и каптажных колодцах, относятся к первому типу фильтров, если фильтрация через них поперечная, и ко второму типу, если фильтрация продольная.

Материалы для обратных фильтров

1.22. Для устройства обратных фильтров должны применяться лишь несвязные естественные или искусственно получаемые грунты из твердых и плотных каменных пород, не содержащих водорастворимых солей. К таким грунтам относятся: песчаные, гравийно-галечниковые грунты, щебень, щебеночные отходы камнедробильных заводов, гранулированные шлаки (предварительно исследованные в лаборатории).

Естественные или искусственно получаемые пески должны состоять из твердых и плотных пород: полевого шпата, кварца или их смеси.

Гравий, галечник, щебеночные грунты и гранулированные шлаки должны происходить из твердых, плотных, морозостойких пород, не поддающихся выветриванию и выщелачиванию.

1.23. Предел сопротивления каменных пород при сжатии должен быть не менее 30 МПа (300 кгс/см²). При испытании на морозостойкость они должны выдерживать не менее 50 циклов замораживания и оттаивания при температуре ±17°, при этом потеря в весе не должна превышать 5%.

Предел прочности каменных пород при сжатии для устройства фильтров высоких плотин должен быть не менее предела прочности основного тела плотины.

1.24. В тех случаях, когда поблизости от возводимого сооружения есть несколько карьеров для устройства обратных фильтров и их грунты удовлетворяют вышеизложенным требованиям, следует при выборе одного из них или нескольких руководствоваться соображениями наименьшей стоимости работ по устройству обратных фильтров с учетом срока строительства и эксплуатационных расходов.

Исходные данные для проектирования

1.25. При проектировании обратных фильтров должны быть известны следующие исходные данные:

а) механический состав, связность и фильтрационные свойства грунтов, из которых будет возведено сооружение, и грунтов основания, защищаемых обратными фильтрами;

б) род, механический состав и фильтрационные свойства (т. е. расчетные характеристики) грунтов, предназначенных для устройства обратных фильтров;

в) данные о наличии и запасах местных материалов для обратных фильтров, данные об условиях добычи и транспортировки;

г) класс сооружения, для которого проектируются обратные фильтры;

д) глубина промерзания грунта для данного района, где возводится сооружение;

е) принятый тип и конструкция дренажных устройств, для которых проектируется обратный фильтр;

ж) удельный расход фильтрационного потока, проходящего через обратный фильтр;

з) отметки горизонтов воды нижнего бьефа (от минимального до максимального);

и) расчетная высота волны в верхнем и нижнем бьефах.

2. РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ГРУНТОВ ОБРАТНЫХ ФИЛЬТРОВ

2.1. Для обратных фильтров гидротехнических сооружений рекомендуется применять несуффозионные грунты.

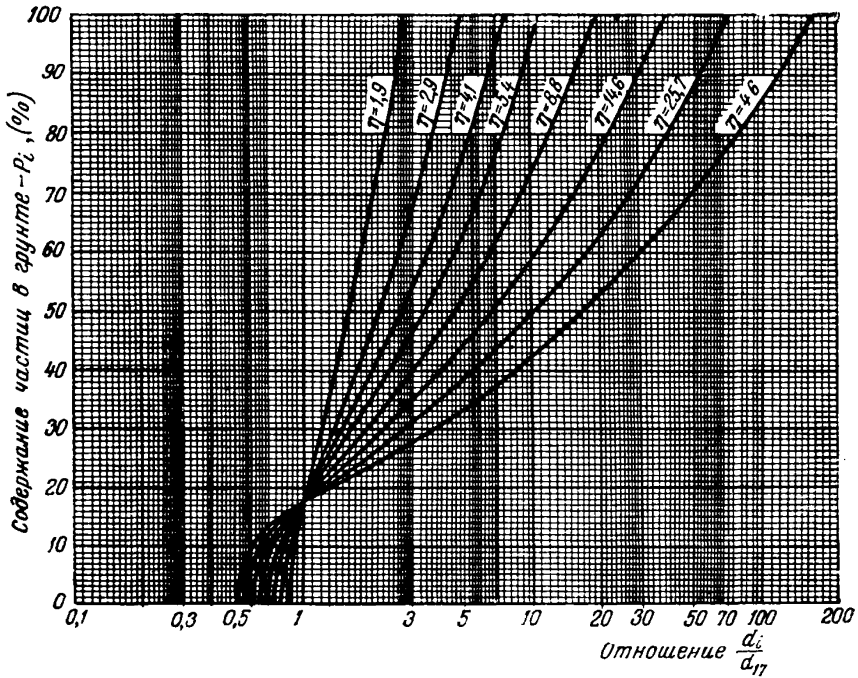

Рис. 2. Гранулометрический состав несуффозионных грунтов в относительных координатах.

2.2. При отсутствии последних могут использоваться и суффозионные грунты, если их состав удовлетворяет конкретным гидродинамическим условиям (режиму фильтрации) и соответствующим требованиям, предъявляемым к суффозионным грунтам, которые изложены ниже.

Расчетные параметры несуффозионных и суффозионных грунтов

2.3. Гранулометрические составы несуффозионных несвязных (песчано-гравийно-галечниковых и щебеночных) грунтов графически представлены (в относительных координатах) на рис. 2, где по оси абсцисс отложено отношение любой фракции грунта d_i к d_{17}, т. е. $\frac{d_i}{d_{17}}$, а по оси ординат их процентное содержание P_i.

Гранулометрический состав несуффозионного грунта для практических целей определяется по экспериментальной зависимости М. П. Павчича:

$$\frac{d_i}{d_{\text{мин}}} = 1 + \left(\frac{P_i}{P_{10}}\right)^x \frac{\eta - 1}{5\eta}; \tag{1}$$

$$x = 1 + 1{,}28 \lg \eta, \tag{2}$$

где P_i — процентное содержание в грунте частиц по массе, имеющих диаметр меньше d_i; $P_{10} = 10\%$; $d_{\text{мин}}$ — минимальный диаметр частиц в данном грунте; $\eta = \frac{d_{60}}{d_{10}}$.

Для того чтобы построить кривую гранулометрического состава несуффозионного грунта по указанной зависимости, необходимо знать процентное содержание P_i в грунте частиц диаметром d_i и коэффициент разнозернистости грунта η. Если $d_i > d_{\text{мин}}$, то, подставляя эти параметры в формулу (1), находим $d_{\text{мин}}$.

Для определения размеров требуемых фракций $d_i = d_{10} \ldots d_{20} \ldots d_{100}$ зависимость (1) может быть представлена в следующем виде:

$$d_i = d_{\text{мин}} \left[1 + (0{,}1P_i)^x \frac{\eta - 1}{5\eta}\right]. \tag{3}$$

Задаваясь разными значениями $P_i = 10 \ldots 20 \ldots 100$, вычисляем по зависимости (3) соответствующие им значения d_i.

2.4. Все грунты, гранулометрические составы которых существенно отличаются от указанных на рис. 2 и определяемых зависимостью (1) или (3), принадлежат к категории суффозионных. В таких грунтах при достижении критической скорости фильтрации будет развиваться механическая суффозия. Количество выносимых из грунтов мелких частиц при этом будет зависеть от того, насколько суффозионный грунт отличается от несуффозионного, и от скорости фильтрации (см. ниже п.п. 2.14 — 2.18).

Расчетные зависимости для определения коэффициента фильтрации песчано-гравелистых и щебеночных грунтов

2.5. В тех случаях, когда коэффициент фильтрации защищаемого или подобранного для обратного фильтра песчано-гравийно-галечникового или щебеночного грунта неизвестен, его значение должно определяться по рекомендуемым ниже формулам:

а) по формуле проф. А. Н. Патрашева:

$$k = \frac{\varphi_1 n g}{51\nu} d^2_0, \text{ см/с} \qquad (4)^*$$

б) или по формуле М. П. Павчича, по известным расчетным параметрам грунта:

$$k = A \frac{n^3}{(1-n)^2} d^2_{17} \text{ см/с;} \qquad (5)$$

$$A = \frac{4{,}0\varphi_1}{\nu} \sqrt[3]{\eta}, \qquad (6)$$

где n — пористость грунта, в долях единицы; g — ускорение силы тяжести, см/с^2; ν — кинематический коэффициент вязкости воды, см^2/с; d_0 — диаметр фильтрационных пор в грунте, см; d_{17} — диаметр частиц грунта, меньше которых в его составе содержится 17% по массе, см; η — коэффициент разнозернистости; φ_1 — коэффициент, учитывающий форму и шероховатость фракций грунта: для песчано-гравийно-галечниковых грунтов $\varphi_1 = 1{,}0$; для щебеночных грунтов $\varphi_1 = 0{,}35 - 0{,}40$.

Примечание. Формулы (4) и (5) справедливы для ламинарного режима фильтрации и для любых значений η для несвязных грунтов.

2.6. Для ориентировочных определений значения коэффициента фильтрации грунта можно пользоваться приведенным на рис. 3 графиком экспериментальных значений коэффициента фильтрации песчано-гравийно-галечниковых и щебеночных грунтов или приближенной зависимостью для определения среднего значения коэффициента фильтрации:

$$k \approx 0{,}5 \cdot d^2_{17}, \text{ см/с} \qquad (7)$$

где d_{17} в мм, а коэффициент фильтрации получаем в см/с.

Примечание. Если коэффициент фильтрации грунта определен экспериментальным путем в лабораторных или полевых условиях, то его значение не должно выходить за пределы верхней или нижней границы графика (рис. 3) по линии абсцисс, соответствующей значению d_{17} мм рассматриваемого грунта.

Если значение k выходит за пределы очерченных границ графика, то это указывает, что значение k определено неправильно.

2.7. Для определения среднего значения коэффициента фильтрации массива грунта (например, призмы плотины или грунта основания), представленного «Зоной гранулометрического состава грунта», значение $k_{ср}$ следует определять по параметрам кривой осредненного гранулометрического состава данной зоны, по формулам (4), (5) или (7, б).

* Формулы (4) и (5) идентичны.

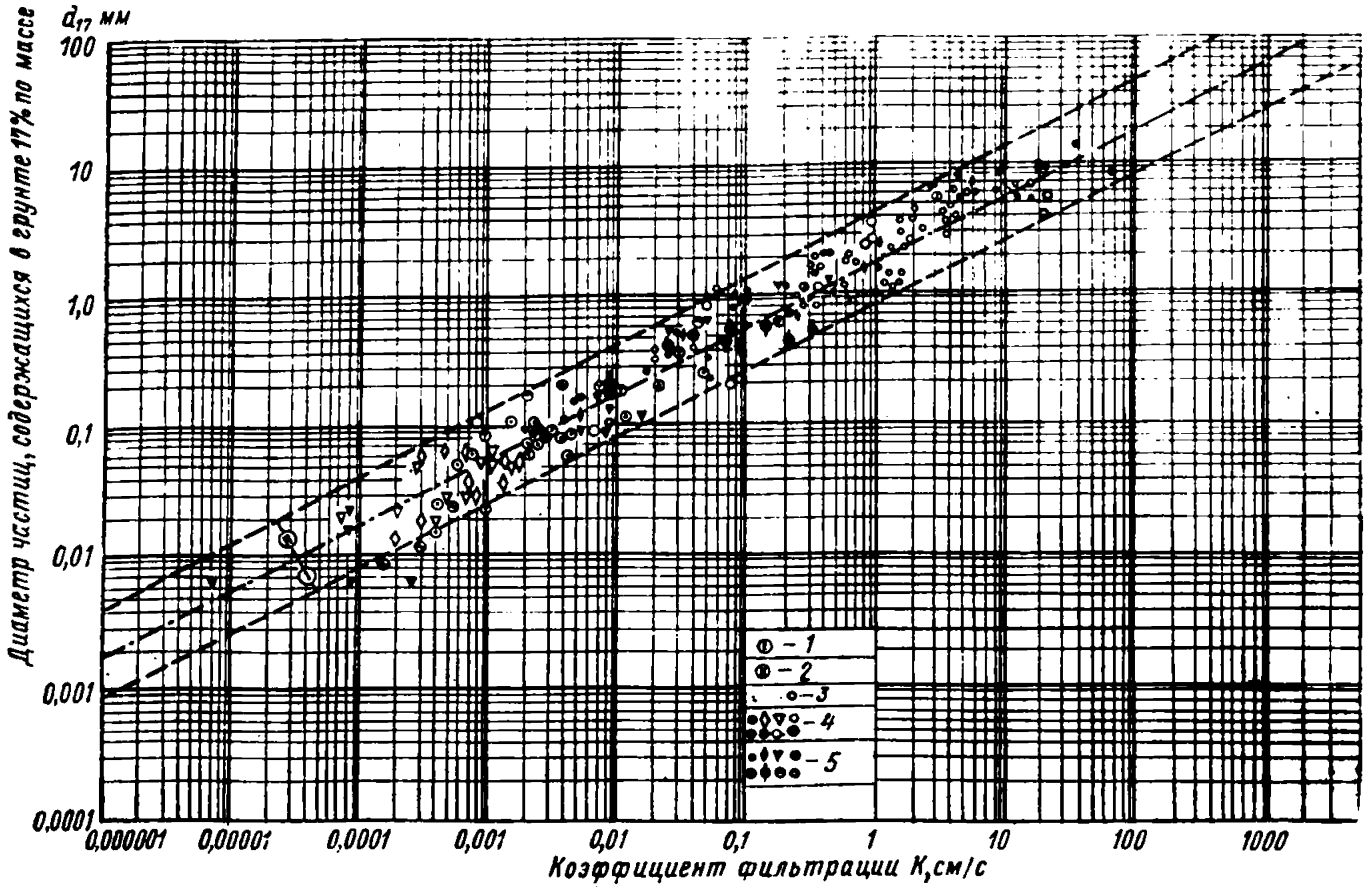

Рис. 3. График экспериментальных значений коэффициентов фильтрации песчано-гравийно-галечниковых и щебеночных грунтов

1—I—область рыхлого сложения грунтов; *2—II*—область плотного сложения грунтов; *3*—коэффициент фильтрации щебеночного грунта определялся лабораторными методами; *4*—грунты, коэффициент фильтрации которых определялся в натурных условиях; *5*—грунты, коэффициент фильтрации которых определялся лабораторными методами.

2.8. Для определения коэффициента фильтрации каменной наброски (рваный камень, щебень) для условий турбулентной фильтрации рекомендуется пользоваться формулой проф., доктора техн. наук С. В. Избаша:

$$k_т = 20{,}4\frac{n^{3/2}}{\sqrt{1-n}}\sqrt{D_э},\ \text{см/с}. \qquad (7а)^*$$

Для удобства расчетов формула (7а) может быть представлена в следующем виде:

$$k_т = 20{,}4\cdot n\cdot\sqrt{\frac{n}{1-n}}\sqrt{D_э},\ \text{см/с}, \qquad (7б)$$

где n — пористость в долях единицы; $D_э \cong D_{17}\sqrt[4]{\eta}$ — эффективный в геометрическом отношении средний диаметр разнофракционной наброски, см; D_{17} — диаметр фракций каменной наброски, меньше которых в ее составе содержится 17% по массе, см; $\eta = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ — коэффициент разнозернистости каменной наброски.

2.9. Для определения коэффициента фильтрации каменной наброски для условий ламинарной фильтрации следует пользоваться формулами (4) или (5).

Определение расчетного диаметра фильтрационных пор в несвязных грунтах

Диаметр фильтрационных пор грунтов является важным расчетным параметром для подбора состава грунта для фильтров, решения вопросов суффозионности и фильтрационной прочности грунтов основания и грунтовых сооружений.

2.10. Зависимости для определения среднего расчетного диаметра фильтрационных пор d_0 в несвязных песчано-гравийно-галечниковых и щебеночных грунтах получаем из формул (4) и (5):

$$d_0 = 7{,}12\sqrt{\frac{\nu\cdot k}{n\cdot g\cdot\varphi_1}}; \qquad (8)$$

$$d_0 = C\frac{n}{1-n}d_{17}, \qquad (9)$$

где

$$C = 0{,}455\sqrt[6]{\eta}, \qquad (10)$$

буквенные обозначения те же, что и в формулах (4) и (5), причем по формуле (8) d_0 определяется в см при значении k в см/с.

Определение расчетных диаметров сводообразующих частиц на контакте сопряжения грунта с фильтром

2.11. Размер расчетных диаметров сводообразующих частиц грунта определяется из условия непросыпаемости.

Непросыпаемость мелких частиц грунта в крупнозернистый грунт обеспечивается в том случае, если в контактной области

* Руководство по расчету турбулентной фильтрации в каменнонабросных гидросооружениях. — Л.: Энергия, 1975. — 51 с.

между ними образуются устойчивые сводики из мелких частиц (рис. 4, *а*). Следовательно, чтобы обеспечить непросыпаемость частиц скелета защищаемого грунта в первый слой обратного фильтра, надо подобрать такой его гранулометрический состав, при котором в контактной области могут образоваться устойчивые сводики из более мелких частиц скелета защищаемого грунта $d_{сг}$.

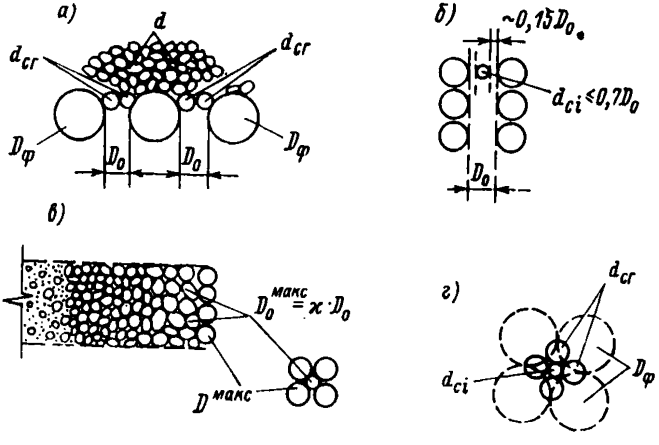

Рис. 4. Схемы

а —сопряжения грунта с фильтром: *d* — защищаемый грунт; $d_{сг}$ — сводообразующие частицы грунта; $D_ф$ — фракции грунта фильтра; $D_ф$ — средний диаметр пор грунта фильтра; *б*—условия выноса из грунта суффозионных частиц d_{ci}; *в*—раскладки (расслоения) фракций в грунте; к определению неравномерности его раскладки $\varkappa$ и максимального размера фильтрационных пор в грунте $D_0^{макс}$; *г* — вынос мелких фракций d_{ci} из контактной области грунта (при $v > v_{кр}$), защищаемого обратным фильтром.

Если первый слой обратного фильтра лежит над грунтом, то прочность и устойчивость контакта между ними обусловливается тем, что в нем образуются из частиц скелета грунта устойчивые сводики. Поэтому частицы грунта не проникают в слой фильтра, так же как и частицы фильтра в грунт. В таких случаях иногда говорят, что фильтр не продавливается в защищаемый им грунт

2.12. Многочисленные опыты с однозернистыми и разнозернистыми фильтрами показали, что устойчивые сводики образуются в том случае, когда диаметр пор фильтра превышает диаметр сводообразующих частиц не более чем в 1,8 раза.

Условие непросыпаемости грунта в фильтр поэтому выражается в виде

$$\frac{D_0}{d_{сг}} \leqslant 1{,}8 \qquad (11)$$

или

$$d_{сг} \geqslant 0{,}555D_0, \qquad (12)$$

где D_0 — средний диаметр пор в первом слое фильтра; $d_{сг}$ — диаметр сводообразующих частиц в контактной области грунта и фильтра (рис. 4, *а*).

Подставляя в зависимость (12) значение D_0 из (8) и (9) для определения диаметров сводообразующих частиц, соответственно получим следующие расчетные формулы:

$$d_{сг} \geqslant 3{,}95 \sqrt{\frac{\nu k_ф}{n_ф g \varphi_1}} \tag{13}$$

и

$$d_{сг} \geqslant C_1 \frac{n_ф}{1 - n_ф} D_{17}, \tag{14}$$

$$C_1 = 0{,}252 \sqrt[6]{\eta_ф}, \tag{15}$$

где $n_ф$, $k_ф$, $\eta_ф$ — пористость, коэффициенты фильтрации и разнозернистости грунта первого слоя фильтра.

Определение расчетных диаметров $d_{сг}$ для суффозионных грунтов дано зависимостью (32).

2.13. При выборе диаметра сводообразующих частиц защищаемого грунта надо учитывать категорию грунта, степень разнозернистости его, форму кривой гранулометрического состава (для суффозионных грунтов), режим фильтрации, а также класс сооружения и условия производства работ по укладке фильтра. Практические рекомендации по этому вопросу даются в разделе 3.

Определение размеров суффозионных частиц в песчано-гравелистом (щебеночном) грунте

2.14. Механическая суффозия в песчано-гравелистом грунте будет развиваться, если в нем имеются такие частицы, диаметр которых меньше диаметра наибольшего фильтрационного хода в грунте $d_0^{макс}$, если скорость фильтрации больше критической $v > v_{кр}$. Частицы грунта, имеющие меньшие размеры, чем диаметр наибольшего фильтрационного хода в грунте, называются суффозионными, так как могут быть вынесены фильтрационным потоком из грунта.

Следовательно,

$$d_{с1} < d_0^{макс}, \tag{16}$$

где $d_{с1}$ — диаметр суффозионных частиц (рис. 4, *б*).

2.15. Диаметр максимального фильтрационного хода определяется следующими зависимостями (с учетом сегрегации грунта):

$$d_0^{макс} = 7{,}12\, \varkappa \sqrt{\frac{\nu k}{n g \varphi_1}}; \tag{17}$$

$$d_0^{макс} = \varkappa C \frac{n}{1 - n} d_{17}, \tag{18}$$

где $\varkappa$ — коэффициент неравномерности раскладки частиц в грунте, или коэффициент локальности суффозии (рис. 4, *в*); C — по формуле (10).

Коэффициент $\varkappa$ зависит главным образом от коэффициента разнозернистости грунта. С некоторым запасом можно принять:

а) для гранулометрического состава грунтов с $\eta \leqslant 25$

$$\varkappa = 1 + 0{,}05\eta, \tag{19}$$

б) для гранулометрического состава грунтов с $\eta > 25$

$$\varkappa = 0{,}35\,(3 + \sqrt[3]{\eta}\lg\eta). \tag{20}$$

2.16. Максимальную крупность частиц $d_{cl}^{макс}$, перемещение которых возможно внутри грунта и которые могут быть вынесены из него при незащищенном выходе, т. е. при отсутствии обратного фильтра и других защитных средств, следует находить по зависимости:

$$d_{cl}^{макс} \leqslant 0{,}77 d_0^{макс}, \tag{21}$$

или

$$d_{cl}^{макс} \leqslant \frac{\varkappa C}{1{,}3}\frac{n}{1-n}\,d_{17}, \tag{22}$$

где C — по зависимости (10).

2.17. Когда грунт защищается обратным фильтром, то, как указано выше, в контактной области из соответствующих частиц грунта образуются устойчивые сводики. Для разрушения таких сводиков требуется более существенное воздействие фильтрационного потока, чем для свободного выноса частиц той же крупности. Поэтому сводообразующие частицы будут лимитировать вынос мелких частиц из защищаемого грунта.

Диаметр суффозионных частиц для области грунта, непосредственно примыкающей к первому слою обратного фильтра, определяется следующими двумя условиями: условием (21), т. е.

$$d_{cl}^{макс} \leqslant 0{,}77 d_0^{макс}$$

и

$$d_{cl} < \zeta d_{cr}, \tag{23}$$

где ζ — коэффициент Слихтера, зависящий от характера расположения частиц в грунте и его пористости. Значение $\zeta = 0{,}41$, как известно, соответствует наиболее рыхлому сложению грунта, а $\zeta = 0{,}15$ — достаточно плотному сложению грунта.

Первое из этих условий (21) является необходимым, а второе (23) — достаточным. Это значит, что если $0{,}77 d_0^{макс} > \zeta d_{cr}$, то из защищаемого фильтром грунта могут выноситься только такие частицы, диаметр которых меньше ζd_{cr}. Если же $\zeta d_{cr} > 0{,}77 d_0^{макс}$, то при соответствующих скоростях фильтрации будут выноситься из защищаемого грунта те частицы, диаметры которых удовлетворяют условию (21).

Крупность выносимых фильтрационным потоком суффозионных частиц d_{cl} из контактной области грунта, непосредственно примыкающего к первому слою фильтра, определится из условий (21) и (23), т. е. $d_{cl} \leqslant 0{,}77\zeta d_{cr}$ (рис. 4, *г*).

Принимаем $\zeta = 0{,}41$, тогда при критических скоростях фильтрации максимальная крупность суффозионных частиц грунта $d^{\text{макс}}_{\text{cl}}$, которые могут быть вынесены из контактной зоны грунта, защищаемого фильтром, определяется следующей зависимостью:

$$d_{\text{cl}}^{\text{макс}} \leqslant 0{,}32 d_{\text{cr}}. \tag{24}$$

2.18. Размеры суффозионных частиц в первом слое фильтра, при наличии второго слоя, следует определять на основании этих же условий. Тогда вместо зависимости (24) будем иметь:

$$D_{\text{cl}}^{\text{I макс}} \leqslant 0{,}32 D^{\text{I}}_{\text{cr}}, \tag{25}$$

где индекс I указывает, что D_{cl} и D_{cr} относятся к первому слою фильтра.

Размеры суффозионных частиц в последующих слоях фильтра определяются аналогичным образом.

Расчетные зависимости для критических скоростей и градиентов суффозии в песчано-гравелистых (щебеночных) грунтах

2.19. Скорость фильтрации, при которой нарушается предельное равновесие суффозионных частиц в грунте, называется критической скоростью суффозии. Она зависит от крупности выносимых частиц, коэффициента фильтрации грунта, пористости его и характера расположения увлекаемых фильтрационным потоком частиц в порах грунта. Величина этой скорости определяется следующей зависимостью А. Н. Патрашева:

$$v_{\text{кр}} = \varphi_0 d_{\text{cl}} \sqrt{\frac{n_{\text{г}} g}{\nu} k_{\text{г}}}, \tag{26}$$

где φ_0 — коэффициент критической скорости, равный

$$\varphi_0 = 0{,}60 \left(\frac{\gamma_{\text{г}}}{\gamma_{\text{в}}} - 1 \right) f_* \sin \left(30^\circ + \frac{\theta}{8} \right), \tag{27}$$

f_* — приведенный коэффициент трения, зависящий от степени защемляемости выносимых частиц, формы их и характера расположения суффозионных частиц в порах.

На основании экспериментальных данных для определения приведенного коэффициента трения можно рекомендовать следующую аппроксимирующую зависимость:

$$f_* = 0{,}82 - 1{,}8n + 0{,}0062(\eta - \eta_{\text{c}}), \tag{28}$$

причем при $\eta < 30$ и $0{,}26 \leqslant n \leqslant 0{,}40$ значение приведенного коэффициента разнозернистости следует принимать $\eta_{\text{c}} = 5$. На рис. 5 для определения коэффициента f_* приведен график $f_* = f(\eta)$, где даны соответствующие кривые, построенные с учетом пористости грунтов n.

2.20. Для того, чтобы не происходило выноса суффозионных частиц d_{cl} из толщи суффозионного грунта, скорость фильтрации

в нем v должна быть меньше или равна допустимой скорости для данного грунта:

$$v \leqslant v_{\text{доп}}, \tag{29}$$

при этом $v_{\text{доп}}$ должна быть меньше $v_{\text{кр}}$ с учетом коэффициента $k_{\text{н}}$ (см. (26)), т. е.

$$v_{\text{доп}} = v_{\text{кр}} \frac{1}{k_{\text{н}}}. \tag{30}$$

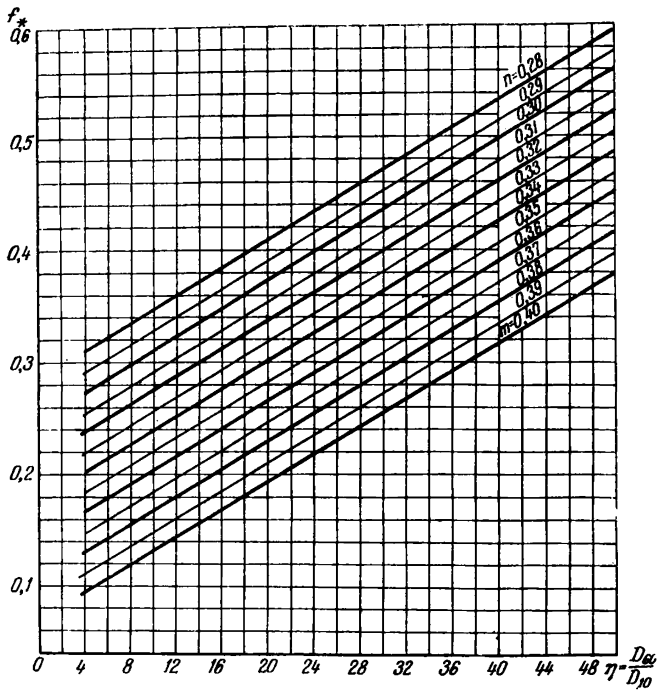

Рис. 5. График $f_* = f(\eta)$.

При соблюдении условия (30) нарушения фильтрационно-суффозионной прочности грунта, в данном конкретном случае, происходить не будет; $k_{\text{н}}$ принимается по условию (35).

2.21. Максимальная критическая скорость фильтрации в контактной области грунта, защищаемого обратным фильтром, должна определяться по следующей зависимости:

$$v_{\text{кр}}^{\text{макс}} = 0{,}32 d_{\text{сг}} \varphi_0 \sqrt{\frac{n_{\text{г}} g}{\gamma} k_{\text{г}}}, \tag{31}$$

где $d_{сг}$ — сводообразующие частицы грунта, а $0{,}32d_{сг} = d_{сl}$ — суффозионные частицы грунта, которые будут выноситься из контактной зоны при данном значении $v \geqslant v^{макс}_{кр}$. Допуская вынос из контактной зоны грунта суффозионных частиц $d_{сl} = d_{3-5\%}$, получим $d_{сг} \approx 3d_{3-5\%}$ при рыхлой укладке грунта (см. п. 2.16), а при плотной укладке грунта (при $\zeta = 0{,}15$) $d_{сl} = d_{3\%} \approx 0{,}12d_{сг}$, откуда $d_{сг} \approx 8d_{3-5\%}$.

Из приведенного следует, что для суффозионных грунтов, защищаемых обратным фильтром, размер сводообразующих фракций следует принимать, с учетом гидродинамических условий фильтрации, по следующей зависимости:

$$d_{сг} = (3 \div 8)\, d_{3-5\%}. \tag{32}$$

2.22. Критический градиент напора по отношению к механической суффозии грунта, в соответствии с формулой (26), определяется зависимостью

$$J_{кр} = \varphi_0 d_{сl} \sqrt{\frac{ng}{\nu k}}, \tag{33}$$

или по формуле, предложенной Г. Х. Праведным:

$$J_{кр} = \frac{\alpha\varphi_0}{\varepsilon \sqrt[6]{d_{17}\eta}}\, d_{сl}, \tag{33'}$$

где $\alpha = 15{,}7$ — для окатанных фракций; $\alpha = 25{,}7$ — для угловатых (щебеночных) фракций; φ_0 — по формуле (27); $\varepsilon = \frac{n}{1-n}$ — коэффициент пористости; $\eta = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ — коэффициент разнозернистости; d_{17}; $d_{сl}$ — размеры фракции грунта d_{17} и суффозионных частиц. Согласно условию (30):

$$J_{доп} = J_{кр} \frac{1}{k_н}, \tag{34}$$

где $k_н$ — коэффициент надежности устанавливается в зависимости от класса сооружения.

Для грунтовых гидротехнических сооружений, при расчетах фильтрационно-суффозионной прочности грунтов, рекомендуется принимать значение $k_н$ в соответствии с указаниями главы СНиП II-16-76:

$$\left.\begin{array}{rl} \text{I класс} & k_н = 1{,}25 \\ \text{II класс} & k_н = 1{,}20 \\ \text{III класс} & k_н = 1{,}15 \\ \text{IV класс} & k_н = 1{,}10. \end{array}\right\} \tag{35}$$

2.23. Для определения допустимых значений градиента напора $J_{доп}$ для каждого рассматриваемого конкретного суффозионного грунта рекомендуется выполнить следующие расчеты.

По зависимости (21) определяется $d^{\text{макс}}_{\text{cl}}$. Если окажется, что $d^{\text{макс}}_{\text{cl}} > d_{3-5\%}$, то по зависимости (33) или (33′) определяется критический градиент суффозии для выноса мелких фракций $d_{\text{cl}} = 3-5\%$, от выноса которых прочность грунта не нарушается.

В зависимости от полученного значения $J_{\text{кр}}$, по выражению (34), с учетом (35), определяется допустимый градиент напора для данного конкретного грунта.

2.24. Максимальный критический градиент напора в контактной области грунта, защищаемого обратным фильтром, определяется следующей зависимостью:

$$J^{\text{макс}}_{\text{кр}} = 0{,}32 d_{\text{сг}} \varphi_0 \sqrt{\frac{ng}{\nu \cdot k}}, \tag{36}$$

где $d_{\text{сг}}$ — диаметр сводообразующих частиц грунта, защищаемого обратным фильтром.

Другие обозначения те же, что и в формулах (26)—(30). Согласно (33′) зависимость (36) может быть представлена в следующем виде:

$$J^{\text{макс}}_{\text{кр}} = \frac{0{,}32\,\alpha\varphi_0}{\varepsilon d_{17}\sqrt[6]{\eta}}\, d_{\text{сг}}. \tag{36′}$$

Определение допустимых градиентов напора в области дренажа и размеров дренажных устройств

2.25. При проектировании дренажных устройств (трубчатого дренажа, наслонного и др.) необходимо учитывать категорию состава грунтов тела и основания плотины (их суффозионность), гидродинамические условия фильтрации в области дренажа и размеры дренажных устройств, от которых зависят надежная работа дренажа, фильтрационная прочность и устойчивость сооружения.

2.26. В случаях, когда грунт основания и тела плотины является суффозионным, благодаря значительным по величине выходным градиентам напора (рис. 6) в области дренажа могут возникнуть суффозионные явления, в результате которых может иметь место вынос из толщи грунта основания и тела плотины суффозионных фракций в дренаж (при не тщательно подобранном первом слое фильтра), или области дренажа произойдет кольматаж грунта, что может вызвать нарушение работы дренажа — нежелательные просадки, подъем кривой депрессии и высачивание фильтрационного потока на откос.

В целях предотвращения указанных выше нежелательных явлений, кроме правильно подобранного состава фильтров, должны быть и правильно намечены соответствующие размеры дренажа (дренажной призмы), от которых зависит величина выходных градиентов напора в дренаж, нормальная работа дренажа и исключаются указанные выше нежелательные деформации.

2.27. Чтобы не происходило указанных выше деформаций грунта в области дренажа, размеры дренажной призмы (рис. 6) должны быть такими, чтобы выходной градиент напора $J_{вых}$ был бы меньше или равен допустимому, т. е. должно удовлетворяться основное условие:

$$J_{вых} \leqslant J_{доп} = J_{кр} \frac{1}{k_н}, \tag{37}$$

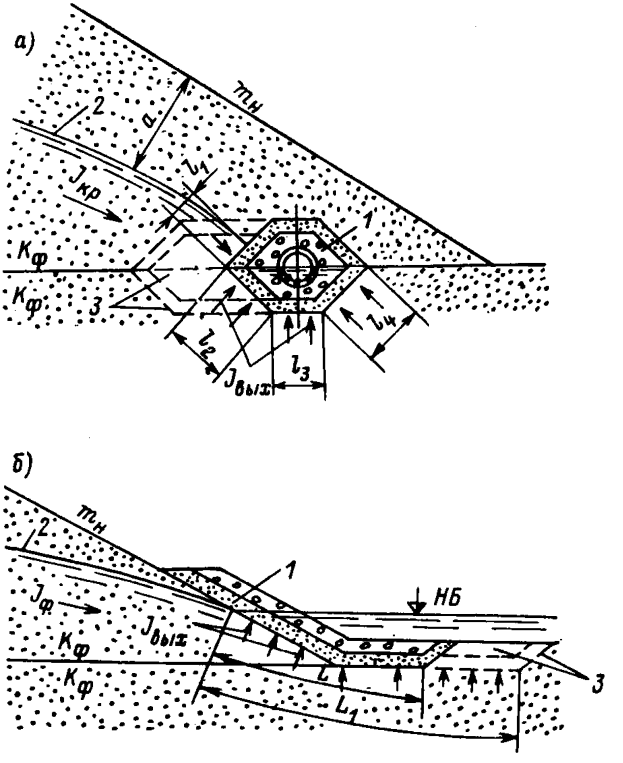

Рис. 6. К расчету дренажных призм

а — трубчатый дренаж; *б* — наслонный дренаж; *1* — дренажная призма; *2* — кривая депрессии; *3* — возможное увеличение размеров призмы; *a* — наибольшая глубина промерзания; $l_1 + l_2 + l_3 + l_4 = L(L_1)$ — смоченный периметр дренажной призмы; $k_ф$ — коэффициент фильтрации грунта основания (тела) плотины; $J_{кр}$, $J_{вых}$ — градиенты напора: критический грунта и выходной в дренаж

где $k_н = 1{,}10 \div 1{,}25$ — принимается согласно (35); $J_{кр}$ — критический градиент напора для данного грунта тела или основания плотины, определяется по формуле (33), причем $d_{cl} \leqslant 3 - 5\%$.

2.28. Величина выходного градиента напора $J_{вых}$ в дренажную призму зависит от фильтрационного расхода Q, поступающего в дренаж, коэффициента фильтрации грунта основания или тела плотины и от площади живого сечения фильтрационного потока при выходе в дренажную призму (рис. 6).

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

$$J_{\text{вых}} = \frac{Q}{k_{\text{г}}\omega}, \tag{38}$$

где Q — фильтрационный расход, м³/с; $k_{\text{г}}$ — коэффициент фильтрации грунта основания или тела плотины, м/с; ω — площадь живого сечения фильтрационного потока, входящего в дренаж, отнесенная к 1 м длины дренажа: $\omega = 1L = 1(l_1+l_2+l_3+l_4)$, где $L = l_1+l_2+l_3+l_4$; L — смоченный периметр дренажной призмы (рис. 6), от размера которого главным образом зависит величина выходного градиента напора $J_{\text{в}}$, что указывает на необходимость рационального размещения (местоположения) дренажа.

Если условие (37) не удовлетворяется при намеченных размерах дренажной призмы, размер ее следует увеличить, как показано на рис. 6, *а*, *б*.

2.29. При несуффозионных грунтах тела и основания плотины величина выходного градиента напора в дренажную призму должна быть

$$J_{\text{вых}} \leqslant 0{,}70 - 0{,}75. \tag{39}$$

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

Определение размеров кольматирующих фильтр частиц

2.30. Вынос из контактной области грунта, защищаемого фильтром, небольшого количества мелких частиц не нарушает прочности и устойчивости его и может быть допустим. Однако, если вынесенные из грунта мелкие частицы отложатся в фильтре, то фильтрационная способность его может значительно уменьшится. Поэтому при проектировании фильтров требуется знать крупность тех частиц, которые могут отлагаться фильтрационным потоком в порах слоев фильтра.

Как уже отмечалось, процесс отложения мелких частиц грунта, несомых фильтрационным потоком, в порах грунта, в котором происходит фильтрация, называется кольматажем грунта. Отлагаемые при таком процессе мелкие частицы грунта называются кольматирующими частицами.

Процесс кольматажа в данном грунте возможен, если сумма из диаметра кольматирующей частицы $d_{\text{к}}$ и двойной толщины обволакивающей ее пленки связанной воды $2\delta_{\text{к}}$ меньше, чем диаметр фильтрационного хода в грунте d_0, и больше, чем критический (наименьший) диаметр кольматирующих частиц $d^{\text{мин}}_{\text{к}}$.

Следовательно, процесс кольматажа первого слоя фильтра возможен, если

$$D^{\text{I}}_0 \geqslant d_{\text{к}} + 2\delta_{\text{к}} \geqslant d^{\text{мин}}_{\text{к}}. \tag{40}$$

Так как в рассматриваемом случае можно положить, что

$$d_к + 2\delta_к = 1{,}1 d_{cl}, \tag{41}$$

то вместо (40) имеем

$$D_0^I \geqslant 1{,}1 d_{cl} \geqslant d_к^{мин}. \tag{42}$$

Критический диаметр кольматирующих частиц, согласно данным А. Н. Патрашева,

$$d_к^{мин} = \frac{D_0^I}{a_*}, \tag{43}$$

причем a_* зависит от физико-механических свойств кольматирующих частиц и кольматируемого грунта, а также от числа Рейнольдса Re_0. Для практических расчетов можно рекомендовать следующие значения этого параметра (табл. 1).

Таблица 1

Кольматирующие частицы, мм	a_*	Re_0
Пылеватые, от 0,01 до 0,05	4,0	1,0
Мелкий песок, от 0,05 до 0,25	3,0	0,5
Средний песок, от 0,25 до 0,5	2,5	0,1

Максимальная крупность выносимых фильтрационным потоком частиц из контактной области суффозионного грунта, непосредственно примыкающей к первому слою фильтра, определяется, как указывалось выше (п. 2.16), по зависимости (24), т. е

$$d_{cl}^{макс} \leqslant 0{,}32 d_{cr}.$$

Примечание. Следовательно, кольматирующими мелкими частицами первый слой фильтра могут быть частицы $d_{cl} \leqslant d^{макс}_{cl}$.

2.31. Чтобы выносимые из контактной области фильтрационным потоком мелкие частицы грунта d_{cl} не кольматировали первый слой фильтра, согласно зависимостям (42) и (43) должно выполняться следующее условие:

$$d_{cl} \leqslant \frac{D_0^I}{1{,}1 a_*} \tag{44}$$

или

$$D_0^I \geqslant 1{,}1 a_* d_{cl}. \tag{45}$$

Подставляя в это соотношение значение D^I_0 из формулы (9), получаем условие некольматируемости первого слоя фильтра

$$D_{17}^I \geqslant \frac{1{,}1 (1 - n_ф) a_*}{n_ф C} d_{cl} \tag{46}$$

или в безразмерной форме (критерий некольматируемости)

$$\frac{D_{17}^I}{d_{cl}} \geqslant \frac{1{,}1 (1 - n_ф)}{n_ф C} a_*. \tag{47}$$

2.32. Если условия (44)—(47) не удовлетворяются, следует изменить принятый диаметр сводообразующих частиц $d_{сг}$.

Тогда, приняв по условию (45) значение $D^{I}_{0} = 1{,}8d_{сг}$, получим $d_{сг} = 0{,}61_{сI}a_{*}$.

По этому значению $d_{сг}$ находим новое значение D_{17} и по зависимости (1) получим новую кривую несуффозионного гранулометрического состава грунта первого слоя фильтра, который будет удовлетворять условию некольматируемости.

2.33. При подборе гранулометрического состава первого слоя фильтра из имеющихся карьерных грунтов, состав несуффозионного грунта фильтра должен удовлетворять условию непросыпаемости (12), при данном значении $d_{сг}$, а для суффозионного состава, кроме этого, необходимо выполнить и другие проверки его пригодности (см. п. п. 2.19, 2.32).

3. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБРАТНЫХ ФИЛЬТРОВ, ЗАЩИЩАЮЩИХ НЕСВЯЗНЫЕ ГРУНТЫ

Общие указания

3.1. Для устройства обратных фильтров должны применяться лишь несвязные естественные или искусственно получаемые грунты из твердых и плотных каменных пород, не содержащих водорастворимых солей (см. п.п. 1.22, 1.23).

3.2. Состав обратного фильтра может быть запроектирован несуффозионным. Тогда и при очень больших градиентах напора выноса мелких частиц грунта из фильтра происходить не будет. Однако такое требование для фильтров не является обязательным, так как в фильтрах градиенты напора в рассматриваемых практических задачах достаточно малы. Поэтому состав обратного фильтра может быть и суффозионным, лишь бы в нем не возникало опасной механической суффозии.

Оценка несуффозионности (суффозионности) грунтов и определение процента выноса

3.3. Приступая к подбору состава обратного фильтра, прежде всего необходимо определить, к какой категории относится заданный состав защищаемого фильтром грунта, а также карьерный или искусственно получаемый грунт, предназначенный для фильтра, являются ли эти грунты суффозионными или несуффозионными.

Для решения этого вопроса рекомендуются два способа: первый способ характеризует несуффозионность грунта, когда из его толщи при любых скоростях фильтрации не будет происходить выноса самых мелких частиц $d_{мин}$. Второй способ характеризует грунт как практически несуффозионный, из которого допускается незначительный вынос мельчайших его частиц, но без нарушения прочности и устойчивости грунта.

Первый способ

3.4. По заданному гранулометрическому составу защищаемого грунта, его пористости $n_г$ и коэффициенту фильтрации $k_г$ определяем по одной из зависимостей (17) или (18) диаметр максимального фильтрационного хода в грунте $d^{макс}_0$. Далее, по кривой гранулометрического состава заданного грунта находим минимальный диаметр его частиц $d_{мин}$.

Если окажется, что

$$d^{макс}_{cl} = 0{,}77 d^{макс}_0 > d_{мин}, \tag{48}$$

то грунт следует считать суффозионным; из такого грунта могут выноситься все частицы, крупность которых меньше или равна $d^{макс}_{cl}$ (если скорость фильтрации v будет больше критической $v_{кр}$).

Если окажется, что

$$d^{макс}_{cl} = 0{,}77 d^{макс}_0 < d_{мин}, \tag{49}$$

то грунт следует считать несуффозионным.

Из такого грунта не могут выноситься и самые мелкие его частицы.

3.5. Определение максимального возможного процента выноса из суффозионного грунта (по геометрическому критерию) производится следующим образом. По зависимости (17) или (18) находим максимальный диаметр фильтрационного хода в грунте, по зависимости (21) вычисляем диаметр выносимых частиц $d^{макс}_{cl}$ и по кривой гранулометрического состава грунта определяем искомый процент выноса.

Второй способ

Практика показывает, что если из грунта будут вынесены самые мелкие частицы в количестве не более 3—5% по массе, то прочность и устойчивость грунта практически не нарушится. Следовательно, практически несуффозионным грунтом можно считать такой грунт, из которого могут быть вынесены фильтрационным потоком мельчайшие частицы не более 3—5% по массе.

3.6. Карьерный или искусственно получаемый грунт, предназначенный для фильтра, или грунт, защищаемый обратным фильтром, следует считать (по геометрическому критерию) практически несуффозионным, если его параметры удовлетворяют следующей зависимости:

$$\frac{d_5}{d_{17}} \geqslant N, \tag{50}$$

где

$$N = 0{,}32 \sqrt[6]{\eta}\,(1 + 0{,}05\eta)\,\frac{n}{1-n}. \tag{50'}$$

Если зависимость (50) не удовлетворяется, грунт следует считать суффозионным.

Определение расчетных размеров сводообразующих частиц грунта, защищаемого обратным фильтром

Как было отмечено выше (см. 2.10, 2.11, 2.21), непросыпаемость (невдавливаемость) частиц скелета грунта в первый слой фильтра обеспечивается при образовании в контактной области устойчивых сводиков из мелких частиц (скелета) грунта.

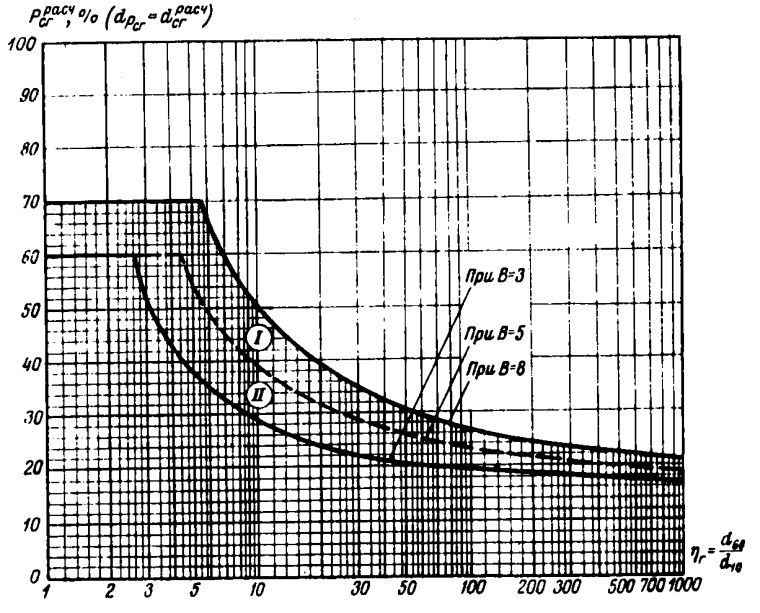

Рис. 7. График $P_{cr}^{расч} = f(\eta_r)$ для определения расчетных размеров сводообразующих частиц грунта d_{cr}

I — область выбора расчетных значений d_{cr} для фильтров из щебеночного материала; *II* — область выбора расчетных значений d_{cr} для фильтров из песчано-гравийно-галечникового грунта

При выборе расчетного значения диаметра сводообразующих частиц d_{cr} защищаемого грунта надо учитывать категорию грунта (несуффозионный, суффозионный), степень разнозернистости его, форму кривой гранулометрического состава суффозионного грунта, режим фильтрации.

Несуффозионный грунт

3.7. Для практических целей расчетное значение диаметра сводообразующих частиц d_{cr} для несуффозионного грунта следует выбирать по графику $P^{расч}_{cr} = f(\eta_r)$, представленному на рис. 7.

По данному графику (рис. 7) в зависимости от материала фильтра и коэффициента разнозернистости грунта $\eta_г$ в пределах зоны *I* или *II* определяем процентное содержание сводообразующих частиц $P_{сг}$ и далее по кривой гранулометрического состава грунта находим расчетное значение диаметра сводообразующих частиц $d_{сг}$.

Для определения $d_{сг}$ можно также пользоваться формулой

$$P_{сг} = P_{10}\left[(5B-5)\frac{\eta_г}{\eta-1}\right]^{\frac{1}{x}}, \qquad (51)$$

где $P_{10} = 10$; $B = 3 \div 8$ — коэффициент, учитывающий размер пор в зависимости от раскладки частиц грунта; $x = 1 + 1{,}28 \lg \eta_г$.

Получив из формулы (51) значение $P_{сг}$, определяем по кривой гранулометрического состава грунта расчетное значение $d^{расч}_{сг}$.

Суффозионный грунт

3.8. Значение $d_{сг}$ для суффозионного грунта определяется следующим образом.

1) В формуле (33) или (33′) вместо $J_{кр}$ принимаем заданный (определяемый расчетами или методом ЭГДА) максимальный градиент напора в контактном слое $J^{макс}_р$ грунта с фильтром и определяем значение $d_{сi}$:

$$d_{сi} = \frac{k_н J^{макс}_р}{\varphi_0 \sqrt{\frac{n_г g}{\nu k_г}}}. \qquad (52)$$

где $k_н = 1{,}25 \div 1{,}10$ — коэффициент надежности принимается по (35).

2) Если полученное значение $d_{сi} < d_{3-5\%}$, то расчетное значение $d^{расч}_{сг}$ принимается из графика $P^{расч}_{сг} = f(\eta_г)$ по кривой $B = 3$ (рис. 7).

3) Если значение $d_{сi} > d_{3-5\%}$, то $d_{сг}$ следует определять по формуле

$$d^{расч}_{сг} = Bd_{3-5\%}, \qquad (53)$$

где $B = 3 \div 8$. Причем $B = 3$ принимается для рыхлого сложения защищаемого грунта, $B = 8$ — для плотного сложения ($B_{ср} \approx 5$).

При таких размерах сводообразующих частиц предотвращается развитие опасной механической суффозии в защищаемом грунте в области контактной зоны грунта с фильтром.

4) По формуле (52) представляется возможным определять прочность суффозионного состава фильтра на продольную фильтрацию. Тогда вместо $J^{макс}_р$ в (52) подставляется $J_{пр}$ — продольный уклон дренажа и определяется размер фракций $d_{сi}$, которые могут быть вынесены при продольной фильтрации.

Практика показывает, что значения коэффициентов разнозернистости грунтов обратных фильтров можно назначать в широких пределах. Это дает возможность использовать для фильтров естественные карьерные грунты без дополнительной их переработки — отсева (отмыва) частиц, обогащения.

3.9. Допускаемое значение коэффициентов разнозернистости грунтов обратных фильтров (СНиП II-53-73) не должно превышать:

а) для защищаемых несуффозионных грунтов

$$\eta_{ф}^{доп} = \frac{D_{60}}{D_{10}} \leqslant 25; \tag{54}$$

б) для защищаемых суффозионных грунтов

$$\eta_{ф}^{доп} = \frac{D_{60}}{D_{10}} \leqslant 15. \tag{55}$$

3.10. Для практических целей допустимый коэффициент разнозернистости грунтов, предназначенных для фильтров, следует назначать с учетом класса и типа сооружения, материала и способа укладки фильтра (насухо, под воду, механизацией, вручную), условий работы фильтра и др.

Рекомендуются следующие допустимые значения коэффициента разнозернистости грунтов $\eta^{доп}_{ф}$ для обратных фильтров (табл. 2).

Таблица 2

Тип сооружений	$\eta_{ф}^{доп} \leqslant$
Земляные плотины и крепления откосов:	
а) обратные фильтры из щебеночных грунтов	25
б) обратные фильтры из окатанных песчано-гравелистых грунтов	20
Сооружения III и IV классов и временные	20—25
Основания зданий гидроэлектростанций и бетонных плотин	12
Дренажи из пористого бетона	12
Дренажи плит водобоя и скважин	10
Обратные фильтры сооружений, выполняемые отсыпкой грунта в воду	10

3.11. Грунты, коэффициент разнозернистости которых превышает допустимые значения, могут быть рекомендованы к укладке в обратные фильтры только после проверки их в натурных или лабораторных условиях.

Определение допустимых междуслойных коэффициентов

3.12. Междуслойные коэффициенты $\eta_м$ выражаются следующими зависимостями:

$$\left.\begin{array}{l}\text{для первого слоя фильтра } \eta_м^{I} = \dfrac{D_{17}^{I}}{d_{сг}};\\ \text{для второго слоя фильтра } \eta_м^{II} = \dfrac{D_{17}^{II}}{D_{сг}},\end{array}\right\} \quad (56)$$

где D^{I}_{17} и D^{II}_{17} — размеры частиц грунтов первого и второго слоев обратного фильтра, которых содержится в грунте не менее 17% по массе; $d_{сг}$ и $D^{I}_{сг}$ — размеры сводообразующих частиц защищаемого грунта и грунта первого слоя фильтра.

Действительный междуслойный коэффициент должен удовлетворять условию

$$\eta_м \leqslant \eta_м^{доп}. \quad (57)$$

Допустимый междуслойный коэффициент $\eta^{доп}_м$ определяется по следующей формуле:

$$\eta_м^{доп} = \frac{1}{C_1}\frac{1-n_ф}{n_ф}, \quad (58)$$

где C_1 определяется по формуле (15), $C_1 = 0{,}252\sqrt[6]{\eta_ф}$.

Минимальное значение коэффициента фильтрации обратного фильтра

3.13. По условию водопроницаемости минимальный коэффициент фильтрации грунта обратного фильтра $k^{мин}_ф$ должен быть не меньше значения:

$$k_ф^{мин} \geqslant (2 + \sqrt[6]{\eta_ф}) \cdot k_г, \quad (59)$$

где $\eta_ф = \dfrac{D_{60}}{D_{10}}$ — коэффициент разнозернистости грунта фильтра; $k_г$ — коэффициент фильтрации защищаемого грунта.

3.14. В практических случаях для обеспечения фильтрационной прочности защищаемого грунта или по технико-экономическим соображениям (чтобы избежать неэкономичной переработки грунтов) между защищаемым грунтом и первым слоем фильтра устраивается промежуточный переходный слой (подстилающий, в качестве мощного слоя пригрузки и пр.).

Коэффициент фильтрации такого переходного слоя грунта $k_{пс}$ должен быть не меньше коэффициента фильтрации защищаемого им грунта $k_г$, т. е.

$$k_{пс} \geqslant k_г. \quad (60)$$

Толщина и число слоев фильтра

3.15. Толщина слоя обратного фильтра по фильтрационным условиям должна быть:

$$T_{мин} \geqslant (5 \div 7)\, D_{85}. \quad (61)$$

В среднем можно принимать:

$$T_{\text{мин}} \geqslant 5D_{90},$$

где D_{85} (D_{90}) — размер фракций, меньше которых в грунте фильтра содержится 85 — 90% по массе.

По условиям производства работ толщину слоев фильтра для дренажей гидротехнических сооружений следует принимать:

при ручной укладке (при планировке и уплотнении) — 10 см, но не менее $T_{\text{мин}}$ по условию (61) и $\eta_{\Phi} \leqslant 10$;

при механизированной укладке (при планировке и уплотнении) — 20 см;

при отсыпке фильтра в текущую воду:

для однослойного фильтра — не менее 0,75 м;

для двухслойного и более каждый последующий слой должен быть не менее 0,50 м (по нормали).

3.16. При укладке материала фильтра более мелкого однородного состава на крупный разнозернистый грунт (с $\eta_{\Gamma} > 100$) или на более крупный состав *II* слоя фильтра (рис. 8) часть его мелких фракций $D_1 < D^{\text{I}}_{\text{сг}}$ может просыпаться в нижний слой.

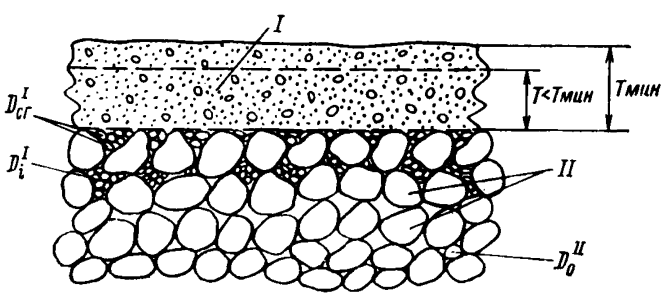

Рис. 8. Сопряжение слоев фильтра

I—слой фильтра из более мелкого материала; *II*— слой фильтра из более крупного материала; $T_{\text{мин}}$—минимальная толщина слоя фильтра; *T*—толщина слоя фильтра без учета просыпания мелких фракций $\left(D^{\text{I}}_{1} < D^{\text{I}}_{\text{сг}}\right)$ в зоне контакта со *II* слоем фильтра; $D^{\text{I}}_{\text{сг}}$—сводообразующие частицы грунта *I* слоя фильтра; $D^{\text{I}}_{\text{с1}}$—мелкие фракции *I* слоя фильтра; D^{II}_{0}—средний диаметр пор *II* слоя фильтра.

В этом случае минимальная толщина слоя $T_{\text{мин}}$, назначенная по фильтрационным условиям (61), будет нарушена, а гранулометрический состав фильтра не будет отвечать необходимым требованиям, предъявляемым к укладываемому слою фильтра.

Исходя из указанных выше условий, минимальную толщину вышележащего слоя $T_{\text{мин}}$ следует назначать с учетом возможного просыпания в процентном отношении P_1 % мелких его фракций в крупный состав грунта или фильтра.

3.17. Для определения $T_{мин}$ с учетом процента P_1 просыпания (вдавливания) мелкого грунта в крупный следует:

а) определить размер просыпающихся мелких фракций D^{I}_{1}, из условия:

$$D^{I}_{1} \leqslant 0{,}25 \sqrt[6]{\eta_{II}} \cdot \frac{n_{II}}{1 - n_{II}} \cdot D^{II}_{17}, \qquad (62)$$

где D^{I}_{1} — диаметр фракций грунта вышележащего слоя, которые могут просыпаться в подстилающий слой; η_{II}, n_{II}, D^{II}_{17} — значения параметров подстилающего слоя;

б) по полученному значению D^{I}_{1} и кривой гранулометрического состава определяем P_1 — возможный процент просыпания фракций размером D^{I}_{1} и меньше;

в) зная P_1, минимальную толщину вышележащего слоя грунта фильтра $T_{мин}$ определяем из условия:

$$T_{мин} \geqslant \frac{(5 \div 7) D_{85}}{1 - \frac{P_1}{100}}. \qquad (63)$$

Примечание. Указанное выше следует учитывать не только при назначении толщины слоя $T_{мин}$, но и для определения потребного объема фильтрового материала, сметной стоимости на производство работ, а также при контроле толщины укладки фильтров.

3.18. При применении для фильтра разнозернистого грунта обычно достаточно устройства однослойного или двухслойного фильтра.

Число слоев обратных фильтров определяется в каждом конкретном случае. При этом состав второго слоя фильтра и последующих, если в этом имеется необходимость, подбирается из условия непросыпаемости частиц грунта первого слоя во второй (см. 2.11) и по допустимым междуслойным коэффициентам, определяемым зависимостями (56), (57), (58).

Для суффозионных грунтов фильтра следует выполнить проверку на условие устойчивости контакта при продольной фильтрации, как указано в расчетном случае IV, п. 5.

Определение допустимых пористости и объемной массы грунта фильтров

3.19. Если неизвестны фактическая пористость и объемная масса скелета защищаемых грунтов и грунтов обратных фильтров, то в таких случаях для расчетов и назначения допустимой пористости защищаемых грунтов и грунтов обратных фильтров следует пользоваться графиком рис. 9 $n_ф = f(\eta_ф)$ — средними значениями зон (I) и (II) или расчетной формулой:

$$n_ф = n_0 - 0{,}1 \lg \eta_ф, \qquad (64)$$

где $n_0 = 0{,}40$ — для песчано-гравийно-галечниковых грунтов; $n_0 = 0{,}45$ — для щебеночных грунтов; $\eta_ф$ — коэффициент разнозернистости грунта.

3.20. Зная пористость $n_ф$ и плотность частиц грунта Δ, можно определить объемную массу скелета грунта по следующей формуле:

$$\gamma_{ск} = \Delta(1 - n_ф). \qquad (65)$$

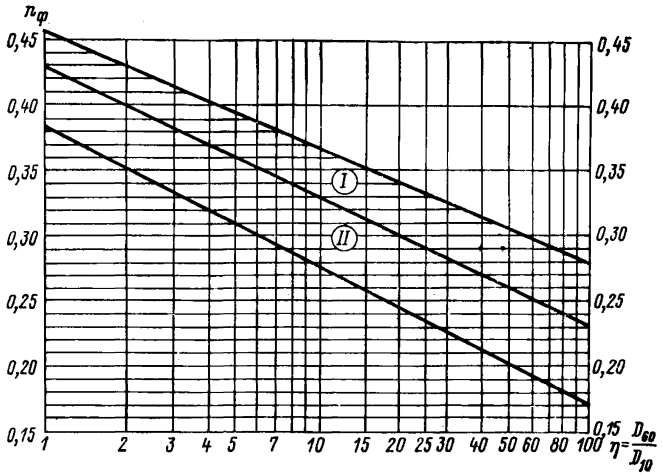

Рис. 9. График $n_ф = f(\eta_ф)$ допустимой пористости грунтов, укладываемых в обратные фильтры

I — область щебеночных грунтов; *II* — область песчано-гравийно-галечниковых грунтов

Если неизвестна плотность частиц грунта, значение ее можно принимать в пределах $\Delta = 2{,}60 \div 2{,}70$ г/см^3.

Расчетные случаи проектирования гранулометрического состава грунтов обратных фильтров

3.21. В зависимости от состава и характера заданных параметров, а также предъявляемых к работе обратного фильтра требований, при определении гранулометрического состава слоев фильтра надо различать следующие шесть основных расчетных случаев. К ним могут быть сведены все практически встречающиеся при проектировании и подборе фильтров задачи.

3.22. Проектирование гранулометрического состава обратных фильтров при отсутствии данных о карьерных грунтах для фильтров.

I случай. Защищаемый грунт имеет несуффозионный гранулометрический состав. Требуется запроектировать для него первый слой обратного фильтра также несуффозионного состава.

II случай. Защищаемый грунт имеет суффозионный гранулометрический состав. Требуется запроектировать для него

первый слой обратного фильтра из грунта несуффозионного состава.

Примечание. Расчеты по I и II случаям выполняются для выбора карьеров или при искусственном приготовлении грунтов для фильтров, если подходящих карьеров не имеется.

3.23. Подбор обратных фильтров из карьерных грунтов или материалов камнедробильных заводов.

III случай. Защищаемый грунт и карьерные грунты практически несуффозионные. Требуется подобрать первый слой обратного фильтра из заданных карьерных грунтов несуффозионного состава.

IV случай. Защищаемый грунт несуффозионный. Карьерные грунты суффозионные. Требуется подобрать первый слой обратного фильтра из заданных карьерных грунтов суффозионного состава.

V случай. Защищаемый грунт суффозионный, карьерные грунты несуффозионные. Требуется подобрать первый слой обратного фильтра из заданных карьерных грунтов несуффозионного состава.

VI случай. Защищаемый грунт и карьерные грунты суффозионные. Требуется подобрать первый слой обратного фильтра из заданных карьерных грунтов также суффозионного состава.

Методика проектирования гранулометрического состава первого слоя обратного фильтра для I и II расчетных случаев

3.24. При проектировании (подборе) обратных фильтров должны быть назначены расчетные кривые гранулометрического состава грунтов — как защищаемого грунта, так и материала фильтров:

а) за расчетный гранулометрический состав защищаемого грунта, из семейства кривых («Зоны»), следует принимать (как показывают опыты и практика) осредненный его состав, по которому должен определяться зерновой состав материала фильтров;

б) при проектировании гранулометрического состава фильтров, когда отсутствуют или неизвестны карьерные грунты (см. пример 1), получаем расчетную кривую требуемого осредненного зернового состава фильтров. Назначение «рекомендуемой зоны» выполняется, как указано в п. 3.27, г;

в) при наличии одного или нескольких карьерных грунтов, подбор зернового состава фильтров осуществляется по осредненному зерновому составу «Зоны» каждого карьерного грунта. Однако, если карьерные грунты не вписываются в «рекомендуемую зону», построенную как указано в п. 3.27, г, то в целях исключения дополнительных мероприятий по переработке карьерного грунта (обогащение или отсев крупных фракций) должны быть выполнены дополнительные проверки по предельным кривым зернового состава имеющейся «Зоны».

Расчетный случай I

3.25. Для защищаемого фильтром грунта должны быть заданы следующие исходные данные:

а) гранулометрический состав, или, как минимум, следующие значения размеров фракций: $d_{мин}$, d_3, d_{10}, d_{17}, d_{60}, d_{100};

б) коэффициент разнозернистости $\eta_г = \frac{d_{60}}{d_{10}}$;

в) объемная масса скелета грунта $\gamma_{ск}$, г/см^3 и плотность грунта Δ, г/см^3;

г) пористость $n_г$ (в долях единицы);

д) коэффициент фильтрации $k_г$, см/с.

Как указано выше, для всех расчетных случаев необходимо определить, является ли заданный грунт суффозионным или несуффозионным.

Для решения этого вопроса в п. п. 3 — 1) и 2) рекомендовано два способа, одним из которых и следует пользоваться.

3.26. Для случая I — защищаемый грунт несуффозионный — определение гранулометрического состава первого слоя обратного фильтра несуффозионного состава производится следующим образом.

1) По заданному гранулометрическому составу грунта основания выбираем расчетный диаметр сводообразующих частиц $d_{сг}$ по графику $P^{расч}_{сг} = f(\eta_г)$ рис. 7.

2) В несуффозионном грунте механическая суффозия практически невозможна. Следовательно, достаточно обеспечить непросыпаемость (или невдавливаемость) частиц скелета грунта в фильтр.

Из этого условия по зависимостям (13) и (14), исходя из полученного расчетного значения $d^{расч}_{сг}$, находим D^I_{17} первого слоя фильтра:

$$D^I_{17} = \frac{1}{0{,}252\sqrt[6]{\eta_ф}} \frac{1-n_ф}{n_ф} d_{сг}. \qquad (66)$$

При этом пористость $n_ф$ принимается для несуффозионных грунтов в зависимости от $\eta_ф$ по графику рис. 9 или по формуле (64).

3) По полученному значению D^I_{17} и экспериментальной зависимости (1) определяем (как указано в п. 2.3) гранулометрический несуффозионный состав грунта первого слоя фильтра.

Полученный таким образом несуффозионный гранулометрический состав фильтра обеспечивает прочное и устойчивое сопряжение грунта с фильтром. Так как грунты несуффозионные, вынос частиц из грунта и кольматаж фильтра невозможны.

4) Коэффициент фильтрации запроектированного фильтра может быть определен по зависимости (5).

Пример 1

3.27. Запроектировать несуффозионный гранулометрический состав грунта первого слоя обратного фильтра для несуффозионного грунта тела (и основания) земляной плотины.

Исходные данные

Гранулометрический состав грунта тела плотины (основания) представлен на рис. 10. Диаметр частиц грунта (мм): $d_{мин} = 0{,}03$; $d_3 = 0{,}05$; $d_{10} = 0{,}10$; $d_{17} = 0{,}11$; $d_{60} = 0{,}23$; $d_{100} = 2{,}0$; коэффициент

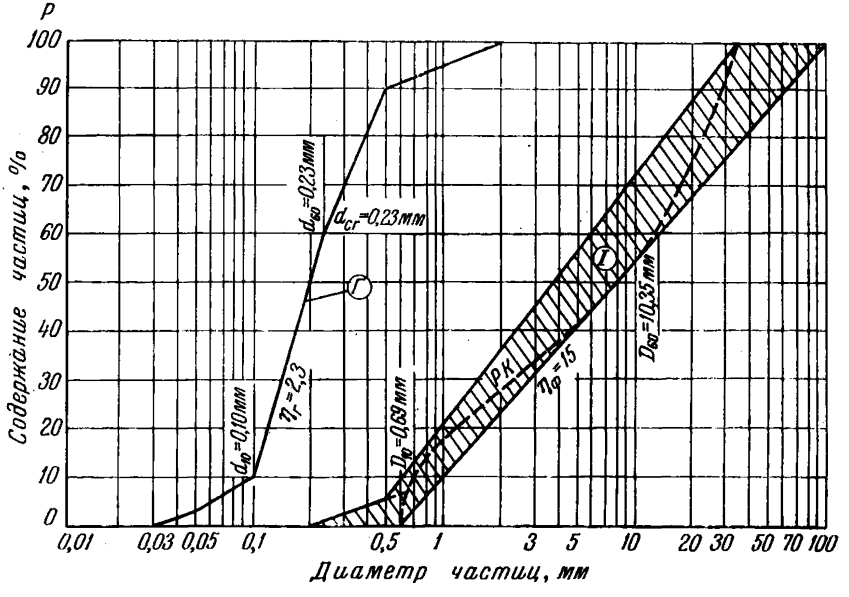

Рис. 10. График запроектированного состава фильтра

Г — грунт (тела) основания плотины; *I* — „зона допускаемого гранулометрического состава грунта, пригодного для укладки в первый слой фильтра"; *РК* — расчетная кривая

разнозернистости $\eta_г = 2{,}3$; объемная масса скелета грунта $\gamma_{ск} = 1{,}72$ г/см^3; плотность частиц грунта $\Delta = 2{,}65$ г/см^3; пористость $n_г = 1 - \gamma_{ск}/\Delta = 0{,}35$; коэффициент фильтрации $k_г = 0{,}0063$ см/с.

Порядок расчета

а) Для определения, является ли заданный грунт тела плотины суффозионным или несуффозионным, воспользуемся вторым способом, рекомендованным в п. 3.4.

Подставляя в зависимости (50) и (50′) известные величины, получим:

$$\frac{d_3}{d_{17}} = \frac{0{,}05}{0{,}11} = 0{,}45 \geqslant N = 0{,}22,$$

$$N = 0{,}32\sqrt[6]{2{,}3}\cdot(1 + 0{,}05\cdot 2{,}3)\cdot\frac{0{,}35}{1 - 0{,}35} = 0{,}22.$$

Следовательно, заданный грунт несуффозионный.

б) По заданному несуффозионному гранулометрическому составу грунта (рис. 10) выбираем по графику $P^{\text{расч}}_{\text{сг}} = f(\eta_{\text{г}})$ (рис. 7) расчетный диаметр сводообразующих частиц.

При $\eta_{\text{г}} = 2{,}3$ по графику рис. 7 для песчано-гравелистого материала фильтра (область II) $P_{\text{сг}} = 60\%$. Далее, по кривой гранулометрического состава находим $d_{\text{сг}} = d_{60} = 0{,}23$ мм.

в) Из условия непросыпаемости определяем действующий диаметр частиц грунта первого слоя фильтра D^{I}_{17} по зависимости (66), предварительно задавшись коэффициентом разнозернистости фильтра $\eta_{\text{ф}}$, по которому определяем значение пористости $n_{\text{ф}}$ из графика $n_{\text{ф}} = f(\eta_{\text{ф}})$ (рис. 9).

В данном случае принимаем $\eta_{\text{ф}} = 15$. По графику (рис. 9) для области II песчано-гравийно-галечниковых грунтов при $n_{\text{ф}} = 0{,}31$:

$$D^{\text{I}}_{17} = \frac{1}{0{,}252\sqrt[6]{\eta_{\text{ф}}}}\,\frac{1-n_{\text{ф}}}{n_{\text{ф}}}\,d_{\text{сг}} = \frac{1}{0{,}252\sqrt[6]{15}}\,\frac{1-0{,}31}{0{,}31}\,0{,}23 \approx 1{,}0 \text{ мм}.$$

г) По полученному значению $D^{\text{I}}_{17} = 1{,}0$ мм и зависимости (1) для несуффозионного грунта находим $D_{\text{мин}}$ фильтра, определив сначала значение степени x:

$$x = 1 + 1{,}28 \lg 15 = 2{,}5,$$

$$D^{\text{I}}_{\text{мин}} = \frac{D^{\text{I}}_{17}}{1 + (0{,}1P_{17})^{x}\,\dfrac{\eta_{\text{ф}}-1}{5\eta_{\text{ф}}}} = \frac{1{,}0}{1 + (0{,}1\cdot 17)^{2{,}5}\,\dfrac{15-1}{5\cdot 15}} = 0{,}58 \text{ мм}.$$

Подставляя значение $D^{\text{I}}_{\text{мин}} = 0{,}58$ мм в формулу (1), а также значения $\eta_{\text{ф}} = 15$ и $x = 2{,}5$, получим

$$D_{\text{I}} = 0{,}58 + 0{,}108\,(0{,}1P_{\text{I}})^{2{,}5}.$$

Задаваясь различными значениями $P_{\text{I}} = 10 \ldots 20 \ldots 100$, вычисляем соответствующие значения D_{I}. Так, для $P_{\text{I}} = 10$ получаем $D_{10} = 0{,}58 + 0{,}108\,(0{,}1 \cdot 10)^{2{,}5} = 0{,}69$ мм.

Ниже приведены результаты вычислений, где значения даны в миллиметрах.

D_{10}	D_{20}	D_{35}	D_{50}	$D_{60} = \eta_{\text{ф}} D_{10}$	D_{80}	D_{90}	D_{100}
0,69	1,19	1,56	6,68	10,35	20,2	26,6	34,7

По этим данным строим искомую расчетную кривую несуффозионного состава грунта первого слоя фильтра (рис. 10).

При подборе гранулометрического состава грунта фильтра допускаются небольшие отклонения от расчетной кривой в пределах «зоны допускаемого гранулометрического состава грунта, пригодного для укладки в первый слой фильтра», которую следует назначать так, чтобы расчетная кривая была ограничена

снизу касательной к кривой, проходящей через точку $D_{мин}$. Верхняя граница зоны должна проходить через точку $D_{макс}$ и на 3% выше точки D_{10} до примыкания к линии, показанной на рис. 10, пересекающейся с расчетной кривой (см. пунктир на рис. 10) на уровне $P_1 = 6\%$. Эта линия ограничивает содержание в материале фильтра мелких пылеватых фракций.

д) Полученный несуффозионный гранулометрический состав фильтра обеспечивает прочное и устойчивое сопряжение грунта с фильтром, так как вынос частиц из грунта и кольматаж фильтра невозможны.

е) Коэффициент фильтрации фильтра $k_ф$ можно определить по зависимости (5), т. е.

$$k_ф = \frac{3{,}99\varphi_1}{\nu}\sqrt[3]{\eta_ф}\,\frac{n^3_ф}{(1-n_ф)^2}\,d^2_{17} =$$

$$= \frac{3{,}99\cdot 1}{0{,}01}\sqrt[3]{15}\,\frac{0{,}31^3}{(1-0{,}31)^2}\,0{,}1^2 = 0{,}62 \text{ см/с};$$

соотношение

$$\frac{k_ф}{k_г} = \frac{0{,}62}{0{,}0063} = 98.$$

Расчетный случай II

3.28. Исходные данные и порядок проектирования для суффозионного защищаемого грунта и несуффозионного состава обратного фильтра остаются те же, что и для случая I, только при выборе сводообразующих частиц грунта $d_{сг}$ следует руководствоваться указаниями по определению $d_{сг}$ для суффозионного грунта, приведенными в п. 3.8. Кроме того, запроектированный фильтр следует проверить на некольматируемость теми частицами грунта, вынос которых допускается при условии, что они проносятся через фильтр фильтрационным потоком.

Крупность выносимых фильтрационным потоком частиц из контактной области грунта, непосредственно примыкающей к первому слою обратного фильтра, определяется по зависимости (24), т. е.

$$d_{сl} \leqslant 0{,}32 d_{сг};$$

при этом

$$d_{сl} \leqslant d_{3-5\%}.$$

Чтобы выносимые фильтрационным потоком из контактной области мелкие частицы грунта $d_{сl}$ не кольматировали первый слой обратного фильтра, должны выполняться условия (45) или (47), т. е.

$$D^1_0 \geqslant 1{,}1 a_* d_{сl}$$

или

$$\frac{D^1_{17}}{d_{сl}} \geqslant \frac{1{,}1\,(1-n_ф)}{n_ф C}\cdot a_*.$$

Пример 2

3.29. Подобрать несуффозионный гранулометрический состав первого слоя фильтра для суффозионного грунта тела земляной плотины (основания сооружения).

Исходные данные

Гранулометрический состав грунта тела плотины (основания) представлен на рис. 11, из которого находим диаметры частиц грунта (мм): $d_{мин} = 0{,}01$; $d_{10} = 0{,}10$; $d_{17} = 0{,}14$; $d_{60} = 1{,}0$; $d_{макс} = 3{,}0$; коэффициент разнозернистости $\eta_г = 10$; объемная масса скелета грунта $\gamma_{ск} = 1{,}77$ г/см^3; пористость $n_г = 0{,}33$; коэффициент фильтрации $k_г = 0{,}012$ см/с.

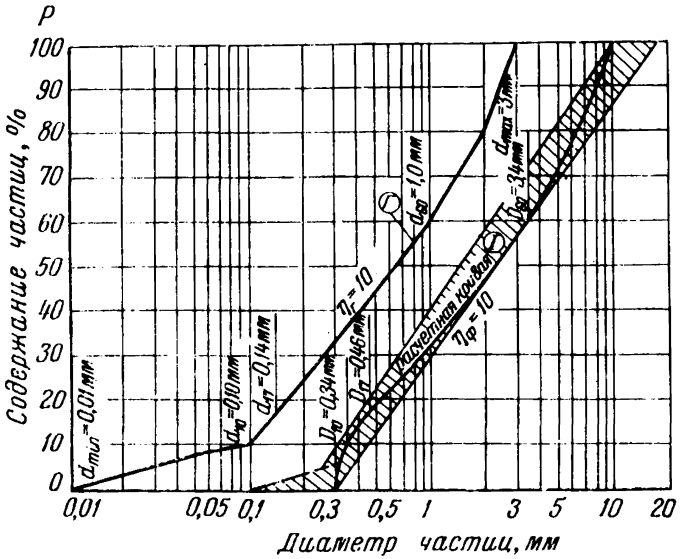

Рис. 11. График запроектированного состава фильтра к суффозионному грунту

I — грунт (тела) основания плотины; *II* — „зона допускаемого гранулометрического состава грунта, пригодного для укладки в первый слой фильтра"

Порядок расчета

а) Определяем суффозионность заданного грунта по первому способу (п. 3.4).

По зависимостям (17) или (18) определяем диаметр максимального фильтрационного хода в грунте:

$$d_0^{макс} = \varkappa C \frac{n_г}{1 - n_г} d_{17},$$

$$\varkappa = 1 + 0{,}05 \cdot 10 = 1{,}5; \quad C = 0{,}455 \sqrt[6]{10} = 0{,}66.$$

После подстановки значений, получим:

$$d_0^{\text{макс}} = 1{,}5 \cdot 0{,}66 \cdot \frac{0{,}33}{1 - 0{,}33} \cdot 0{,}14 = 0{,}07 \text{ мм}.$$

Максимальная крупность частиц, которые могут быть вынесены из грунта, определяем по формуле (21), причем получаем

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

В заданном грунте частиц, меньших 0,054 мм, содержится 8% (см. график на рис. 11), и поэтому этот грунт следует считать суффозионным.

б) По фильтрационным расчетам (или по методу ЭГДА) установлено, что в зоне контакта грунта с фильтром максимальное значение градиента напора $J^{\text{макс}}_{\text{р}} = 0{,}4$.

Для определения $d_{\text{сг}}$ сначала по зависимости (52) определяем размер частиц грунта, которые могут выноситься фильтрационным потоком:

$$d_{\text{cl}} = \frac{k_{\text{н}} J_0^{\text{макс}}}{\varphi_0 \sqrt{\frac{n_{\text{г}} g}{\nu k_{\text{г}}}}},$$

$$\varphi_0 = 0{,}60 \left(\frac{\gamma_{\text{г}}}{\gamma_{\text{в}}} - 1 \right) f_* \sin \left(30° + \frac{\theta}{8} \right),$$

где f_* определяем по графику, представленному на рис. 5, из которого следует, что для $\eta_{\text{г}} = 10$, $n_{\text{г}} = 0{,}33$, значение $f_* = 0{,}26$, $\theta = 90°$ при горизонтальной фильтрации;

$$\varphi_0 = 0{,}60 \left(\frac{1{,}77}{1} - 1 \right) \cdot 0{,}26 \cdot \sin 41{,}25° = 0{,}08;$$

$$d_{\text{cl}} = \frac{1{,}25 \cdot 0{,}4}{0{,}08 \cdot \sqrt{\frac{0{,}33 \cdot 981}{0{,}01 \cdot 0{,}012}}} = 0{,}0035 \text{ см} = 0{,}035 \text{ мм}.$$

По графику гранулометрического состава грунта (рис. 11) находим, что таких частиц содержится в грунте около 7% (т. е. $> 3 - 5\%$).

В таком случае $d_{\text{сг}}$ определяется по зависимости (53): $d^{\text{расч}}_{\text{сг}} = B d_{3-5\%}$. Подставляя в нее $B = 8$, $d_3 = 0{,}0125$ мм (из графика рис. 11), получим $d_{\text{сг}} = 8 \cdot 0{,}0125 = 0{,}10$ мм.

Если бы оказалось, что $d_{\text{cl}} < d_{3-5\%}$, расчетное значение $d^{\text{расч}}_{\text{сг}}$ следовало бы принять по графику $P^{\text{расч}}_{\text{сг}} = f(\eta_{\text{г}})$ рис. 7, кривая $B = 3$.

в) Задаваясь коэффициентом разнозернистости грунта первого слоя фильтра $\eta_{\text{ф}} = 10$, из графика $n_{\text{ф}} = f(\eta_{\text{г}})$ (область I) определяем пористость его, которая равна $n_{\text{ф}} = 0{,}37$ (рис. 9).

Далее, из условия непросыпаемости по зависимости (66) определяем действующий диаметр частиц грунта первого слоя фильтра D_{17}:

$$D_{17} = \frac{1}{0{,}252\sqrt[6]{10}} \cdot \frac{1-0{,}37}{0{,}37} \cdot 0{,}10 = 0{,}46 \text{ мм}.$$

г) По зависимости (1) и значению $D_{17} = 0{,}46$ мм определяем $D_{\text{мин}}$ фильтра, определив сначала значение степени x:

$$x = 1 + 1{,}28 \lg \eta_{\text{ф}} = 1 + 1{,}28 \lg 10 = 2{,}28;$$

$$D_{\text{мин}} = \frac{0{,}46}{1 + (0{,}1 \cdot 17)^{2{,}28} \frac{10-1}{5 \cdot 10}} = 0{,}29 \text{ мм}.$$

Подставляя значение $D_{\text{мин}} = 0{,}29$ мм; $\eta = 10$ и $x = 2{,}28$ в формулу (1), получим

$$D = 0{,}29 + 0{,}052 (0{,}1 \cdot P_1)^{2{,}28}.$$

Задаваясь различными значениями $P_1 = 10 \ldots 20 \ldots 100$, находим соответствующие значения D_1 в мм.

D_{10}	D_{20}	D_{40}	$D_{60} = \eta_{\text{ф}} \cdot D_{10}$	D_{80}	D_{100}
0,34	0,54	1,55	3,40	6,29	10,19

По этим значениям $D_{\text{мин}}$, $D_{10}, \ldots, D_{100}$ строим расчетную кривую несуффозионного состава грунта первого слоя фильтра (рис. 11) и устанавливаем, так же как и в примере 1, зону допустимого гранулометрического состава грунта, пригодного для укладки в первый слой фильтра.

д) Коэффициент фильтрации фильтра $k_{\text{ф}}$ определяем по зависимости (5):

$$k_{\text{ф}} = \frac{3{,}99 \cdot 0{,}40}{0{,}01} \cdot \sqrt[3]{10} \cdot \frac{0{,}37^3}{(1-0{,}37)^2} \cdot 0{,}046^2 = 0{,}135 \text{ см/с},$$

и получаем соотношение

$$\frac{k_{\text{ф}}}{k_{\text{г}}} = \frac{0{,}135}{0{,}014} = 9{,}65 \approx 10.$$

е) Проверяем на некольматируемость первый слой фильтра, для чего определяем размер частиц, которые могут выноситься из контактной области грунта, примыкающей к первому слою фильтра, из условия (24):

$$d_{\text{cl}}^{\text{макс}} \leqslant 0{,}32 \cdot d_{\text{сг}};$$

$$d_{\text{cl}}^{\text{макс}} = 0{,}32 \cdot 0{,}10 = 0{,}032 \text{ мм}.$$

Чтобы эти частицы не кольматировали первый слой фильтра, согласно (44) должно быть

$$d_{\text{cl}} \leqslant \frac{D_0}{1{,}1 a_*}.$$

По зависимости (9)

$$D_0 = C\frac{n_ф}{1-n_ф}D_{17} = 0{,}455\sqrt[6]{10}\cdot\frac{0{,}37}{1-0{,}37}\cdot 0{,}46 = 0{,}18 \text{ мм};$$

из табл. 1 значение параметра $a_* = 4$; следовательно,

$$d_{ci} \leqslant \frac{0{,}18}{1{,}1\cdot 4} = 0{,}041 \text{ мм}$$

и условие (44) выполняется, так как $0{,}032 < 0{,}041$.

Если воспользоваться формулой (47), то должно быть соблюдено следующее неравенство:

$$\frac{D^{I}_{17}}{d_{ci}} \geqslant \frac{1{,}1\,(1-n_ф)}{n_ф C}a_*.$$

В рассматриваемом случае

$$\frac{D^{I}_{17}}{d_{ci}} = \frac{0{,}46}{0{,}032} = 14{,}3; \qquad \frac{1{,}1\,(1-0{,}37)}{0{,}37\cdot 0{,}455\sqrt[6]{10}}\cdot 4 = 11{,}2$$

и потому условие (47) также выполняется.

Следовательно, выносимые при определенных гидродинамических условиях фильтрационным потоком частицы размером $d_{ci} = 0{,}032$ мм не будут кольматировать первый слой фильтра.

Если условия (44) и (47) не удовлетворяются, следует изменить принятый диаметр сводообразующих частиц d_{cr}. Тогда, приняв по условию (45) $D^{I}_0 = 1{,}1 d_{ci}a_*$, получаем $d_{cr} = 0{,}61 d_{ci}a_*$.

По этому значению d_{cr} находим новое значение D_{17} и по зависимости (1) получаем новую кривую гранулометрического состава грунта первого слоя фильтра, который будет удовлетворять условию некольматируемости.

Методика подбора гранулометрического состава первого слоя фильтра для III, IV, V и VI расчетных случаев

3.30. Для указанных в п. 3.23 случаев III — VI, когда, кроме защищаемого грунта основания, известны и карьерные грунты, предназначаемые для обратных фильтров, методика подбора гранулометрического состава первого слоя фильтра в сущности остается той же, что и в рассмотренных выше первых двух случаях. Но порядок расчетов, а также и условия, определяющие выбор ряда расчетных параметров, здесь будут иными. Пояснения и рекомендации по порядку расчета в этих случаях целесообразно сделать на примерах.

Расчетный случай III

Пример 3

3.31. Подобрать гранулометрический состав первого слоя фильтра для случая, когда защищаемый и карьерные грунты практически несуффозионные.

Исходные данные

Гранулометрические составы грунта тела земляной плотины, основания сооружения и карьерных грунтов, предназначенных для первого слоя обратного фильтра, представлены на рис. 12.

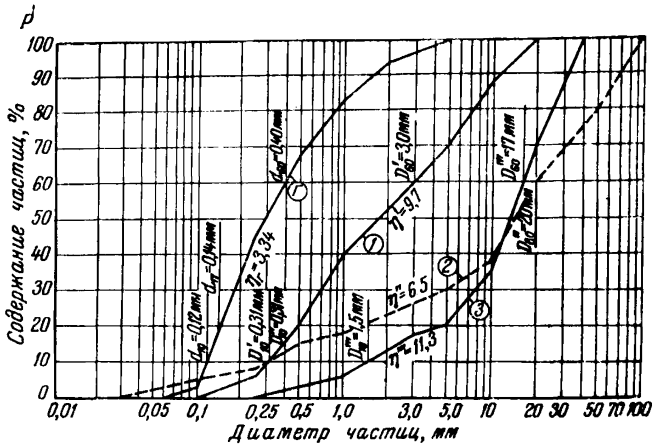

Рис. 12. Гранулометрический состав грунтов

Г — грунт тела плотины; *1, 2, 3* — карьерные грунты для первого слоя фильтра

Данные защищаемого грунта: коэффициент разнозернистости $\eta_г = 3{,}34$; пористость $n_г = 0{,}34$; коэффициент фильтрации $k_г = 0{,}0092$ см/с.

Данные карьерных грунтов

Грунт 1

коэффициент разнозернистости $\eta' = 9{,}7$;
пористость $n' = 0{,}33$;
коэффициент фильтрации $k' = 0{,}12$ см/с.

Грунт 2

коэффициент разнозернистости $\eta'' = 65$;
пористость $n'' = 0{,}25$;
коэффициент фильтрации $k'' = 0{,}31$ см/с

Грунт 3

коэффициент разнозернистости $\eta''' = 11{,}3$;
пористость $n''' = 0{,}36$;
коэффициент фильтрации $k''' = 8$ см/с.

Порядок расчета

а) Определяем суффозионность защищаемого грунта. Используем зависимость (50):

$$\frac{d_3}{d_{17}} = \frac{0{,}10}{0{,}14} = 0{,}715 \geqslant N,$$

$$N = 0{,}32\sqrt[6]{3{,}34}\,(1 + 0{,}05 \cdot 3{,}34) \cdot \frac{0{,}34}{1 - 0{,}34} = 0{,}23.$$

Следовательно, защищаемый грунт несуффозионный.

б) По заданному несуффозионному гранулометрическому составу грунта (рис. 12) выбираем по графику $P^{\text{расч}}_{\text{сг}} = f(\eta_{\text{г}})$ (рис. 7) расчетный диаметр сводообразующих частиц $d_{\text{сг}}$.

При $\eta_{\text{г}} = 3{,}34$ по графику (рис. 7), (область II) $P^{\text{расч}}_{\text{сг}} = 48 - 60\%$; $d_{\text{сг}}$ может быть выбран в пределах $d_{18} \div d_{60}$; принимаем $d_{\text{сг}} = d_{50} = 0{,}3$ мм.

в) Выясняем пригодность карьерного грунта *1* (рис. 12) для использования его в качестве первого слоя обратного фильтра:

1) Определяем суффозионность этого грунта по той же зависимости (50):

$$\frac{d_3}{d_{17}} = \frac{0{,}17}{0{,}44} = 0{,}386 \geqslant N,$$

$$N = 0{,}32 \cdot \sqrt[6]{9{,}7}\,(1 + 0{,}05 \cdot 9{,}7) \cdot \frac{0{,}33}{1 - 0{,}33} = 0{,}342.$$

Следовательно, карьерный грунт *1* несуффозионный.

2) Коэффициент разнозернистости этого грунта меньше допустимого (табл. 2): $\eta' = 9{,}7 < 20$.

3) Проверяем выполнимость условия непросыпаемости. Согласно формулам (56), (57) и (58) для междуслойного коэффициента имеем

$$\eta_{\text{м}} = \frac{D^{\text{I}}_{17}}{d_{\text{сг}}} = \frac{0{,}44}{0{,}30} = 1{,}46;$$

$$\eta^{\text{доп}}_{\text{м}} = \frac{1}{0{,}252 \cdot \sqrt[6]{\eta'}} \cdot \frac{1 - n'}{n'} = \frac{1}{0{,}252 \cdot \sqrt[6]{9{,}7}} \cdot \frac{1 - 0{,}33}{0{,}33} = 5{,}5.$$

Условие непросыпаемости соблюдается: $\eta_{\text{м}} < \eta^{\text{доп}}_{\text{м}}$.

4) По условию водопроницаемости должно быть:

$$\frac{k_{\text{ф}}}{k_{\text{г}}} \geqslant (2 + \sqrt[6]{\eta_{\text{ф}}}); \qquad 2 + \sqrt[6]{9{,}7} = 3{,}46;$$

$$\frac{k_{\text{ф}}}{k_{\text{г}}} = \frac{0{,}12}{0{,}0092} = 13 > 3{,}46.$$

Следовательно, и это условие выполняется.

Таким образом, карьерный грунт *1* удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к грунтам для первого слоя обратного фильтра, и потому он может быть рекомендован в данном случае в качестве первого слоя обратного фильтра.

5) Для установления зоны допустимых отклонений от этого состава карьерного грунта строим по зависимости (1) кривую несуффозионного состава, проходящую через точки D_{10} и D_{60} карьерного грунта *1*. Из зависимости (1) определяем $D_{\text{мин}}$, под-

ставив в нее указанное значение D'_{10} и предварительно вычислив степень x:

$$x = 1 + 1{,}28 \lg \eta' = 1 + 1{,}28 \lg 9{,}7 = 2{,}27,$$

$$D_{\text{мин}} = \frac{D_{10}}{1 + (0{,}1 + P_{10})^x \cdot \frac{\eta' - 1}{5\eta'}} =$$

$$= \frac{0{,}31}{1 + (0{,}1 \cdot 10)^{2{,}27} \frac{9{,}7 - 1}{5 \cdot 9{,}7}} = 0{,}26 \text{ мм}.$$

Для нахождения остальных значений D_i в соответствии с формулой (1) имеем

$$D_i = 0{,}26 + 0{,}047\,(0{,}1P_i)^{2{,}27},$$

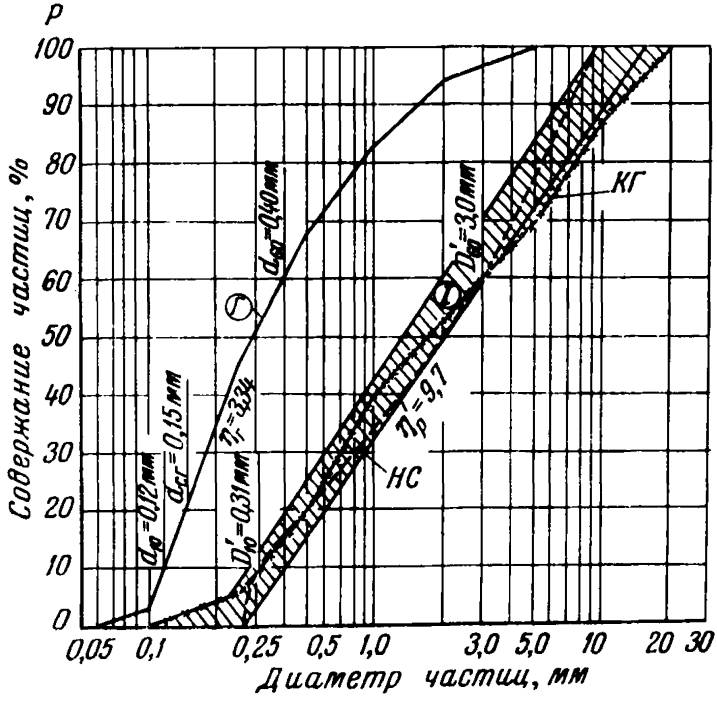

Рис. 13. График гранулометрического состава первого слоя фильтра из карьерного грунта *1*

Г — грунт тела плотины; *1* — „зона допустимого гранулометрического состава грунта, пригодного для укладки в первый слой фильтра"; *НС*—несуффозионная кривая грунта, проходящая через точки D_{10}^{I} и D_{60}^{I}

откуда, например, находим: $D_{35} = 1{,}06$ мм, $D_{80} = 5{,}53$ мм, $D_{100} = 9{,}01$ мм.

По этим значениям D_i строим кривую несуффозионного состава и по ней определяем зону допустимых отклонений от заданно-

го карьерного грунта, тем самым определяем и те грунты, которые практически могут быть использованы для первого слоя фильтра (рис. 13).

г) Те же исследования проводим для карьерного грунта 2. Этот грунт без переработки не может быть использован в качестве первого слоя фильтра для заданного защищаемого грунта, так как коэффициент разнозернистости его значительно больше допускаемого:

$$\eta'' = 65 > \eta^{доп} = 20 - 25.$$

Поэтому производим отсев мелких и крупных фракций, выполняя его в следующих трех вариантах.

Грунт *а* — отсеяны частицы с $D < 0{,}25$ мм и $D > 50$ мм $\eta = 30{,}8$.

Грунт *б* — отсеяны частицы с $D < 0{,}25$ мм и $D > 40$ мм $\eta = 29{,}2$.

Грунт *в* — отсеяны частицы с $D < 0{,}25$ мм и $D > 20$ мм $\eta = 25{,}0$.

Кривые гранулометрического состава этих грунтов приведены на рис. 14.

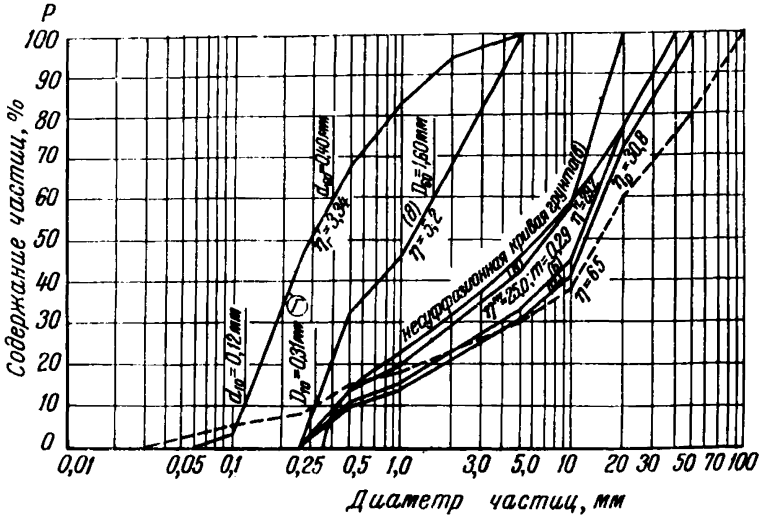

Рис. 14. Гранулометрический состав грунтов, получаемых после отсева мелких и крупных фракций из карьерного грунта 2.

Как видим, значение коэффициента разнозернистости η приближается к допустимому только для грунта *в*, грунты же *а* и *б* непригодны по значению η.

По графику (рис. 9) для $\eta_\Phi = 25$ находим пористость грунта *в*: $n_\Phi = 0{,}29$, и далее определяем суффозионность этого грунта:

$$\frac{D_3}{D_{17}} = \frac{0{,}35}{0{,}65} = 0{,}54 > N = 0{,}50;$$

$$N = 0{,}32\sqrt[8]{25}\cdot(1 + 0{,}05\cdot 25)\cdot\frac{0{,}29}{1 - 0{,}29} = 0{,}50.$$

Следовательно, грунт *в* является практически несуффозионным.

По предыдущему $d_{\text{сг}} = d_{50} = 0{,}30$ мм. Тогда действительный междуслойный коэффициент:

$$\eta_\text{м} = \frac{D_{17}^\text{I}}{d_{\text{сг}}} = \frac{0{,}65}{0{,}30} = 2{,}17,$$

допускаемый междуслойный коэффициент (58):

$$\eta_\text{м}^{\text{доп}} = \frac{1}{C_1}\cdot\frac{1 - n_\Phi}{n_\Phi} = \frac{1}{0{,}252\cdot\sqrt[8]{25}}\cdot\frac{1 - 0{,}29}{0{,}29} = 5{,}7,$$

и потому условие непросыпаемости $\eta_\text{м} < \eta^{\text{доп}}{}_\text{м}$ выполняется.

Коэффициент фильтрации грунта *в* определяем по зависисти (5):

$$k_\Phi = \frac{3{,}99\cdot 1}{0{,}01}\cdot\sqrt[3]{25}\cdot\frac{0{,}29^3}{(1 - 0{,}29)^2}\cdot 0{,}065^2 = 0{,}236 \text{ см/с}.$$

Условие водопроницаемости фильтра тоже выполняется, так как

$$\frac{k_\Phi}{k_\Gamma} = \frac{0{,}236}{0{,}0092} = 26.$$

Из этих расчетов следует, что отсеянный грунт *в* по своему составу удовлетворяет основным требованиям, предъявляемым к грунтам для обратных фильтров, и поэтому он может быть использован в качестве первого слоя обратного фильтра.

Для установления области допустимых отклонений от этого состава грунта, как и в предыдущем случае, по зависимости (1) строим кривую несуффозионного состава, проходящую через точки D_{10} и D_{60} грунта *в*.

Предварительно при $\eta_\Phi = 25$ находим:

$$x = 1 + 1{,}28\lg 25 = 2{,}79,$$

$$D_{\text{мин}} = \frac{0{,}42}{1 + (0{,}1\cdot 10)^{2{,}79}\cdot\dfrac{25 - 1}{5\cdot 25}} = 0{,}35 \text{ мм}.$$

Другие точки несуффозионной кривой ($D_1 = D_{20} \ldots D_{100}$) определяются из преобразованной для данного случая зависимости (1)

$$D_1 = 0{,}35 + 0{,}192\,(0{,}1P_1)^{2{,}79}.$$

Построенная по этому уравнению несуффозионная кривая представлена на рис. 15. При этом область допускаемого практически несуффозионного состава грунта, пригодного для укладки в первый слой фильтра, следует ограничить верхним пределом, как указывалось выше в примере 1. За нижний предел следует принять участок касательной к несуффозионной кривой до кривой грунта *в*, а далее, как показано на рис. 15.

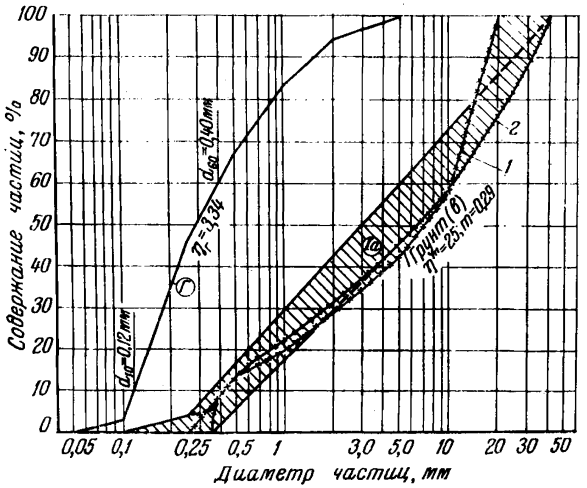

Рис. 15. График гранулометрического состава первого слоя фильтра из карьерного грунта *2*

Г — грунт тела плотины; *Iа* — „зона допустимого гранулометрического состава грунта, пригодного для укладки в первый слой фильтра"; *1* — грунт (*в*) после отсева из карьерного грунта *2* фракций $D < 0{,}25$ мм и $D > 20$ мм; *2* — несуффозионная кривая, проходящая через D_{10} и D_{60} грунта (*в*)

Запроектированный здесь состав первого слоя фильтра с максимальным коэффициентом разнозернистости дает возможность использовать карьерный грунт *2* до 50%.

Подбор состава первого слоя фильтра можно осуществить из карьерного грунта *2* и при других вариантах рассева его.

Здесь приводится еще вариант: грунт *д* с отсевом фракций $D < 0{,}25$ мм и $D > 5{,}0$ мм, $\eta_ф = 5{,}2$ (рис. 14), $n_ф = 0{,}36$ (по графику рис. 9).

Для этого варианта рассева выполняем те же расчеты, что и в предыдущем случае.

1) Определяем суффозионность грунта *д*:

$$\frac{D_3}{D_{17}} = \frac{0{,}27}{0{,}36} = 0{,}75 \geqslant N,$$

$$N = 0{,}32 \sqrt[6]{5{,}2}\,(1 + 0{,}05 \cdot 5{,}2) \cdot \frac{0{,}36}{1 - 0{,}36} \cong 0{,}30.$$

Следовательно, и этот грунт практически несуффозионный.

2) Проверяем условие непросыпаемости. Имеем $d_{cr} = d_{50} = 0{,}30$ мм; действительный междуслойный коэффициент:

$$\eta_м = \frac{D_{17}^{I}}{d_{cr}} = \frac{0{,}36}{0{,}30} = 1{,}2,$$

допустимый междуслойный коэффициент:

$$\eta_м^{доп} = \frac{1}{0{,}252 \cdot \sqrt[6]{5{,}2}} \cdot \frac{1 - 0{,}36}{0{,}36} = 5;$$

следовательно: $\eta_м < \eta_м^{доп}$ и условие непросыпаемости удовлетворяется.

3) Проверяем далее условие водопроницаемости. По формуле (5) находим:

$$k_ф = \frac{3{,}99 \cdot 1}{0{,}01} \cdot \sqrt[6]{5{,}2} \cdot \frac{0{,}36^3}{(1 - 0{,}36)^2} \cdot 0{,}036^2 = 0{,}1 \text{ см/с}.$$

Отношение $\frac{k_ф}{k_г} = \frac{0{,}1000}{0{,}0092} = 10{,}9$ и, следовательно, условие водопроницаемости тоже выполняется.

Таким образом, и этот вариант рассева карьерного грунта *2* удовлетворяет всем основным требованиям, предъявляемым к обратным фильтрам, и поэтому грунт *д* также может быть использован в качестве первого слоя обратного фильтра.

Для определения области допустимых отклонений от него строим кривую несуффозионного состава, также проходящую через точки D_{10} и D_{60} грунта *д*:

При $\eta = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{1{,}60}{0{,}31} = 5{,}2$ находим:

$$x = 1 + 1{,}28 \lg 5{,}2 = 1{,}92,$$

$$D_{мин} = \frac{0{,}31}{1 + (0{,}1 \cdot 10{,}0)^{1{,}92} \cdot \frac{5{,}2 - 1}{5 \cdot 5{,}2}} = 0{,}265 \text{ мм}.$$

Другие точки несуффозионной кривой определяем по следующей формуле, получаемой из зависимости (1):

$$D_1 = 0{,}265 + 0{,}043\,(0{,}1P_1)^{1{,}92}.$$

Построенная по этим значениям несуффозионная кривая для грунта и область допустимых отклонений в гранулометрическом составе грунта, используемого для первого слоя фильтра, приведены на рис. 16.

д) Исследование карьерного грунта *3* (рис. 12) для использования его в качестве первого слоя фильтра выполняется так же, как и карьерного грунта *2*. Так как этот грунт содержит только фракции от 0,25 до 40 мм и $\eta = 11{,}3$, то подобрать из него обратный состав фильтра проще, чем из рассмотренного выше грунта *2*. Соответствующие расчеты поэтому здесь не приводятся.

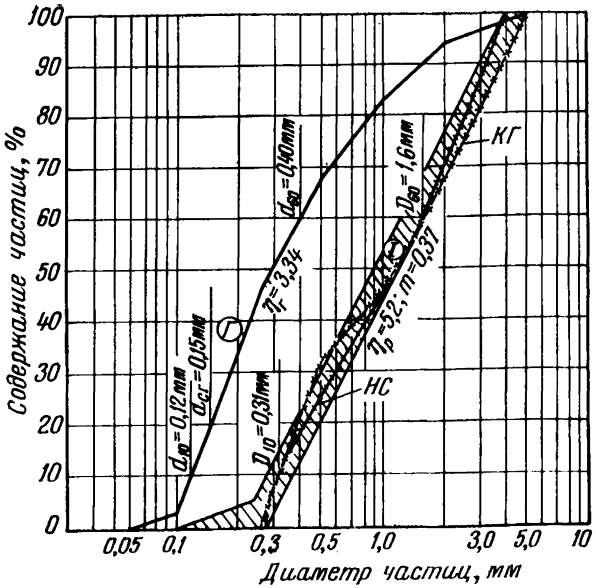

Рис. 16. График гранулометрического состава первого слоя фильтра из карьерного грунта *2* после отсева из него фракций $D < 0{,}25$ мм и $D > 5$ мм.

Расчетный случай IV

Пример 4

3.32. Защищаемый грунт несуффозионный, карьерные грунты суффозионные. Требуется подобрать первый слой фильтра из заданных карьерных грунтов суффозионного состава.

Исходные данные

Гранулометрические составы грунта тела плотины (основания сооружения) и карьерных грунтов, предназначенных для первого слоя обратного фильтра, представлены на рис. 17.

Данные защищаемого грунта

Гранулометрический состав (мм): $d_{10} = 0{,}10$; $d_{17} = 0{,}11$; $d_{60} = 0{,}23$; коэффициент разнозернистости $\eta = 2{,}3$; объемная масса скелета грунта $\gamma_{ск} = 1{,}72$ г/см^3; пористость $n_г = 0{,}35$; коэффициент фильтрации $k_г = 0{,}016$ см/с.

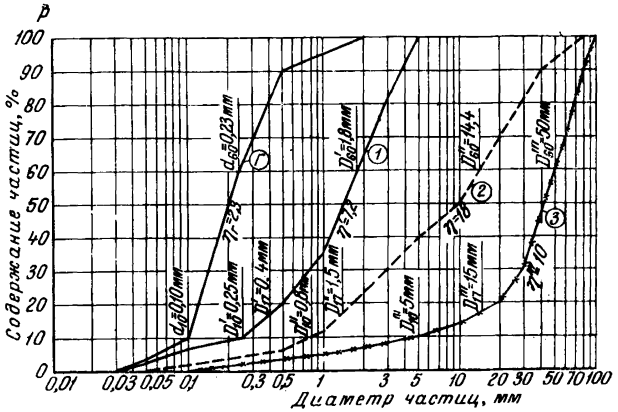

Рис. 17. Гранулометрический состав грунтов
Г — грунт тела плотины; *1, 2, 3* — карьерные грунты для первого слоя фильтра

Данные карьерных грунтов

Грунт 1 (щебеночный отсев) $D'_{10} = 0{,}25$ мм; $D'_{17} = 0{,}4$ мм; $D'_{60} = 1{,}8$ мм; $D'_{\text{макс}} = 5$ мм; коэффициент разнозернистости $\eta' = 7{,}2$; объемная масса скелета грунта $\gamma'_{\text{ск}} = 1{,}69$ г/см^3; пористость $n' = 0{,}35$; коэффициент фильтрации $k' = 0{,}11$ см/с.

Грунт 2 $D''_{10} = 0{,}8$ мм; $D''_{17} = 1{,}5$ мм; $D''_{60} = 14{,}4$ мм; $D''_{\text{макс}} = 80$ мм; коэффициент разнозернистости $\eta'' = 18$; объемная масса скелета грунта $\gamma''_{\text{ск}} = 1{,}79$ г/см^3; пористость $n'' = 0{,}33$; коэффициент фильтрации $k'' = 1{,}65$ см/с.

Грунт 3 (щебень) $D'''_{10} = 5{,}0$ мм; $D'''_{17} = 15$ мм; $D'''_{60} = 50$ мм; $D'''_{\text{макс}} = 100$ мм; коэффициент разнозернистости $\eta''' = 10$; объемная масса скелета грунта $\gamma'''_{\text{ск}} = 1{,}69$ г/см^3; пористость $n''' = 0{,}36$; коэффициент фильтрации $k''' = 60$ см/с.

Порядок расчета

а) Определяем суффозионность защищаемого грунта тела плотины (основания сооружения). Используем зависимости (50) и (50′):

$$\frac{d_3}{d_{17}} = \frac{0{,}05}{0{,}11} = 0{,}455 \geqslant N,$$

$$N = 0{,}32 \cdot \sqrt[6]{2{,}3}\,(1 + 0{,}05 \cdot 2{,}3) \cdot \frac{0{,}35}{1 - 0{,}35} = 0{,}225;$$

$$0{,}455 > 0{,}225$$

следовательно, данный грунт тела плотины является практически несуффозионным.

б) По данному несуффозионному составу грунта тела плотины (рис. 17) выбираем по графику (рис. 7) расчетный диаметр сводообразующих частиц.

Для грунта с коэффициентом разнозернистости $\eta_г = 2{,}3$ по графику находим $P_{сг} = 60 - 70\%$ (область I); $d_{сг}$ может быть выбран в пределах $d_{60} \div d_{70}$.

Принимаем $d_{сг} = d_{60} = 0{,}23$ мм.

в) Выясняем пригодность карьерного грунта *1* (рис. 17) для использования его в качестве первого слоя обратного фильтра.

1) Определяем суффозионность этого грунта по первому способу (п. 3.4).

По зависимости (18) определяем диаметр максимального фильтрационного хода в грунте *1*:

$$D_0^{макс} = \varkappa C \frac{n'}{1-n'} D'_{17} = 1{,}36 \cdot 0{,}63 \cdot \frac{0{,}35}{1-0{,}35} \cdot 0{,}4 = 0{,}185 \text{ мм},$$

$$\varkappa = 1 + 0{,}05 \cdot 7{,}2 = 1{,}36; \quad C = 0{,}455 \sqrt[6]{7{,}2} = 0{,}63.$$

Максимальную крупность частиц, которые могут быть вынесены из данного грунта при определенных гидродинамических условиях, определяем из формулы (21):

$$d^{макс}_{сl} = 0{,}77 D^{макс}_0 = 0{,}77 \cdot 0{,}185 = 0{,}142 \text{ мм}.$$

В карьерном грунте *1* таких частиц (рис. 17) содержится около 8%; следовательно, грунт *1* суффозионный.

2) Коэффициент разнозернистости грунта *1* меньше допустимого (п. 3.9 — 3.10): $\eta' = 7{,}2 < 15$.

3) Проверяем условие непросыпаемости.

Согласно формулам (56), (57) и (58), для междуслойного коэффициента имеем: $\eta_м = \frac{D'_{17}}{d_{сг}} = \frac{0{,}40}{0{,}23} = 1{,}74 \leqslant \eta_м^{доп}$;

$$\eta_м^{доп} = \frac{1}{0{,}252 \sqrt[6]{\eta'}} \cdot \frac{1-n'}{n'} = \frac{1}{0{,}252 \cdot \sqrt[6]{7{,}2}} \cdot \frac{1-0{,}35}{0{,}35} = 5{,}3.$$

Условие непросыпаемости выполняется.

4) По условию водопроницаемости должно быть (59):

$$\frac{k_ф}{k_г} \geqslant 2 + \sqrt[6]{\eta'}; \qquad 2 + \sqrt[6]{7{,}2} = 3{,}39;$$

в действительности имеем $\frac{k_ф}{k_г} = \frac{0{,}11}{0{,}016} \cong 7 > 3{,}39$.

Следовательно, и это условие выполняется.

Таким образом, карьерный грунт *1* суффозионного состава удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к грунтам первого слоя фильтра, и поэтому он может быть рекомендован в качестве обратного фильтра без дополнительной переработки.

5) Установим зону допустимых отклонений от состава карьерного грунта *1*. Для этого по зависимости (1) построим кривую несуффозионного состава, проходящую через точки D'_{10} и D'_{60}

карьерного грунта *1* (рис. 18). Далее по той же зависимости (1) определяем $D_{мин}$, подставив в нее значение $D'_{10} = 0{,}25$ мм и вычислив $x = 1 + 1{,}28 \lg 7{,}2 = 2{,}1$:

$$D_{мин} = \frac{D'_{10}}{1 + (0{,}1 \cdot P_{10})^x \frac{\eta' - 1}{5\eta'}} = \frac{0{,}25}{1 + (0{,}1 \cdot 10)^{2{,}1} \frac{7{,}2 - 1}{5{,}72}} = 0{,}21 \text{ мм}.$$

Для нахождения остальных значений D_1 имеем:

$$D_1 = 0{,}21 + 0{,}036 (0{,}1 P_1)^{2{,}1},$$

откуда находим: $D_{35} = 0{,}65$ мм, $D_{80} = 2{,}52$ мм, $D_{100} = 3{,}82$ мм.

По точкам $D_{мин}$, D_{10}, D_{35}, D_{60}, D_{80} и D_{100} строим кривую несуффозионного состава и определяем зону допустимого состава грунта, ограничив ее снизу касательной, проходящей через точку $D_{мин} = 0{,}21$ мм, и сверху — прямой от $D_{макс} = 3{,}82$ мм и на 3% выше D_{10} до примыкания к кривой грунта *1* (рис. 18).

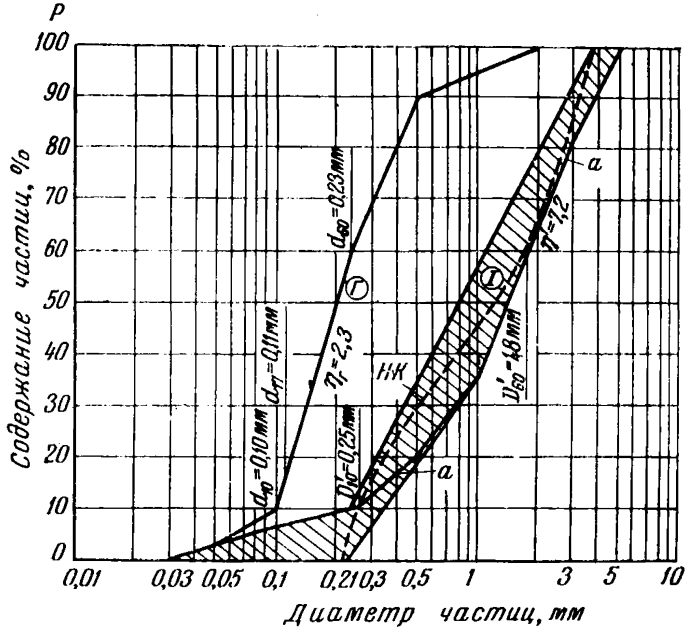

Рис. 18. График допустимого состава фильтра

I — грунт тела плотины; *1* — зона грунтов для фильтра; *а* — естественный карьерный грунт; *НК* — несуффозионная кривая, проходящая через D^{I}_{10} и D^{I}_{60} карьерного грунта

Примечание. При установлении зоны допустимых отклонений от гранулометрического состава расчетной кривой или кривой карьерного грунта (удовлетворяющего всем условиям и пригодного для фильтра) необходимо учитывать следующее.

а) Нижняя граница зоны не должна выходить за пределы несуффозионной кривой и касательной к ней или к кривой карьерного грунта. Отклонение в сторону нижней зоны приводит к изменению фильтрационно-суффозионных свойств фильтра.

б) Увеличение верхней границы зоны дает запас прочности защищаемого грунта и грунта фильтра. Однако следует учитывать водопроницаемость фильтра.

6) Учитывая, что данный грунт фильтра *I* (рис. 18) является суффозионным, из него при определенных гидродинамических условиях, могут быть вынесены мелкие фракции $d^{\text{макс}}_{\text{cl}} < 0{,}142$ мм, что составляет 8%, определим значение критического градиента выноса $J_{\text{кр}}$ данных фракций, по формуле (33):

$$J_{\text{кр}} = \varphi_0 d^{\text{макс}}_{\text{cl}} \sqrt{\frac{n_\Phi g}{\nu k_\Phi}},$$

где $d^{\text{макс}}_{\text{cl}} = 0{,}142$ мм $= 0{,}0142$ см;

$$\varphi_0 = 0{,}60 \cdot \left(\frac{\gamma'_{\text{ск}}}{\gamma_{\text{в}}} - 1\right) f_* \sin\left(30° + \frac{\theta}{8}\right);$$

$\gamma'_{\text{ск}} = 1{,}69$ г/см^3; $\gamma_{\text{в}} = 1$ г/см^3; $\theta = 90°$ — при горизонтальной фильтрации; $f_* = 0{,}2$ для $n'_\Phi = 0{,}35$ и $\eta' = 7{,}2$ по графику $f_* = f(\eta)$, рис. 5.

После подстановки значений, получим:

$$\varphi_0 = 0{,}60 \cdot \left(\frac{1{,}69}{1} - 1\right) \cdot 0{,}2 \sin\left(30° + \frac{90°}{8}\right) = 0{,}0546;$$

$$J_{\text{кр}} = 0{,}0546 \cdot 0{,}0142 \sqrt{\frac{0{,}35 \cdot 981}{0{,}01 \cdot 0{,}11}} = 0{,}43,$$

что в практических условиях маловероятно.

Так, в данном случае для защищаемого несуффозионного грунта $J_{\text{доп}} \leqslant 0{,}75$, тогда градиент напора в фильтре должен быть:

$$J_\Phi = J_{\text{г}} \frac{k_{\text{г}}}{k_\Phi} = 0{,}75 \frac{0{,}016}{0{,}11} = 0{,}1.$$

Приведенные расчеты показывают, что естественные карьерные грунты суффозионного состава могут быть использованы для устройства фильтров без дорогостоящей их переработки (рассева, обогащения и пр.).

7) Проверка прочности фильтра суффозионного состава на продольную фильтрацию может осуществляться по указанной выше (в п. 4) методике, по формуле (33), заменив $J_{\text{кр}}$ уклоном уложенного дренажа, т. е. $J_{\text{кр}} = J_{\text{пр}}$, где $J_{\text{пр}}$ — продольный уклон дренажа, тогда определяется размер фракций d_{cl}, которые могут быть вынесены из рассматриваемого суффозионного грунта фильтра, при продольной фильтрации, согласно формуле (52), т. е.

$$d_{\text{cl}} = \frac{k_{\text{н}} J_{\text{пр}}}{\varphi_0 \sqrt{\frac{ng}{\nu k_\Phi}}},$$

где $k_н = 1{,}25 - 1{,}10$ — коэффициент надежности принимается согласно (35).

г) Проведем исследования карьерного грунта *2* с целью выяснения возможности использования его в качестве первого слоя обратного фильтра для заданного грунта тела плотины (или основания сооружения).

Определим суффозионность этого грунта по первому способу п. 3.4.

По зависимости (18) определяем диаметр максимального фильтрационного хода в грунте *2*:

$$D_0^{макс} = \varkappa C \frac{n''}{1-n''} \cdot D''_{17} = 1{,}9 \cdot 0{,}74 \cdot \frac{0{,}33}{1-0{,}33} \cdot 1{,}5 = 1{,}04 \text{ мм};$$

$$\varkappa = 1 + 0{,}05 \cdot 18 = 1{,}9; \qquad C = 0{,}455 \cdot \sqrt[6]{18} = 0{,}74.$$

Максимальная крупность частиц, которые могут быть вынесены:

$$d^{макс}_{сi} = 0{,}77 D^{макс}_0 = 0{,}77 \cdot 1{,}04 = 0{,}80 \text{ мм}.$$

В грунте *2* таких частиц (рис. 16) содержится 10%, следовательно, грунт суффозионный.

Суффозионный карьерный грунт *2* не может быть использован в качестве первого слоя обратного фильтра без переработки, так как коэффициент разнозернистости его больше допустимого:

$$\eta'' = \frac{D''_{60}}{D''_{10}} = 18 > \eta^{доп} = 15.$$

Кроме того, он не удовлетворяет условию непросыпаемости. Действительно:

$$\eta_м = \frac{D''_{17}}{d_{сг}} = \frac{1{,}5}{0{,}23} = 6{,}5;$$

$$\eta_м^{доп} = \frac{1}{0{,}252 \cdot \sqrt[6]{\eta''}} \cdot \frac{1-n''}{n''} = \frac{1}{0{,}252 \cdot \sqrt[6]{18}} \cdot \frac{1-0{,}33}{0{,}33} = 5;$$

$$\eta_м = 6{,}5 > \eta_м^{доп} = 5.$$

Поэтому в первом приближении намечаем отсев крупных фракций $D > 10$ мм. Полученный после отсева фракций $D > 10$ мм гранулометрический состав грунта (приведенный к 100%-ному составу) показан на рис. 19.

д) Выясним пригодность данного грунта после отсева фракций $D > 10$ мм для использования его в качестве первого слоя фильтра.

1) Определяем суффозионность этого грунта, как указано выше (п. в), причем пористость его $n = 0{,}34$ по графику рис. 9.

По зависимости (18) определяем диаметр максимального фильтрационного хода в грунте *I* (рис. 19):

$$D_0^{\text{макс}} = 1{,}43 \cdot 0{,}65 \cdot \frac{0{,}34}{1 - 0{,}34} \cdot 0{,}66 = 0{,}315 \text{ мм};$$

$$\varkappa = 1 - 0{,}05 \cdot 8{,}6 = 1{,}43; \qquad C = 0{,}455 \cdot \sqrt[6]{8{,}6} = 0{,}65.$$

Максимальная крупность частиц, которые могут быть вынесены:

$$d^{\text{макс}}_{\text{сl}} = 0{,}77 \cdot 0{,}315 = 0{,}24 \text{ мм}.$$

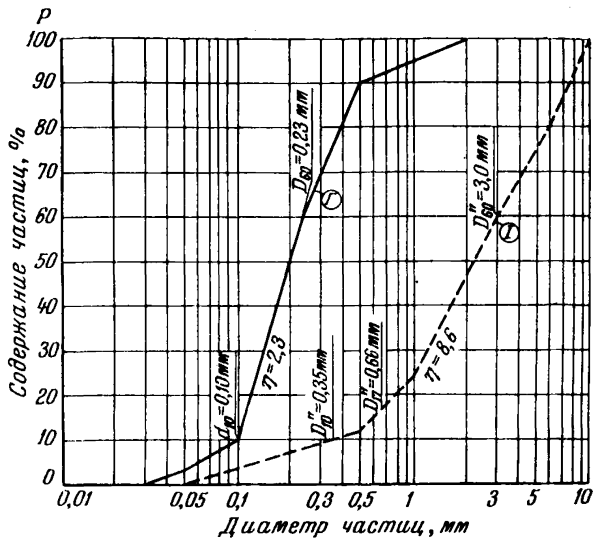

Рис. 19. Гранулометрический состав грунтов

Г — грунт тела плотины (основания сооружения); *1* — грунт первого слоя фильтра, полученный после отсева фракций $D > 10$ мм из карьерного грунта *2*

В данном грунте (рис. 19) таких частиц содержится около 8%; следовательно, грунт суффозионный.

2) Коэффициент разнозернистости грунта меньше допускаемого:

$$\eta_{\text{I}} = 8{,}6 < 15.$$

Данное требование удовлетворяется.

3) Проверяем условие непросыпаемости:

$$\eta_{\text{м}} = \frac{0{,}66}{0{,}23} = 2{,}9 \leqslant \eta_{\text{м}}^{\text{доп}}; \qquad \eta_{\text{м}}^{\text{доп}} = \frac{1}{0{,}252 \cdot \sqrt[6]{8{,}6}} \cdot \frac{1 - 0{,}34}{0{,}34} = 5{,}4.$$

Условие непросыпаемости удовлетворяется.

4) По условию водопроницаемости должно быть:

$$k_{\text{ф}} \geqslant (2 + \sqrt[6]{\eta})\, k_{\text{г}}; \quad (2 + \sqrt[6]{8{,}6}) \cdot 0{,}016 = 0{,}055 \text{ см/с},$$

$$k_\Phi = \frac{3{,}99\varphi_1}{\nu}\sqrt[3]{\eta_1}\,\frac{n^3}{(1-n)^2}\,D_{17}^2 =$$

$$= \frac{3{,}99\cdot 1}{0{,}01}\cdot\sqrt[3]{8{,}6}\cdot\frac{0{,}34^3}{(1-0{,}34)^2}\cdot 0{,}066^2 = 0{,}32 \text{ см/с},$$

$$\frac{k_\Phi}{k_\Gamma} = \frac{0{,}32}{0{,}055} = 5{,}8.$$

Это условие также выполняется.

Таким образом, естественный карьерный грунт *2* может быть использован в качестве первого слоя фильтров при условии отсева фракций $D > 10$ мм, которых в грунте содержится около 50%. Другие варианты рассева непригодны, так как получаемые грунты не будут удовлетворять требованиям, предъявляемым к грунтам первого слоя фильтра.

Дальнейшие расчеты по определению $J_{доп}$ и $J_{кр}$, а также определение зоны допустимых отклонений от данного расчетного состава грунта выполняются аналогично приведенным расчетам в данном примере для грунта *1*.

е) Карьерный грунт *3* по своему гранулометрическому составу, как видно из рис. 17, не может быть использован для первого слоя фильтра как в своем естественном составе, так и при рассеве.

Если отсеять фракции $D > 10$ мм, что составит 86% от общего объема грунта, то получим гранулометрический состав грунта с коэффициентом разнозернистости $\eta = 17$. Если же отсеять фракции $D > 20$ мм, что составит 80% от общего объема грунта, то получим гранулометрический состав грунта с коэффициентом разнозернистости $\eta = 28$ и т. д.

Отсюда следует, что грунт *3*, по технико-экономическим условиям, не может быть рекомендован для устройства первого слоя фильтра.

Расчетный случай V

3.33. Защищаемый грунт суффозионный, карьерные грунты — несуффозионные. Требуется подобрать первый слой фильтра из заданных карьерных грунтов.

Исходные данные

Гранулометрические составы грунта тела плотины (основания сооружения) и карьерных грунтов, предназначенных для первого слоя обратного фильтра, представлены на рис. 20.

Данные защищаемого грунта

Гранулометрический состав (мм): $d_{10} = 0{,}30$; $d_{17} = 0{,}47$; $d_{60} = 25$; $d_{макс} = 70$; коэффициент разнозернистости $\eta_\Gamma = 83{,}2$; объемная масса $\gamma_\Gamma = 1{,}92$ г/см^3; пористость $n_\Gamma = 0{,}28$; коэффициент фильтрации $k_\Gamma = 0{,}09$ см/с.

Данные карьерных грунтов

Грунт 1. $D'_{10} = 0{,}85$ мм; $D'_{17} = 1{,}5$ мм; $D'_{60} = 12$ мм; $D'_{\text{макс}} = 30$ мм; коэффициент разнозернистости $\eta' = 14{,}1$; объемная масса скелета грунта $\gamma' = 1{,}85$ г/см^3; пористость $n' = 0{,}30$; коэффициент фильтрации $k' = 1{,}04$ см/с.

Грунт 2. $D''_{10} = 1{,}9$ мм; $D''_{17} = 4{,}4$ мм; $D''_{60} = 50$ мм; $D''_{\text{макс}} = 100$ мм; коэффициент разнозернистости $\eta'' = 26{,}4$; объемная масса скелета грунта $\gamma'' = 1{,}88$ г/см^3; пористость $n'' = 0{,}29$; коэффициент фильтрации $k'' = 3{,}6$ см/с.

Порядок расчета

а) Определяем суффозионность защищаемого грунта тела плотины (основания сооружения).

По зависимости (18) определяем диаметр максимального фильтрационного хода в данном грунте:

$$d_0^{\text{макс}} = \varkappa C \frac{n_г}{1 - n_г} d_{17} = 5{,}16 \cdot 0{,}95 \cdot \frac{0{,}28}{1 - 0{,}28} \cdot 0{,}47 = 0{,}90 \text{ мм},$$

$$\varkappa = 1 + 0{,}05 \cdot 83{,}2 = 5{,}16; \qquad C = 0{,}455 \sqrt[6]{83{,}2} = 0{,}95.$$

Максимальную крупность частиц, которые могут быть вынесены из данного грунта при определенных гидродинамических условиях определяем из зависимости (21):

$$d^{\text{макс}}{}_{\text{cl}} = 0{,}77 d^{\text{макс}}{}_0 = 0{,}77 \cdot 0{,}90 = 0{,}69 \text{ мм}.$$

В данном грунте таких частиц содержится 23% (рис. 20, кривая грунта *Г*); следовательно, защищаемый грунт — суффозионный.

б) Для заданного суффозионного грунта тела плотины (основания сооружения) определяем расчетный диаметр сводообразующих частиц $d_{\text{сг}}$.

По формуле (52) определяем размер выносимых частиц грунта d_{cl} из зоны контакта при заданном максимальном градиенте напора $J^{\text{макс}}{}_{\text{р}} = 0{,}2$.

Из зависимостей (27) и (28) определяем значение φ_0, предварительно определив f_*:

$$f_* = 0{,}82 - 1{,}8 n_г + 0{,}0062 (\eta_г - 5) =$$
$$= 0{,}82 - 1{,}8 \cdot 0{,}28 + 0{,}0062 (83{,}2 - 5) = 0{,}80.$$

При $\gamma_г = 1{,}92$ г/см^3, $\gamma_в = 1$ г/см^3 и $\theta = 90°$

$$\varphi_0 = 0{,}60 \cdot \left(\frac{\gamma_г}{\gamma_в} - 1\right) f_* \sin\left(30° + \frac{\theta}{8}\right) =$$
$$= 0{,}60 \cdot \left(\frac{1{,}92}{1} - 1\right) \cdot 0{,}80 \sin\left(30° + \frac{90°}{8}\right) = 0{,}29.$$

Подставляя полученные значения в (52), получим:

$$d_{\text{cl}} = \frac{1{,}25 \cdot 0{,}2}{0{,}29 \cdot \sqrt{\frac{0{,}28 \cdot 981}{0{,}01 \cdot 0{,}09}}} = 0{,}0017 \text{ см} = 0{,}017 \text{ мм}.$$

Как видим (рис. 20), таких частиц в данном грунте нет. Следовательно, гидродинамические условия можно не учитывать. В таком случае расчетное значение d_{cr} определяется из графика $P_{cr} = f(\eta)$ рис. 7, кривая $B = 3$.

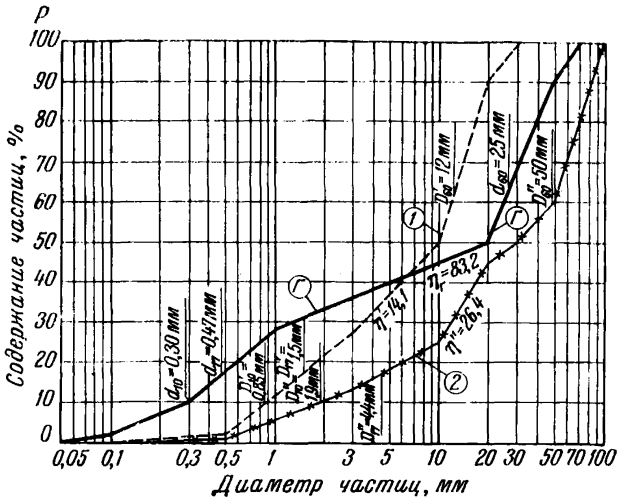

Рис. 20. Гранулометрический состав грунтов
Г – грунт тела плотины; *1*, *2* — карьерные грунты для первого слоя фильтра

Для $\eta_г = 82{,}3$ находим $P^{расч}_{cr} = 20$; принимаем $d_{cr} = d_{20} = 0{,}60$ мм.

в) Выясняем пригодность карьерного грунта *1* (рис. 20) для использования его в качестве первого слоя обратного фильтра.

1) Определяем суффозионность этого грунта по зависимости (50) и (50′), причем по графику гранулометрического состава грунта (рис. 20) $d_3 = 0{,}54$ мм:

$$\frac{d_3}{d_{17}} = \frac{0{,}54}{1{,}50} = 0{,}36 \geqslant N, \quad N = 0{,}32 \cdot \sqrt[6]{14{,}1} \cdot (1 + 0{,}05 \cdot 14{,}1) \cdot \frac{0{,}30}{1 - 0{,}30} = 0{,}36.$$

Следовательно, данный грунт можно считать практически несуффозионным.

2) Коэффициент разнозернистости данного грунта меньше допустимого: $\eta' = 14{,}1 < 20$.

3) Проверяем условие непросыпаемости. Согласно формулам (56) и (58) имеем: $\eta'_м = \frac{1{,}50}{0{,}60} = 2{,}5$,

$$\eta^{доп}_м = \frac{1}{0{,}252 \cdot \sqrt[6]{14{,}1}} \cdot \frac{1 - 0{,}30}{0{,}30} = 6{,}0.$$

Условие непросыпаемости выполняется, так как $\eta'_м < \eta^{доп}_м$.

4) По условию водопроницаемости должно быть

$$\frac{k_ф}{k_г} \geqslant 2 + \sqrt[6]{\eta'}, \qquad 2 + \sqrt[6]{14{,}1} = 3{,}55$$

в действительности имеем $\frac{k_ф}{k_г} = \frac{1{,}04}{0{,}09} = 11{,}5 > 3{,}55$; и это условие удовлетворяется.

5) Если грунт тела плотины (основания сооружения) суффозионный, необходимо сделать еще проверку на некольматируемость первого слоя фильтра.

Однако в данном случае, как следует из гидродинамических условий, выноса частиц грунта из контактной зоны не будет.

Следовательно, проверка на некольматируемость первого слоя фильтра отпадает.

Таким образом, естественный карьерный грунт *1* несуффозионного состава удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к грунту первого слоя фильтра, защищающего суффозионный грунт основания, и, следовательно, карьерный грунт *1* может быть рекомендован в первый слой обратного фильтра без дополнительной переработки.

6) Установим зону допустимых отклонений от состава карьерного грунта *1*.

Для этого, как указывалось ранее (пример 4, п. 3), строим кривую несуффозионного состава, проходящую через точки D'_{10} и D'_{60} кривой карьерного грунта *1* (рис. 21). Снизу ограничиваем зону допустимого состава грунта касательной от точки $D_{мин} = 0{,}70$ мм до естественной кривой карьерного грунта *1* и далее до несуффозионной кривой. Сверху проводим прямую, как показано на рис. 21.

г) Исследования карьерного грунта *2* (рис. 20) с целью выяснения возможности использования его в качестве первого слоя обратного фильтра для заданного суффозионного грунта тела плотины (основания сооружения) остаются те же, что и для карьерного грунта *1*, с некоторым дополнением, которое сводится к следующему.

Карьерный грунт *2* без переработки не может быть использован в качестве первого слоя фильтра, так как коэффициент разнозернистости его больше допустимого:

$$\eta'' = 26{,}4 > 15 - 25.$$

Поэтому намечаем отсев фракций, стремясь сохранить при этом максимальное количество грунта, пригодного для первого слоя фильтра.

В первом приближении следует намечать к отсеву более крупные (или мелкие) фракции. После каждого отсева фракций $\leqslant D_1$ оставшийся гранулометрический состав грунта принимается за 100% и путем пересчета строится кривая его гранулометриче-

ского состава. Полученный грунт анализируется на его пригодность для первого слоя фильтра. При неудовлетворительных результатах намечаются к отсеву следующие крупные или мелкие фракции $\geqslant D_1$.

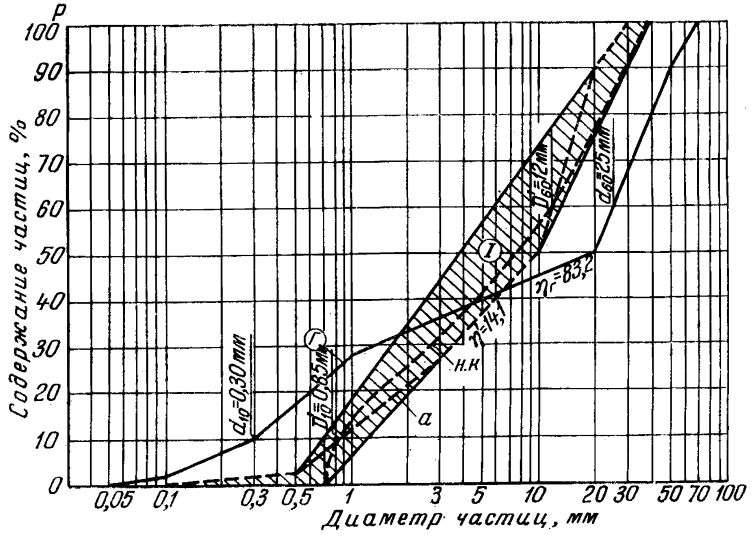

Рис. 21. График допустимого состава фильтра

Г — грунт тела плотины (основания сооружения); *I* — зона грунтов для фильтра; *а* — естественный карьерный грунт; *НК* — несуффозионная кривая, проходящая через D_{10} и D_{60} карьерного грунта

В качестве примера проанализируем порядок обработки карьерного грунта *2*.

В первом приближении намечаем к отсеву крупные фракции $D_1 > 50$ мм, составляющие 40% состава грунта, и путем пересчета строим кривую гранулометрического состава этого грунта (рис. 22, кривая *а*), полученного после отсева фракций $D_1 > > 50$ мм.

Полученный состав грунта исследуем на пригодность для первого слоя фильтра (для расчетного случая V).

а) Определяем суффозионность этого грунта:

$$\frac{D_3}{D_{17}} = \frac{0{,}58}{1{,}90} = 0{,}305 \geqslant N;$$

далее находим: $\eta' = 14{,}8$ — по кривой *а* рис. 22; $n' = 0{,}34$ — из графика рис. 9 (область *I*);

и после подстановки значений получим

$$N = 0{,}32\sqrt[6]{14{,}8}\cdot(1 + 0{,}05\cdot 14{,}8)\cdot\frac{0{,}34}{1-0{,}34} = 0{,}45.$$

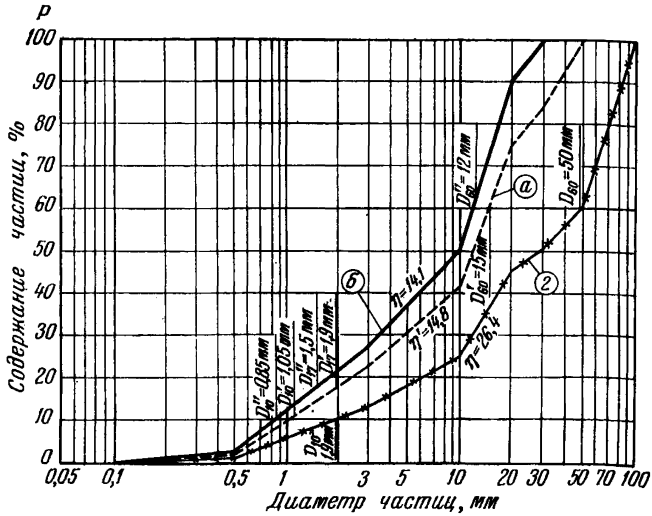

Рис. 22. Гранулометрический состав грунтов, полученных после отсева крупных фракций $D > 50$ мм (грунт «*а*») и $D < 30$ мм (грунт «*б*») из карьерного грунта *2*.

Грунт практически суффозионный с коэффициентом разнозернистости $\eta' = 14{,}8$.

Следовательно, данный грунт (с отсевом $D_1 > 50$ мм) не может быть использован в качестве первого слоя фильтра. Намечаем к отсеву следующий меньший размер фракций $D_1 > 30$ мм, т. е. 50% состава грунта, и, как и в первом случае, путем пересчета строим кривую гранулометрического состава этого грунта (рис. 22, кривая *б*).

Как следует из рис. 22 (кривая *б*), состав грунта, полученный после отсева из карьерного грунта *2* фракций $D_1 > 30$ мм, соответствует гранулометрическому составу карьерного грунта *1* (рис. 20 и 21).

Таким образом, путем отсева фракций $D_1 > 30$ мм из карьерного грунта *2* получаем гранулометрический состав грунта, который удовлетворяет всем требованиям расчетного случая *V*.

Дальнейшие расчеты выполняются так же, как указано выше для карьерного грунта *1*.

Расчетный случай VI

3.34. Защищаемый грунт и карьерные грунты суффозионные. Требуется подобрать первый слой фильтра из заданных карьерных грунтов также суффозионного состава.

Для суффозионного грунта основания методика подбора суффозионного состава первого слоя обратного фильтра из карьерных грунтов остается та же, как это изложено в 3.28 (расчетный случай *II*) для суффозионного защищаемого грунта и в 3.32 (расчетный случай *IV*) для суффозионного грунта обратного фильтра. Для защищаемого грунта и каждого карьерного грунта, предназначаемого для первого слоя фильтра, следует определить:

а) суффозионность защищаемого грунта по одному из двух приведенных в Рекомендациях способов (3.4; 3.6);

б) в зависимости от величины коэффициента разнозернистости $\eta_г = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ и суффозионности грунта — размер сводообразующих частиц $d_{сг} = f(\eta_г)$ по графику рис. 7 или по расчетам, указанным в 3.7 — 3.8;

в) размер мелких частиц $d_{сi}$ (по формуле 52) и допустимый процент их выноса, при котором не нарушается прочность и устойчивость сооружения;

г) суффозионность карьерных грунтов для обратного фильтра;

д) размер крупных или мелких фракций D_i, подлежащих отсеву, в зависимости от величины коэффициента разнозернистости так, чтобы $\eta_ф \leqslant \eta^{доп}_ф$;

е) условие непросыпаемости по междуслойным коэффициентам по формулам (56), (57) и (58);

ж) условие водопроницаемости фильтра по формуле (59);

з) размер суффозионных частиц $d_{сi}$ грунта фильтра, допустимых к выносу фильтрационным потоком;

и) критический градиент напора $J_{кр}$ в первом слое фильтра для удовлетворения условия $J_{доп} \leqslant J_{кр}$, а при наличии второго слоя фильтра — его некольматируемость.

Примечание. Во избежание повторения, численный пример для данного случая (*VI*) не приводится. При расчетах следует пользоваться численными примерами, изложенными выше.

4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ (ПОДБОР) СОСТАВА ФИЛЬТРОВОЙ ПОДГОТОВКИ ПОД КАМЕННЫЕ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КРЕПЛЕНИЯ ВЕРХОВЫХ ОТКОСОВ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН ИЗ НЕСВЯЗНОГО ГРУНТА *

4.1. При проектировании гранулометрического состава фильтровой подготовки как под каменные, так и железобетонные креп-

* Проектирование крепления верховых откосов плотин производится согласно СНиП II-53-73. В настоящем разделе приводится лишь метод проектирования и подбора состава фильтровой подготовки под принятый в проекте тип крепления.

ления верховых откосов плотин (каналов) необходимо исходить из следующих условий (рис. 23).

1) Гранулометрический состав грунта фильтровой подготовки под верховые крепления откосов плотин (каналов) должен быть практически несуффозионным, удовлетворяющим зависимостям (50) и (50′) или уравнению (1).

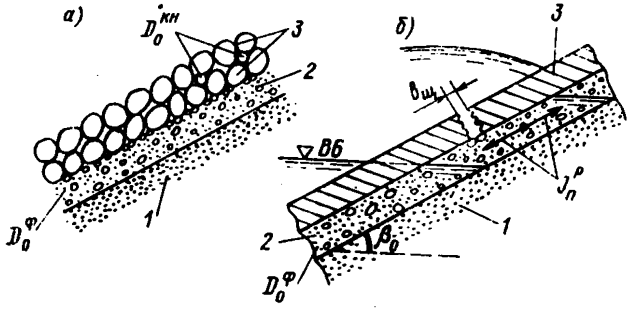

Рис. 23. Крепления верховых откосов

а — каменное крепление; *б* — железобетонные плиты; *1* — грунт тела плотины; *2* — фильтровая подготовка; *3* — верховое покрытие; $D_0^{кн}$ — средний диаметр пор фильтровой подготовки; $в_{щ}$ — ширина раскрытия щели; $J_п^р$ — расчетный градиент напора при пульсации воды в слое фильтровой подготовки; β_0 — угол наклона откоса к горизонту

2) Состав фильтровой подготовки должен надежно защищать грунт тела плотины (канала) от суффозионных явлений при волновых воздействиях на откос (вследствие возникновения пульсации воды в слое фильтровой подготовки от наката и спада волны).

Эти условия будут выполнены, если расчетный размер фракций фильтровой подготовки $D^{расч}_{85}$ будет принят по следующей зависимости:

$$D^{расч}_{85} \geqslant \frac{4(1-n_ф)}{n_ф \sqrt[6]{\eta_ф}} B' d_{сг}, \qquad (67)$$

где $n_ф$ — пористость фильтровой подготовки, принимается по графику $n_ф = f(\eta_ф)$, рис. 9 или по формуле (64); $\eta_ф$ — коэффициенг разнозернистости фильтровой подготовки принимается согласно табл. 2: $\eta_ф \leqslant 25$ — для щебеночных грунтов; $\eta_ф \leqslant 20$ — для песчано-гравелистых грунтов; B' — коэффициент, определяющий несуффозионность грунта фильтровой подготовки, принимается по графику $B' = f(\eta_ф)$, рис. 24; $d_{сг}$ — расчетный размер сводообразующих фракций защищаемого несуффозионного грунта определяется по графику рис. 7, в области кривых $B = 5 - 8$.

Для суффозионного состава грунта откоса $d_{сг}$ определяется как указано в 3.8.

3) Состав фильтровой подготовки не должен проникать в поры каменной наброски $D^{кп}_0$ или раскрывшуюся щель $b_{щ}$ железобетонного покрытия (рис. 23).

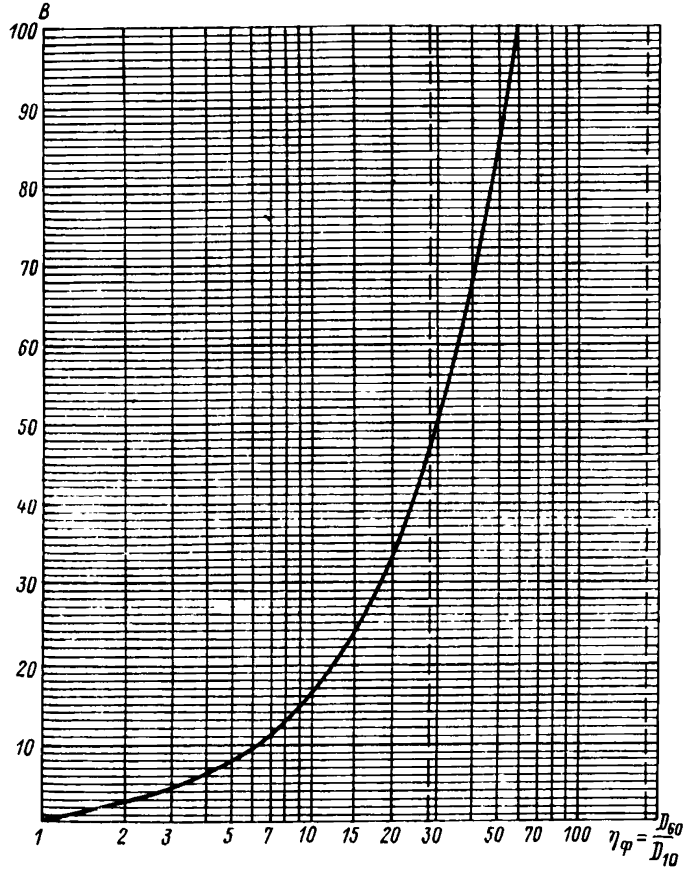

Рис. 24. График $B' = f(\eta)$.

Это условие может быть выражено следующими зависимостями:

а) Для каменного покрытия:

$$D^{расч}_{85} \geqslant 0{,}55 D^{кн}_0, \tag{68}$$

где $D^{расч}_{85}$ — размер расчетной фракции, полученный по зависимости (67); $D^{кн}_0$ — диаметр пор каменной наброски, определяемый по зависимости (9).

б) Для щели $b_{щ}$ железобетонного покрытия:

$$D_{85}^{расч} \geqslant 0{,}55b_{щ}. \qquad (69)$$

в) Если полученное значение расчетной фракции $D^{расч}_{85}$, определенное по зависимости (67), не удовлетворяет зависимость (68) или (69), то в таком случае следует изменить значение коэффициента разнозернистости $\eta_{ф}$ фильтровой подготовки в большую сторону (в пределах до $\eta_{ф} \leqslant 25$ для щебеночных грунтов и до $\eta_{ф} \leqslant 20$ для песчано-гравелистых грунтов), т. е. назначить более разнозернистый состав материала грунта фильтровой подготовки.

г) Если и в этом случае не будут удовлетворяться зависимости (68) или (69), это указывает на то, что между каменным покрытием и слоем фильтровой подготовки должен быть уложен промежуточный слой* из камня более мелкого состава. Причем гранулометрический состав промежуточного слоя должен быть таким, чтобы средний размер пор его $D^{кн}_{0}$, определенный по зависимости (9), удовлетворял условию (68) или (69).

При соблюдении указанных выше требований при проектировании состава фильтровой подготовки обеспечивается надежная защита откоса плотины и самой фильтровой подготовки от волновых воздействий на откос.

д) По полученному из зависимости (67) значению расчетного размера фракций $D^{расч}_{85}$, принятому значению $\eta_{ф}$ и найденному значению по формуле (2) степени x, по уравнению (1) строится кривая проектируемого несуффозионного гранулометрического состава грунта фильтровой подготовки, а также «Зона допустимого гранулометрического состава материала фильтровой подготовки» назначается, как указано в примере 1, 3.27, г.

4.2. При оценке (подборе) пригодности карьерных грунтов или продукции камнедробильных заводов для использования их в качестве фильтровой подготовки последние должны удовлетворять тем же условиям (1, 2 и 3), указанным в п. 4.1 настоящего раздела, но лишь с той разницей, что вместо расчетного размера фракций $D^{расч}_{85}$, определяемого в первом случае по формуле (67), в данном случае значение $D^{Ф}_{85}$ принимается по фактической кривой гранулометрического состава карьерного грунта.

Кроме того, гранулометрический состав исследуемого карьерного грунта и его физические характеристики должны удовлетворять условию (12), т. е.

$$d_{сг} = 0{,}55D^{Ф}_{0},$$

где $d_{сг}$ — расчетный размер фракций защищаемого грунта, определяемый по графику рис. 7, кривая $B = 5 - 8$ или по формуле (53); $D^{Ф}_{0}$ — определяется по формуле (9).

---

* В таких случаях решение вопроса о промежуточном слое из более мелкого камня или переходе на двухслойную фильтровую подготовку зависит от наличия местных материалов и технико-экономических сравнений вариантов.

Если указанные выше условия не удовлетворяются, то данный карьерный грунт не может быть использован в качестве фильтровой подготовки без дополнительных мероприятий: отсева мелких или крупных фракций или его обогащения (см. 6.15, п. е).

4.3. Запроектированный или подобранный состав фильтровой подготовки должен быть проверен на условие неразмываемости контактной зоны откоса плотины, на пульсирующую фильтрацию (от наката и отгона волны).

Фильтрационная прочность грунта откоса в зоне контакта с фильтровой подготовкой будет обеспечена, если удовлетворяется условие (70):

$$d_{c1} \leqslant 0{,}077 \cdot \left(\sqrt{1 + 17 \cdot \sqrt{\varphi_1 \cdot J_{\text{п}}^{\text{р}}}} - 1\right) D_0^{\Phi}, \qquad (70)$$

где $d_{c1} \leqslant d_{3-5\%}$ — фракции грунта откоса; φ_1 — коэффициент, учитывающий форму и шероховатость частиц грунта: $\varphi_1 = 1$ — для песчано-гравийно-галечниковых грунтов; $\varphi_1 = 0{,}36$ — для щебеночных грунтов; $J^{\text{р}}_{\text{п}}$ — расчетный градиент напора при пульсации воды в слое фильтровой подготовки (рис. 23):

$$J^{\text{р}}_{\text{п}} = 1{,}35 \cdot \sin \beta; \qquad (71)$$

D^{Φ}_0 — средний диаметр фильтрационных пор фильтровой подготовки, определяемый по формуле (9).

Примечание. Проверка на условие (70) выполняется в том случае, если отношение $d_{c1} : D^{\Phi}_0 < 0{,}7$ (рис. 4, *б*); при отношении $d_{c1} : D^{\Phi}_0 \geqslant 0{,}7$ размыва и выноса фракций мелкозернистого грунта d_{c1} быть не может.

Если условие (70) не удовлетворяется, то следует руководствоваться указаниями, приведенными на стр. 69, п. п. в, г.

4.4. Для подбора гранулометрического состава фильтровой подготовки из имеющихся карьерных грунтов необходимо иметь следующие исходные данные.

а) Гранулометрический состав (защищаемого) грунта тела земляной плотины и его коэффициент разнозернистости $\eta_{\text{г}}$.

б) Гранулометрический состав карьерных грунтов, предназначенных для фильтровой подготовки, а также их физические характеристики (коэффициент разнозернистости η_{Φ}, n_{Φ} и др.).

в) Гранулометрический состав каменного покрытия (наброски), размер пор которого определяется по зависимости (9) — $D^{\text{кн}}_0$, или заданный размер щели $b_{\text{щ}}$ — раскрытие шва (незамоноличенных плит) или возможная ширина щели вследствие деформаций монолитного покрытия.

Пояснение по порядку расчета целесообразно сделать на конкретном примере.

Порядок расчета

Исходные данные: гранулометрический состав грунта тела плотины и карьерных грунтов, предназначенных для фильтровой подготовки, и их основные характеристики представлены на рис. 25.

а) По заданному гранулометрическому составу несуффозионного защищаемого грунта тела плотины *Г* (рис. 25) выбираем по графику $P^{\text{расч}}_{\text{сг}} = f(\eta_{\text{г}})$ (рис. 7) расчетный диаметр сводообразующих частиц $d_{\text{сг}}$. При $\eta = 2{,}14$ по графику (при $B = 5$ для песчано-гравелистого материала) $P_{\text{сг}} = 60\%$, что соответствует $d_{\text{сг}} = d_{60} = 0{,}15$ мм.

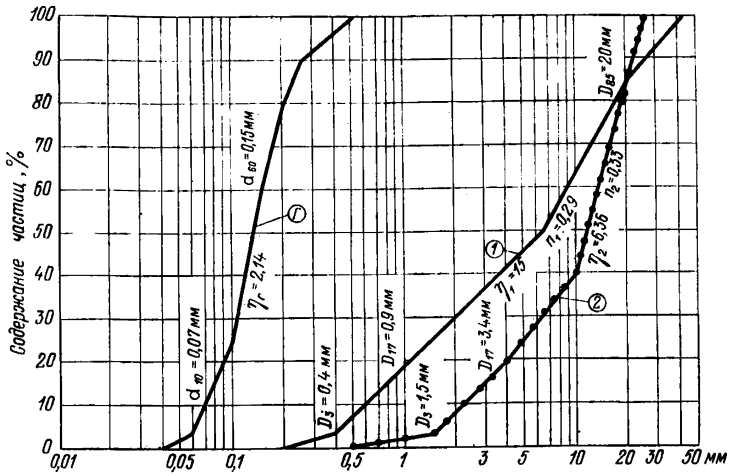

Рис. 25. Гранулометрический состав грунтов
Г — грунт тела плотины; *1*, *2* — карьерные грунты для фильтровой подготовки

б) Выясняем пригодность карьерных грунтов *1* и *2* (рис. 25) для использования их в качестве фильтровой подготовки под железобетонные крепления из плит, возможное раскрытие швов между которыми или образование щелей может достигать величины $b_{\text{щ}} = 3{,}5$ см (для каменного покрытия диаметр пор каменной наброски (рис. 23), определенный по зависимости (9), соответственно равен $D^{\text{кп}}_0 = 3{,}5$ см $= 35$ мм).

Карьерный грунт 1, рис. 25.

1) Определяем суффозионность карьерного грунта *1* по зависимости (50):

$$\frac{D_3}{D_{17}} = \frac{0{,}4}{0{,}9} = 0{,}445 \geqslant N, \quad N = 0{,}32\sqrt[6]{15}(1 + 0{,}05 \cdot 15)\cdot\frac{0{,}29}{1 - 0{,}29} = 0{,}36.$$

Следовательно, карьерный грунт *1* — практически несуффозионный.

2) Коэффициент разнозернистости грунта *1* меньше допустимого (табл. 2):

$$\eta_1 = 15 < 20.$$

3) Фактический расчетный размер фракций данного грунта *1* должен быть (68):

$$D_{85}^{\Phi} \geqslant 0{,}55 b_{ш} = 0{,}55 \cdot 35 = 19{,}3 \text{ мм}.$$

Так как $D^{\Phi}_{85} = 20$ мм $> 19{,}3$ мм, следовательно, условия (68) и (69) удовлетворяются.

4) Гранулометрический состав исследуемого карьерного грунта *1* должен удовлетворять условию (12), т. е.

$$d_{сг} \geqslant 0{,}55 D^{\Phi}_{0}.$$

Для защищаемого грунта принято (п. а стр. 71)

$$d_{сг} = d_{60} = 0{,}15 \text{ мм}.$$

Размер пор карьерного грунта *1* определяем по зависимости (9):

$$D_0^{\Phi} = 0{,}455 \cdot \sqrt[6]{15}\, \frac{0{,}29}{1 - 0{,}29}\, 0{,}9 = 0{,}26 \text{ мм}.$$

После подстановки значения $D^{\Phi}_{0} = 0{,}26$ мм в (12) получим:

$$d_{сг} = 0{,}55 \cdot 0{,}26 = 0{,}14 \text{ мм}.$$

Данное условие (12) также выполняется, так как

$$d_{сг} = d_{60} = 0{,}15 \text{ мм} > 0{,}14 \text{ мм}.$$

Следовательно, данный карьерный грунт *1* удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к составу фильтровой подготовки, и может быть использован в качестве однослойной фильтровой подготовки под железобетонное (каменное) покрытие и будет надежно защищать откосы от размыва при воздействии волн на откос.

Для установления зоны допустимых отклонений от этого расчетного состава карьерного грунта *1* следует поступать так, как указано в п. 3.31 (стр. 47).

5) Чтобы убедиться в правильности подобранного состава фильтровой подготовки, выполним проверку на неразмываемость зоны грунта откоса плотины по условию (70), если отношение $\frac{d_{ci}}{D^{\Phi}_{0}} \leqslant 0{,}7$.

В данном случае имеем (рис. 25) $d_{c1} = d_{3\%} = 0{,}06$ мм, отношение $\frac{d_{3\%}}{D_0^{\Phi}} = \frac{0{,}06}{0{,}26} = 0{,}22 < 0{,}7$.

Следовательно, выполняем проверку по условию (70):

$$d_{c1} \leqslant 0{,}077 \cdot \left(\sqrt{1 + 17 \cdot \sqrt{\varphi_1} J_{п}^{р}} - 1\right) D_0^{\Phi},$$

где $\varphi_1 = 1$ — для окатанных песчаных фракций грунта; $D^{\Phi}_{0} = 0{,}26$ мм.

Согласно уравнению (71), при $\beta_0 = 30°$ (рис. 23):

$$J^{р}_{п} = 1{,}35 \sin 30° = 0{,}675.$$

После подстановки значений в (70) получим:

$$d_{cl} = 0{,}077 \cdot (\sqrt{1 + 17 \cdot 1 \cdot 0{,}675} - 1) \cdot 0{,}26 = 0{,}05 \text{ мм},$$

$$d_{cl} = 0{,}05 \text{ мм} < d_{3\%} = 0{,}06 \text{ мм},$$

т. е. условие (70) удовлетворяется.

Следовательно, размыва контактной зоны грунта происходить не будет, что подтверждает надежность подобранной фильтровой подготовки.

6) *Карьерный грунт 2* (рис. 25) по своему составу хотя и имеет ряд характеристик, удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к составу фильтровой подготовки (является практически несуффозионным, коэффициент разнозернистости η_2 меньше допустимого $\eta^{доп}_{ф}$, фактический размер расчетных фракций $D^{Ф}_{85}$ удовлетворяет условиям (68) и (69), однако при этом важное условие (12) — сочетание защищаемого грунта тела плотины с грунтом фильтровой подготовки — не удовлетворяется, так как $d_{cr} < 0{,}55D^{Ф}_{0}$, что не обеспечивает защиту грунта тела плотины от проникновения его в слой фильтровой подготовки и от выноса его в раскрытые щели (или поры каменной наброски).

Следовательно, данный состав грунта *2* не может быть использован в качестве фильтровой подготовки без его обогащения.

5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБРАТНЫХ ФИЛЬТРОВ ИЗ ПОРИСТОГО БЕТОНА

Современные темпы гидротехнического строительства с большим объемом строительных работ выдвигают новые задачи к повышению производительности труда, сокращению сроков, снижению стоимости и повышению качества строительства. Важным мероприятием в снижении стоимости и сокращении сроков строительства является широкое использование в гидротехническом строительстве сборных дренажей с применением фильтров из пористого бетона. Производство их может быть налажено в условиях любого строительства, а материалом для фильтров могут служить щебеночные отходы камнедробильных заводов.

Фильтры из пористого бетона могут применяться не только для скважин, но и для дренажей плотин и других гидротехнических сооружений, где их применение оказывается экономически выгодным, например при отсутствии на месте карьерных грунтов, пригодных для устройства обратных фильтров из песчано-гравелистых или щебеночных материалов.

Общие указания

5.1. Обратные фильтры из пористого бетона выполняют двойную роль, например, в трубчатом дренаже:

1) как дренажная труба, отводящая профильтровавшуюся воду и

2) как первый слой фильтра, защищающий грунт основания.

В случаях необходимости наибольшего перехвата фильтрационного потока или защиты фильтром из пористого бетона мелкозернистых водонасыщенных грунтов, является целесообразным изготовлять фильтры из более крупного материала с последующей их обсыпкой в виде дренажной призмы (рис. 29, *а*, 30).

5.2. Обратные фильтры из пористого (беспесчаного) бетона для скважин и дренажей плотин устраиваются из крупнозернистого материала, состав которого должен быть подобран в зависимости от гранулометрического состава защищаемого им водонасыщенного грунта.

Для изготовления пористых фильтров необходимо применять такое количество склеивающего вещества (цемент, жидкое стекло, гипс и др.), которое только обволакивало бы частицы заполнителя, а поры между ними оставляло незаполненными. В настоящих Рекомендациях в качестве склеивающего материала предусматривается только цемент, придающий фильтрам долговременную прочность. В качестве заполнителя могут применяться щебеночные отходы камнедробильных заводов, щебень, гравий — однозернистые и разнозернистые материалы.

5.3. Дренажные устройства из пористого бетона не следует располагать в зоне промерзания, потому что вода в порах фильтра после замерзания может разрушить связь между частицами пористой массы, что приведет к потере механической прочности конструкции.

5.4. Фильтрационные расчеты при проектировании дренажных устройств из пористого бетона выполняются, как и при проектировании обычных дренажей, с учетом водопропускной способности пористого бетона (см. ниже «Методика подбора . . .», п. 5.6).

Требования к обратным фильтрам из пористого бетона

5.5. Обратные фильтры успешно выполняют свою роль лишь в том случае, если гранулометрический состав их запроектирован и подобран надлежащим образом.

Обратные фильты из пористого бетона должны быть запроектированы так, чтобы удовлетворять следующим основным требованиям:

1) частицы скелета защищаемого грунта не должны просыпаться в поры фильтра из пористого бетона;

2) в защищаемом грунте, в контактной области, не должно происходить опасной механической суффозии, влияющей на прочность и устойчивость грунта;

3) мелкие частицы, вынос которых фильтрационным потоком из защищаемого грунта не вызывает существенных деформаций и является допустимым, не должны кольматировать фальтр;

4) водопроницаемость обратного фильтра из пористого бетона должна быть больше водопроницаемости защищаемого им грунта.

Выполнение вышеперечисленных требований при проектировании и устройстве обратных фильтров из пористого бетона обеспечит устойчивое и прочное сопряжение защищаемого грунта и надежность в работе сооружения в период его эксплуатации.

Выполнение перечисленных выше требований относится к грунтам, которые по своему гранулометрическому составу являются суффозионными.

Если защищаемый фильтром грунт является практически несуффозионным, то при проектировании и устройстве обратных фильтров из пористого бетона достаточным является выполнение двух основных условий:

1) частицы скелета защищаемого грунта не должны просыпаться в фильтр из пористого бетона;

2) коэффициент фильтрации фильтра из пористого бетона должен быть больше коэффициента фильтрации защищаемого им грунта.

Методика подбора гранулометрического состава щебеночного (гравийного) материала для устройства обратных фильтров из пористого бетона (рис. 27 — 31)

5.6. Для определения расчетных размеров фракций щебеночных и гравийных грунтов, входящих в состав обратного фильтра из пористого бетона, необходимо иметь данные о гранулометрическом составе защищаемого грунта, представленные в виде графика, а также данные об объемной массе скелета грунта $\gamma_г$, пористости $n_г$, коэффициенте разнозернистости $\eta_г$ и коэффициенте фильтрации $k_г$.

По параметрам защищаемого грунта необходимо определить, является ли защищаемый фильтром грунт несуффозионным или суффозионным.

Если грунт практически несуффозионный, то он должен удовлетворять зависимости (50):

$$\frac{d_3}{d_{17}} = 0{,}32\sqrt[6]{\eta_г}(1 + 0{,}05\eta_г)\frac{n_г}{1 - n_г},$$

где d_3 и d_{17} — диаметры фракций грунта, меньше которых содержится в последнем до 3% и 17% по массе.

Если зависимость (50) не удовлетворяется, данный грунт следует считать суффозионным.

В зависимости от категории защищаемого грунта (суффозионного или несуффозионного) и его коэффициента разнозернистости выбирается расчетный размер сводообразующих частиц $d_{сг}$.

Для несуффозионного состава грунта расчетный размер сводообразующих частиц $d_{сг}$ определяется по графику $P^{расч}_{сг} = f(\eta_г)$ (рис. 7, кривая $B=3$).

Для суффозионного состава грунта расчетный размер сводообразующих частиц $d_{сг}$ определяется в зависимости от гидродинамических условий работы фильтра следующим образом:

а) По формуле (52) определяем размер частиц, которые могут выноситься из зоны контакта при заданном максимальном градиенте напора $J^{макс}_{р}$, т. е.

$$d_{ci} = \frac{k_н J_р^{макс}}{\varphi_0 \sqrt{\frac{n_г g}{\nu k_г}}}.$$

Если полученное значение $d_{ci} \leqslant d_{3\%}$ (из кривой гранулометрического состава), то $d_{сг}$ принимается по графику $P^{расч}_{сг} = f(\eta_г)$ рис. 7, кривая $B=3$.

Если же $d_{ci} > d_{3\%}$, то $d_{сг}$ определяется по формуле (53)

$$d_{сг}^{расч} = B \cdot d_{3\%},$$

где B рекомендуется принимать:

1) для фильтров скважин (водопонижение, переменный режим) $B = 3$;

2) для фильтров дренажей плотин $B = 5 — 8$.

б) По выбранному размеру диаметра $d_{сг}$ находим средний диаметр пор фильтра по зависимости (11):

$$D_0 < 1{,}8 d_{сг}.$$

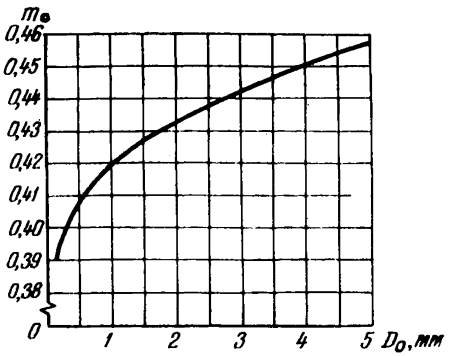

Рис. 26. График $m_0 = f(D_0)$.

Зная D_0, определяем расчетный коэффициент фильтрации фильтра из пористого бетона по экспериментальной зависимости *:

$$k_ф = A m_0 D^2_0, \text{ см/с}, \qquad (72)$$

где $A = 615$ — для пористого бетона из щебеночного грунта; $A = 965$ — для пористого бетона из гравийного грунта; m_0 — при-

* Зависимость (72) пригодна для определения $k_ф$ пористого бетона, изготовленного при оптимальном В/Ц.

веденная пористость в долях единицы, принимаемая по графику $m_0 = f(D_0)$, рис. 26 или по эмпирической формуле:

$$m_0 = \frac{9{,}5 + \sqrt[3]{D_0}}{25}, \qquad (73)$$

где D_0 — в мм.

в) По табл. 3 для полученного значения $k_ф$ выбираем гранулометрический состав щебеночного или гравийного грунта, который должен входить в состав фильтра из пористого бетона в качестве заполнителя, коэффициент разнозернистости которого не должен превышать значения

$$\eta_ф^{доп} \leqslant 12. \qquad (74)$$

Таблица 3

Значения коэффициента фильтрации пористого бетона состава 1 : 6 при оптимальном В/Ц в зависимости от гранулометрического состава заполнителя

Условный размер фракций, мм	D_{10}	D_{17}	D_{50}	D_{60}	$\eta = \frac{D_{60}}{D_{10}}$	Коэффициент фильтрации пористого бетона, $k_ф$, см/с
0,25—3,0	0,50	0,60	1,8	2,4	4,8	0,05—0,10
0,25—30,0	0,48	0,95	4,1	5,5	11,45	0,012—0,023
0,25—10,0	0,58	0,77	2,0	2,55	4,4	0,017—0,022
0,25—20,0	0,62	1,15	5,1	6,8	11,1	0,019—0,058
0,25—20,0	1,00	2,05	3,9	4,4	4,4	0,045—0,077
0,25—5,0	1,10	1,35	3,0	3,4	3,09	0,100—0,180
1,00—30,0	1,90	2,20	5,4	6,7	3,52	0,167—0,46
0,00—30,0	1,24	1,95	5,3	6,2	5,0	0,250—0,62
0,25—10,0	0,35	3,60	1,6	2,4	6,8	0,28—0,80
1,00—20,0	1,34	1,67	4,4	5,9	4,4	0,35—0,56
1,00—20,0	1,75	2,25	6,2	7,75	4,45	0,53—0,78
1,00—20,0	2,40	3,40	7,3	8,5	3,54	1,05—1,96
1,00—10,0	1,40	1,80	3,40	4,0	2,85	1,40—1,80
1,00—20,0	2,24	2,80	4,3	4,8	2,14	1,65—2,05
0,00—20,0	3,10	4,00	6,2	6,7	2,16	1,88—2,60
3,00—7,0	2,10	3,20	4,7	5,4	2,55	2,10—3,20
7,00—20,0	7,7	8,6	12,5	14,0	1,82	3,06—5,68
3,00—20,0	5,1	5,1	8,90	8,8	1,72	4,97—6,22
2,00—20,0	4,6	6,0	9,5	11,0	2,4	5,06—6,25
5,00—25,0	5,2	7,2	11,5	13,0	2,5	12,10—15,30
7,00—25,0	7,5	8,6	14,0	16,0	2,1	15,30—20,10
5,00—40,0	9,0	13,0	25,0	31,0	3,45	28,00—31,00
20,00—40,0	—	—	—	—	—	32,00—40,00

Примечание. Приведенные в табл. 3 значения $k_ф$ получены на основании опытов, проведенных при ламинарном режиме фильтрации.

Такой состав фильтра из пористого бетона будет удовлетворять двум основным требованиям для несуффозионного защищаемого им грунта:

1) скелет грунта не просыпается в слой фильтра;

2) коэффициент фильтрации материала фильтра больше коэффициента фильтрации защищаемого им грунта.

г) Если подобранный по табл. 3 состав щебня не соответствует имеющимся на площадке строительства щебеночным или гравелистым грунтам, то, не производя рассева (обогащения), следует проверить их пригодность по зависимости (75), которая дает возможность по параметрам щебня или гравия, из которого приготовляется пористый бетон при оптимальном В/Ц, определить коэффициент фильтрации пористого бетона:

$$k_{\text{пб}} = A' \cdot \frac{n^3_{\text{ф}}}{(1-n_{\text{ф}})^2} \cdot D^2_{17}, \text{ см/с}, \qquad (75)^*$$

где для щебня $A' = 50\sqrt[3]{\eta_{\text{щ}}}$; для гравия $A' = 120\sqrt[3]{\eta_{\text{гр}}}$; $\eta_{\text{щ}}$ и $\eta_{\text{гр}}$ — коэффициенты разнозернистости соответственно щебня и гравия; $n_{\text{ф}}$ — пористость.

Если $k_{\text{пб}}$ по своей величине мало отличается (не более чем в два раза) от расчетного $k_{\text{ф}}$, то данный щебеночный (гравелистый) грунт может быть использован без рассева в качестве заполнителя для фильтра из пористого бетона.

Коэффициент разнозернистости материала для фильтра из пористого бетона не должен превышать значения $\eta^{\text{доп}}_{\text{ф}} = 12$.

Материал, коэффициент разнозернистости которого превышает $\eta^{\text{доп}}_{\text{ф}}$, может быть рекомендован только после его лабораторных исследований.

д) Если защищаемый фильтром грунт суффозионный, то следует проверить некольматируемость фильтра выносимыми мелкими частицами грунта.

Чтобы выносимые из контактной области фильтрационным потоком мелкие частицы грунта $d_{\text{cl}} < d_3$ не кольматировали фильтр, должно быть выполнено следующее условие (45):

$$D^{\Phi}_0 \geqslant 1{,}1 d_{\text{cl}} a_*,$$

где a_* — принимается из табл. 1.

Если не удовлетворяются условия (45) и (53), следует изменить принятый гранулометрический состав фильтра, что повлечет изменение диаметра сводообразующих частиц $d_{\text{сг}}$ и размер допустимых к выносу из грунта частиц d_{cl}.

По полученному новому значению $d_{\text{сг}}$ определяем по зависимости (9) новое значение D^{Φ}_0; далее порядок подбора гранулометрического состав щебня (гравия), входящего в состав фильтра из пористого бетона, остается таким же, как указано выше.

Технология изготовления фильтров из пористого бетона

Обратные фильтры из пористого бетона в настоящее время находят широкое применение не только для оборудования труб-

---

* Формула (75) справедлива при $\text{Re}_0 = \left(\frac{k_{\text{пб}} J D_{\text{э}}}{\nu}\right) \leqslant 60$; при $\text{Re}_0 > 60$ формула (75) может служить для ориентировочных расчетов.

чатых колодцев водоснабжения и водопонизительных скважин (инженерная защита г. Казани), но и для дренажных устройств гидротехнических сооружений (земляные намывные плотины Киевской, Каневской ГЭС и др.).

5.7. Фильтр из пористого бетона для оборудования трубчатых колодцев представляет собой пустотелый цилиндр, сформованный из сцементированного разнозернистого щебня (гравия), обеспечивающий определенную прочность и водопроницаемость (рис. 27, 28). Такие фильтры изготовляются и для дренажей плотин с обсыпкой трубы (дренажная призма) фильтрующим материалом (рис. 29, 30).

Фильтры из пористого бетона для трубчатых колодцев и дренажей плотин могут изготовляться различных диаметров: от 10 до 100 см и более в зависимости от их назначения (рис. 27). Высота одного звена назначается (в зависимости от условий работы, массы звена, транспортировки) до 1 м и более.

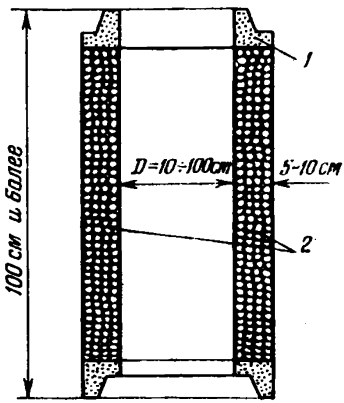

Рис. 27. Дренажная труба—фильтр из пористого бетона

1 — плотный бетон 1:3 или 1:4 (крупнозернистый песок или щебень 2—3 мм); *2* — пористый бетон

5.8. Толщину стенок фильтра по фильтрационным условиям следует принимать не менее

$$T_{\text{мин}} \geqslant (5-7)\dot{D}_{85}+2 \text{ см}, \qquad (76)$$

где D_{85} — расчетный размер частиц щебня, входящего в состав фильтра из пористого бетона.

По конструктивным соображениям и условиям производства работ толщину стенок фильтров для скважин следует принимать $T^{*}_{\text{мин}} = 5-6$ см, и фильтров для дренажей плотины $T_{\text{мин}} = 10$ см.

5.9. Соединение отдельных звеньев труб между собой должно осуществляться при помощи стыков и очень тщательно (без перекосов и зазоров). Для придания прочности стыковым соединениям последние должны устраиваться из более плотного бетона, как показано на рис. 27, 28.

Для прочности фильтров из пористого бетона и для уменьшения расхода цемента следует применять цемент высоких марок: «400» и «500».

---

* При больших заглублениях толщина стенок труб из пористого бетона должна быть проверена на условие статической прочности.

5.10. Чтобы фильтры из пористого бетона обладали хорошей пористостью и прочностью, состав пористого бетона следует принимать: для щебеночных грунтов 1 : 6; для гравелистых (окатанных) грунтов 1 : 7 (по массе).



Рис. 28. Фото изготовленных дренажных труб — фильтров из пористого бетона по рис. 27

От водоцементного отношения В/Ц зависит прочность пористого бетона, степень равномерности укладки зерен заполнителей, его пористость и водопроницаемость.

Наиболее прочный бетон с равномерной пористостью и водопроницаемостью получается при оптимальном водоцементном отношении.

Оптимальное водоцементное отношение характеризуется тем, что при укладке бетонной смеси цементное тесто не стекает с зе-

рен заполнителей, а при перемешивании смеси достигается равномерное обволакивание зерен с характерным блеском на поверхности, при этом обеспечивается хорошая укладка пористого бетона.

При большом водоцементном отношении цементное тесто стекает в нижнюю часть фильтра, заполняет поры бетона и делает его маловодопроницаемым.

Оптимальное водоцементное отношение для фильтров из пористого бетона следует принимать в пределах В/Ц = 0,32 — 0,42.

Для определения оптимального В/Ц следует приготовлять опытный замес объемом 5 л с начальным количеством воды, составляющим 3/4 предполагаемого оптимального, потом постепенно добавлять воду порциями 5% от объема цемента. После каждой добавки бетонную смесь тщательно перемешивают и делают качественную оценку.

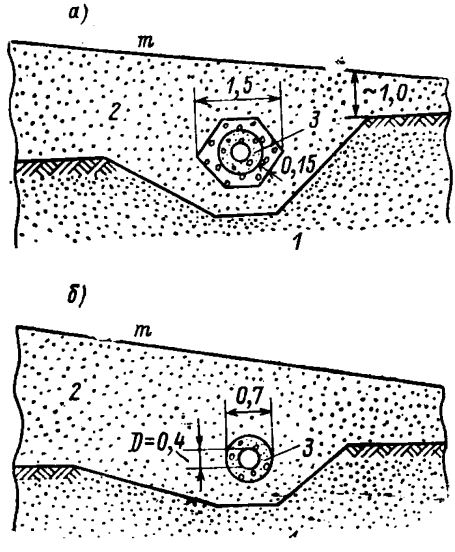

Рис. 29. Дренажи облегченного типа из пористого бетона Каневской и Киевской ГЭС

а — из пористобетонных труб с однослойной обсыпкой щебнем 0,15—10 мм; *б* — то же без обсыпки; *1* — пылеватые грунты основания; *2* — намывной песок тела плотины; *3* — трубы из пористого бетона — фильтры

При изготовлении блоков из пористого бетона следует учитывать влажность заполнителя и вносить поправки в дозировку при изменении влажности более чем на 0,5%.

5.11. При работе фильтров из пористого бетона в условиях неагрессивных вод рекомендуется применять портландцемент, а в агрессивных водах добавлять пуццолановые добавки в соответствии с нормами ГОСТов.

5.12. При изготовлении дренажных труб из пористого бетона следует учитывать рекомендации, изложенные в ведомственных строительных нормах: «Трубы дренажные из крупнопористого фильтрационного бетона на плотных заполнителях», ВСН-13-77.

Пример расчета

5.13. Подобрать гранулометрический состав щебеночного грунта, входящего в состав фильтра из пористого бетона, защищающего грунт основания.

Исходные данные

Гранулометрический состав грунта (мм) основания представлен на рис. 31, из которого находим: $d_{мин} = 0{,}01$; $d_{10} = 0{,}25$;

$d_{17} = 0{,}35$; $d_{60} = 2{,}0$; $d_{макс} = 7{,}0$; коэффициент разнозернистости $\eta_г = 8$; коэффициент фильтрации $k_г = 0{,}09$ см/с; объемная масса скелета грунта $\gamma_г = 1{,}75$ г/см^3; пористость $n_г = 0{,}34$; градиент на-

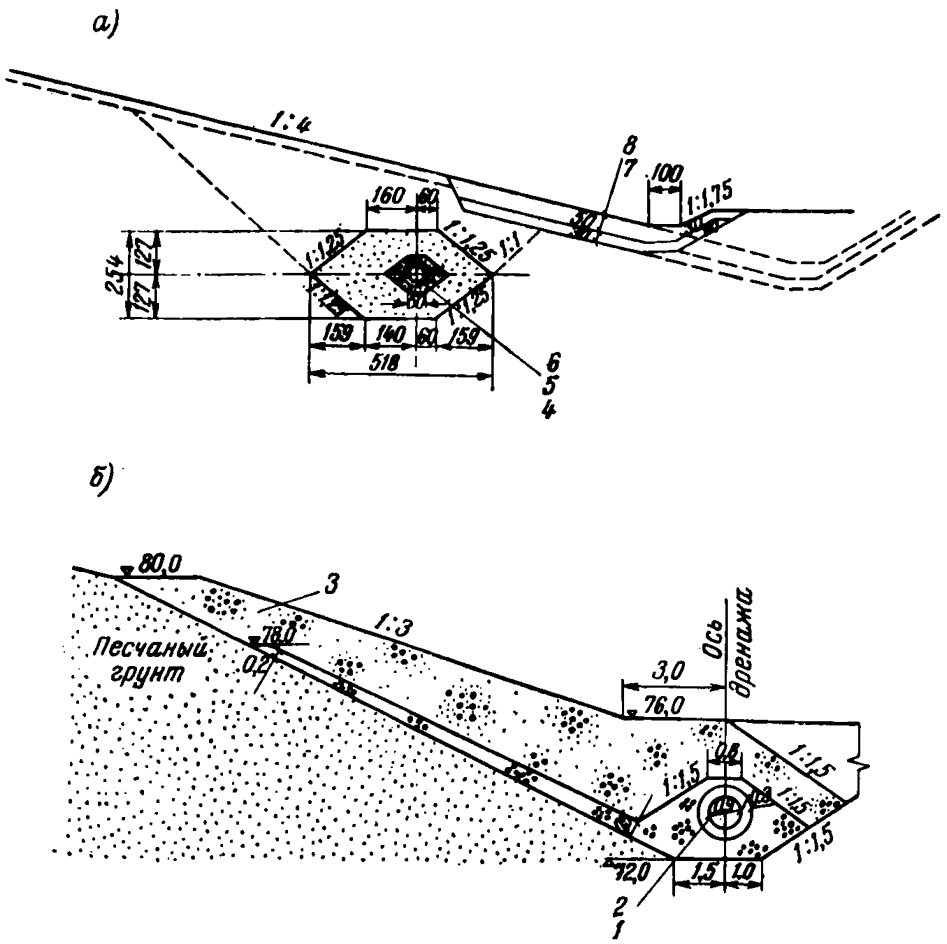

Рис. 30. Конструкция дренажа из пористого бетона (*а*) и та же конструкция при наслонном дренаже (*б*)

1, 2 — дренажная труба из пористого бетона, обсыпка щебнем $D = 0{,}25$—10 мм; *3* — естественный песчано-гравелистый грунт; *4, 5, 6* — дренажная труба из пористого бетона, щебеночная обсыпка, крупнозернистый песок (дренажная призма); *7, 8* щебень 0—10 мм, наброска из камня 10—200 мм

пора (по фильтрационным расчетам) в контактной области грунта с фильтром $J^{макс}_{р} = 0{,}4$.

Порядок расчета

а) Определяем суффозионность грунта основания по зависимости (50):

$$\frac{d_3}{d_{17}} = \frac{0{,}05}{0{,}35} = 0{,}143 \geqslant N,$$

$$N = 0{,}32\sqrt[6]{\eta_г}(1 + 0{,}05\eta_г)\cdot\frac{n_г}{1-n_г} = 0{,}32\sqrt[6]{8}\,(1+0{,}05\cdot 8)\cdot\frac{0{,}34}{1-0{,}34} = 0{,}33.$$

Зависимость (50) не удовлетворяется, следовательно, грунт основания несуффозионный.

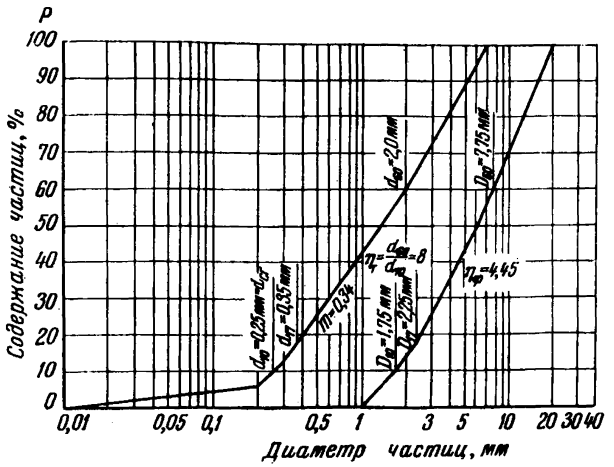

Рис. 31. Гранулометрический состав грунта основания и щебеночного грунта, предназначенного для фильтра из пористого бетона.

б) Размер d_{cr} определяется как для суффозионного грунта согласно п. 5.7.

1) Определяем размер выносимых частиц грунта d_{cl} из контактной зоны при заданном $J^{макс}_р = 0{,}4$.

По зависимости (27) находим φ_0, предварительно определив $f_* = 0{,}223$ из графика рис. 5, для грунта с $\eta = 8$:

$$\varphi_0 = 0{,}60\cdot\left(\frac{\gamma_г}{\gamma_в} - 1\right) f_* \sin\left(30° - \frac{\theta}{8}\right) = 0{,}60\left(\frac{1{,}75}{1} - 1\right) 0{,}223\cdot 0{,}66 = 0{,}066.$$

Подставляя значения в (52), получим

$$d_{cl} = \frac{1{,}25\cdot 0{,}4}{0{,}066\cdot\sqrt{\frac{0{,}34\cdot 981}{0{,}01\cdot 0{,}09}}} = 0{,}015 \text{ см} = 0{,}13 \text{ мм}.$$

Таких частиц в грунте 6%, т. е. $d_{cl} > d_{3\%\,(5\%)}$

2) При условии $d_{cl} > 5\%$, d_{cr} определяется по формуле (53):

$$d_{cr} = Bd_{3\%},$$

где $B = 8$; $d_{3\%} = 0{,}03$ мм.

Подставляя значения в (53), получим

$$d_{\text{сг}} = 8 \cdot 0{,}03 = 0{,}24 \text{ мм} \approx 0{,}25 \text{ мм}.$$

в) По полученному значению $d_{\text{сг}}$ определяем средний диаметр пор фильтра: согласно формуле (11):

$$D_0 \leqslant 1{,}8 \cdot d_{\text{сг}} = 1{,}8 \cdot 0{,}25 = 0{,}45 \text{ мм}.$$

г) По зависимости (72) определяем коэффициент фильтрации фильтра

$$k_{\text{ф}} = 615 \cdot m_0 \cdot D^2_0,$$

где $m_0 = 0{,}408$ по графику $m_0 = f(D_0)$ рис. 26:

$$k_{\text{ф}} = 615 \cdot 0{,}408 \cdot 0{,}045^2 = 0{,}51 \text{ см/с}.$$

д) По данному значению $k_{\text{ф}}$ из табл. 3 выбираем гранулометрический состав грунта для фильтра из пористого бетона: щебень (мм): $D = 1 - 20$; $D_{\text{мин}} = 1{,}0$; $D_{10} = 1{,}75$; $D_{17} = 2{,}25$; $D_{50} = 2{,}6$; $D_{60} = 7{,}75$; $D_{100} = 20{,}0$.

По значениям $D_{\text{мин}}$, D_{10}, $D_{17}, \ldots,$ D_{100} строим кривую гранулометрического состава грунта, пригодного в данном случае для фильтра из пористого бетона (рис. 29, 30).

е) Проверяем водопроницаемость фильтра:

$$\frac{k_{\text{ф}}}{k_{\text{г}}} = \frac{0{,}51}{0{,}09} = 5{,}7; \quad 2 + \sqrt[6]{\eta_{\text{щ}}} = 2 + \sqrt[6]{4{,}43} = 3{,}28 < 5{,}7.$$

ж) Проверяем фильтр на некольматируемость. При размерах сводообразующих частиц $d_{\text{сг}}$, подобранных по зависимости (53), предотвращается развитие опасной механической суффозии в защищаемом грунте.

Выносимые фильтрационным потоком частицы не должны кольматировать фильтр, т. е. должно быть выполнено условие некольматируемости (45):

$$D\Phi_0 \geqslant 1{,}1 d_{\text{сl}} a_*.$$

В данном случае имеем: $D\Phi_0 = 0{,}45$; $d_{\text{сг}} = 0{,}25$ мм; $d_{\text{сl}} \approx 0{,}03$ мм, коэффициент $a_* = 4$ (из табл. 1);

$$1{,}1 d_{\text{сl}} a_* = 1{,}1 \cdot 0{,}03 \cdot 4 = 0{,}132 \text{ мм}, \quad D\Phi_0 = 0{,}45 \text{ мм} > 0{,}132 \text{ мм}.$$

Условие некольматируемости выполняется.

Из изложенного выше следует, что для данного защищаемого грунта подобранный гранулометрический состав материала для устройства фильтров из пористого бетона удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к такому типу фильтров и может быть рекомендован для устройства дренажа из пористого бетона.

6. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБРАТНЫХ ФИЛЬТРОВ, ЗАЩИЩАЮЩИХ СВЯЗНЫЕ ГРУНТЫ

Общие указания

6.1. Приведенные ниже рекомендации по проектированию и подбору гранулометрического состава первого слоя фильтра рас-

пространяются на обратные фильтры дренажей плотин, защищающие связные (глинистые) дренируемые грунты.

Связные грунты (супеси, суглинки и глины) можно характеризовать содержанием в их составе глинистых частиц размером 0,005 мм:

Супеси	3÷10%
Суглинки	10÷30%
Глины	более 30%

и числом пластичности $W_п$:

Супеси	$1 \leqslant W_п \leqslant 7$
Суглинки	$7 \leqslant W_п \leqslant 17$
Глины	$W_п > 17$

6.2. В данном разделе Рекомендаций проектирование (подбор) гранулометрического состава первого слоя фильтра приводится для связных грунтов (нарушенной структуры) с числом пластичности $W_п \geqslant 7$ и $W_п \geqslant 5$ (при содержании пылеватых частиц $d \leqslant \leqslant 0{,}05$ мм более 20% и обладающих молекулярным сцеплением), при колебании влажности W в интервале пластичности, т. е. $W_т \geqslant W \geqslant W_р$, где $W_т$ — граница текучести, а $W_р$ — граница раскатывания связного грунта. При этом глинистый грунт должен иметь молекулярное сцепление, которое может быть выражено через величину объемной массы скелета связного грунта.

Связный грунт будет обладать молекулярным сцеплением в том случае, если объемная масса скелета дренируемого связного грунта $\gamma_{ск}$ будет удовлетворять приведенному ниже условию, т. е.

$$\gamma_{ск} \geqslant \gamma'_{ск} = \frac{\Delta}{1 + \varepsilon_т}, \tag{77}$$

где Δ — плотность частиц грунта в г/см³; $\varepsilon_т$ — коэффициент пористости при $W_т$:

$$\varepsilon_т = \frac{\Delta \cdot W_т}{100 \cdot \gamma_в}, \tag{78}$$

где $\gamma_в \approx 1$ г/см³ — плотность воды.

Если приведенное выше условие (77) не удовлетворяется, то исследуемый грунт следует считать несвязным грунтом.

6.3. Приведенные ниже рекомендации по методике подбора гранулометрического состава грунтов первого слоя фильтра, защищающего глинистые грунты, предусматривают для сооружений I класса *условие недопущения отрыва или отслаивания агрегатов глинистых частиц грунта.*

6.4. В сооружениях II — IV классов возможно допускать небольшое отслаивание глинистых грунтов по контакту с обратными фильтрами на величину $\Delta S = D_0/2$; при этом максимальный размер пор грунта первого слоя фильтра должен быть $D^{макс}_0 \leqslant \leqslant 15$ мм при $J = 0$ и при условии, что глинистый грунт имеет число пластичности $W_п \geqslant 5$ ($W_п \geqslant 3$ — для временных сооружений).

6.5. Проектирование обратных фильтров (и переходных зон) к грунтам с числом пластичности $W_п < 5$ (3) для сооружений I класса, а также для II — IV классов производится так же, как и для несвязных грунтов (согласно Рекомендациям разделов 1 — 5), или окончательное решение принимается после проведения специальных опытных исследований в соответствии с конкретными условиями и широко поставленными исследованиями дренируемых грунтов (с определением их минералогического состава, связности, молекулярного сцепления и пр.).

Примечание. Исследования, выполненные за последние 10 лет ВНИИГом, ВНИИ ВОДГЕО, САНИИРИ и др. организациями, показали, что в настоящее время проектирование обратных фильтров и переходных зон обоснованно можно распространить на связные (супесчано-глинистые) грунты, имеющие число пластичности $W_п \geqslant 5 \div 3$, которые обладают теми же свойствами, что и глинистые грунты с $W_п \geqslant 7$.

Методика подбора гранулометрического состава грунта первого слоя обратного фильтра к связному водонасыщенному грунту

6.6. Для подбора гранулометрического состава первого слоя фильтра, защищающего связный (глинистый) грунт, необходимо знать расчетное значение градиента фильтрационного потока $J_р$ в связном (глинистом) грунте (на выходе в первый слой фильтра). Расчетное значение градиента напора фильтрационного потока $J_р$ для дренажей плотин, а также для экранов, ядра, понура и пр. определяется фильтрационными расчетами или методом ЭГДА. Причем за расчетный градиент напора следует принимать:

$$J_р = k_н J_{вых}, \tag{79}$$

где $k_н = 1{,}25$ — коэффициент надежности, принимаемый по условию (35): $J_{вых}$ — действительный градиент напора фильтрационного потока, выходящего из грунта в первый слой фильтра.

По заданному расчетному значению градиента напора определяется расчетный диаметр пор $D^{расч}_0$ грунта первого слоя фильтра, защищающего связный грунт.

6.7. Для условий недопущения отрыва или отслаивания агрегатов частиц связного (глинистого) грунта на контакте с грунтом первого слоя фильтра (для сооружений I класса) расчетный размер диаметра его пор $D^{расч}_0$ должен определяться по следующей формуле:

$$D_0^{расч} = \sqrt{\frac{0{,}34}{\varphi J_р + \cos\theta}}, \text{ см}, \tag{80}$$

причем $D^{расч}_0 \leqslant 0{,}583$ см (по условию недопущения отслаивания); $\varphi = 0{,}5 \div 1{,}0$ — при расчете дренажей плотин и фильтровой подготовки под крепления откосов; $J_р$ — расчетный градиент напора определяется по зависимости (79); θ — угол между направлениями силы тяжести и скорости фильтрации; причем $\cos\theta$ — яв-

ляется положительной величиной, если сила собственного веса агрегата частиц связного грунта (в поре фильтра) направлена внутрь крупнозернистого материала — обратного фильтра.

6.8. В случаях, когда известен карьерный или искусственно получаемый крупнозернистый материал, который предполагается использовать для первого слоя фильтра, следует определить по зависимости (18) максимальный размер диаметра его пор $D^{\text{макс}}_0$, по размеру которых устанавливается действительный градиент напора $J_д$, при котором не будет происходить отрыва или отслаивания агрегатов частиц связного грунта и, если будет удовлетворяться условие

$$J_д \geqslant J_р, \tag{81}$$

тогда анализируемый грунт с $D^{\text{макс}}_0$ может быть использован в качестве первого слоя фильтра.

В этом случае $J_д$ определяется из зависимости (80):

$$J_д = \frac{1}{\varphi}\left[\frac{0{,}34}{\left(D_0^{\text{макс}}\right)^2} - \cos\theta\right], \tag{82}$$

где буквенные обозначения те же, что и в формуле (80).

Если условие (81) не выполняется, тогда требуется изменить гранулометрический состав фильтра в сторону уменьшения крупности его зернового состава, т. е. уменьшить $D^{\text{макс}}_0$ (при $J_д \leqslant J_р$).

6.9. Для условий возможного допущения некоторого отслаивания (в порах фильтра) агрегатов частиц связного грунта, не влияющего на его прочность (для сооружений II — IV классов и временных сооружений), расчетный размер диаметра пор грунта первого слоя фильтра $D^{\text{расч}}_0$ должен определяться по следующей формуле:

$$D_0^{\text{расч}} = \sqrt{\frac{2{,}25}{\varphi J_р + \cos\theta}}, \text{ см}, \tag{83}$$

где буквенные обозначения те же, что и в формуле (80).

6.10. Для дренажей внешних, доступных к ремонту в период эксплуатации, массивных сооружений из связных грунтов и временных устройств с действующим градиентом напора $J_д < 3$, за расчетный размер диаметра пор грунта первого слоя фильтра — $D^{\text{расч}}_0$ можно принимать (при условии допущения отслаивания связного грунта (в поре фильтра) на глубину $D_0/2$):

$$D_0^{\text{расч}} \leqslant 10 - 12 \text{ мм}. \tag{84}$$

Дальнейшие расчеты приводятся ниже.

6.11. Коэффициент разнозернистости первого слоя грунтов обратных фильтров дренажей плотин, защищающих связные (глинистые) грунты принимается согласно указаниям главы СНиП II-53-73, п. 27-в

$$\eta_ф^{\text{доп}} = \frac{D_{60}}{D_{10}} \leqslant 50. \tag{85}$$

Примечание. При назначении $\eta_ф$ по (85) следует, однако, учитывать способ производства работ по укладке материала фильтра: насухо, под воду, механизацией, вручную, с учетом табл. 2.

6.12. Для того, чтобы отслаивание связного (глинистого) грунта в зоне контакта с крупнозернистым материалом — фильтром не происходило (а также опасных деформаций, при допущении некоторого отслаивания), материал фильтра должен быть подобран такого гранулометрического состава, чтобы удовлетворять основное условие:

$$D_0^{макс} \leqslant D_0^{расч}, \tag{86}$$

где $D^{макс}{}_0$ — максимальный размер фильтрационных пор крупнозернистого материала — первого слоя фильтра, определяется по зависимости (18).

6.13. В зависимости от класса сооружения, исходя из вышеуказанных требований к фильтрам, по заданному расчетному значению градиента напора $J_р$ и по одной из приведенных зависимостей (80), (83) и (84) определяем $D^{расч}{}_0$, по значению которого проектируется (подбирается) соответствующий состав первого слоя фильтра, по приведенной ниже методике.

а) По принятому значению коэффициента разнозернистости грунта фильтра $\eta_ф$ определяем пористость фильтра $n_ф$ по графику $n_ф = f(\eta_ф)$, рис. 9, или по формуле (64). Далее, зная расчетное значение $D^{расч}{}_д$, $n_ф$, $\eta_ф$, определяем размер фракций D_{17} первого слоя фильтра:

$$D_{17} \leqslant \frac{D_0^{расч}}{\varkappa \cdot C} \cdot \frac{1-n_ф}{n_ф}, \tag{87}$$

где C и $\varkappa$ соответственно определяются по формулам (10) и (19) или (20).

б) Действующий диаметр фракций первого слоя фильтра D_{10} определяется из соотношения

$$D_{10} = iD_{17}, \tag{88}$$

причем коэффициент i находим из графика $\eta_ф = f\left(\frac{D_{10}}{D_{17}}\right)$, рис. 32.

в) Контролирующий диаметр фракции первого слоя фильтра D_{60} определяется из условия

$$D_{60} = \eta_ф D_{10}. \tag{89}$$

г) Максимальный размер фракции первого слоя фильтра $D^{макс}{}_0 = D_{100}$ следует принимать по зависимости:

$$D_{100} \leqslant D_{10} + 10^x \cdot D_{60} \cdot \frac{\eta_ф - 1}{5\eta^2_ф}, \tag{90}$$

где D_{10} и D_{60} — размеры фракций, полученные по зависимости (88) и (89); значение x по зависимости (2): $x = 1 + 1{,}28 \lg \eta_ф$.

д) По полученным значениям размера фракций D_{10}, D_{17}, D_{60}, D_{100} строится расчетная кривая гранулометрического состава

грунта первого слоя фильтра $Ф$, рис. 33. Состав данного грунта будет удовлетворять основному условию (86), т. е. $D^{макс}{}_0 \leqslant \leqslant D^{расч}{}_0$.

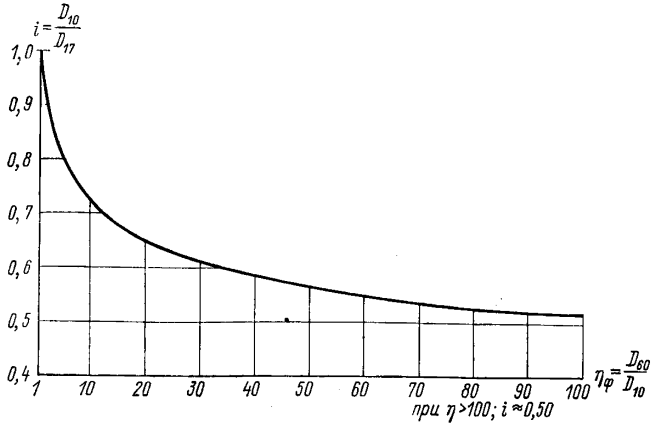

Рис. 32. График $\eta_Ф = f\left(\frac{D_{10}}{D_{17}}\right)$

«Зона допускаемого гранулометрического состава грунта, пригодного для укладки в первый слой фильтра» определяется следующим образом.

Полученная расчетная кривая $Ф$ (рис. 33) должна являться «нижним пределом» допустимого гранулометрического состава грунтов, пригодных для укладки в первый слой фильтра.

Для получения «верхнего предела» допустимой зоны необходимо, чтобы расчетный размер фракций $D^{расч}{}_{60}$ кривой $Ф$ соответствовал размеру фракций D'_{85} кривой *1*, а расчетный размер фракций $D^{расч}{}_{10}$ кривой $Ф$, размеру фракций D'_{35} кривой *1*, т. е. $D^{расч}{}_{60} = D'_{85}$ и $D^{расч}{}_{10} = 'D_{35}$. Тогда кривая *1* будет являться «верхним пределом» допустимого гранулометрического состава грунта, пригодного для укладки в первый слой фильтра (зона — I), рис. 33.

е) В случаях, когда имеет место продольная фильтрация в контакной зоне с обратным фильтром (а также в естественных прослойках) крупнозернистого материала, следует производить проверку прочности связного грунта на контактный размыв.

Связный грунт с числом пластичности $W_п \geqslant 5$ (3) и коэффициентом влажности $G \geqslant 0{,}85$, контактирующий с крупнозернистым материалом, не будет подвергаться контактному размыву и разрушению, если крупнозернистый материал подобран так, чтобы его состав мог удовлетворять гидродинамическим условиям фильтрационного потока, приведенным ниже.

Для условий недопущения размыва и отслаивания агрегатов частиц в зоне контакта связного грунта с крупнозернистым материалом максимальный размер пор в нем $D^{\text{макс}}_0$ должен быть таким, чтобы удовлетворялось следующее условие:

$$J^{\text{к}}_{\text{р}} \leqslant 0{,}75 J_{\text{кр}}, \tag{91}$$

где $J^{\text{к}}_{\text{р}}$ — расчетный градиент напора в крупнозернистом грунте (фильтре) на контакте со связным грунтом (при продольной

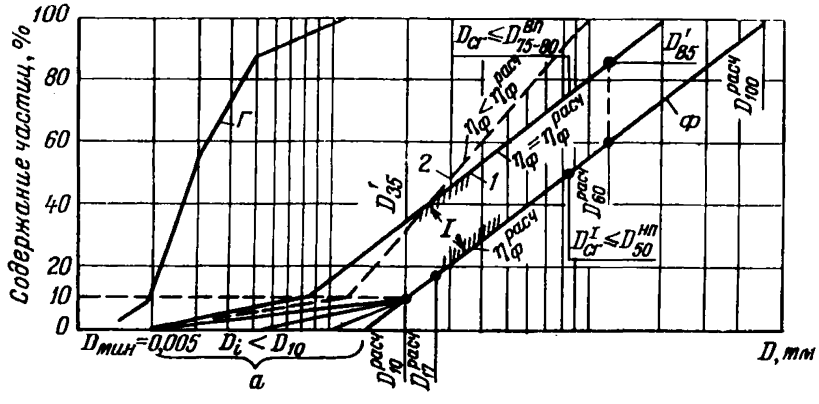

Рис. 33. График расчетного состава грунта и назначения «зоны допустимого гранулометрического состава грунтов первого слоя фильтра», защищающего связный (глинистый) грунт (к п. 6.13 д)

Г — связный (глинистый) грунт, защищаемый фильтром; *Ф* — расчетный гранулометрический состав грунта фильтра с $\eta^{\text{расч}}_{\text{ф}}$ (нижний предел „зоны"); *1*—верхний предел „зоны" с $\eta^{\text{расч}}_{\text{ф}}$, с $D'_{35} = D^{\text{расч}}_{10}$, $D'_{85} = D^{\text{расч}}_{60}$; *2* — граница возможного отклонения верхнего предела „зоны"; *а* — область допустимых размеров мелких фракций $D_i < D_{10}$ (10%) в составе фильтра (от $D_{\text{мин}} = 0{,}005$ мм до D_{10})

фильтрации); $J_{\text{кр}}$ — критический градиент напора для связного грунта, определяемый градиентом напора в крупнозернистом материале (фильтра, переходной зоны), максимальный диаметр пор которого $D^{\text{макс}}_0 \leqslant D^{\text{расч}}_0$:

$$J_{\text{кр}} = \frac{1}{\sqrt{\dfrac{D^{\text{макс}}_0}{}}} - 0{,}75, \tag{92}$$

причем $D^{\text{макс}}_0$, см, определяется по зависимости (18).

Для условий возможного допущения некоторого отслаивания агрегатов частиц связного грунта (без размыва контакта) должно удовлетворяться следующее условие:

$$J^{\text{к}}_{\text{р}} \leqslant (0{,}85 - 0{,}90) J_{\text{кр}}. \tag{93}$$

Если условие (91) не удовлетворяется, то это указывает на то, что принятый гранулометрический состав грунта первого слоя фильтра по условию (86) следует изменить.

Для нахождения нового состава фильтра $D^{\text{макс}}_0$, следует определить его значение по следующей зависимости:

$$D^{\text{макс}}_0 \leqslant \frac{0{,}56}{(J^{\text{к}}_{\text{р}} + 0{,}56)^2}, \text{ см}. \tag{94}$$

Новый состав первого слоя фильтра, максимальный размер пор которого соответствует зависимости (94), будет удовлетворять основному условию (86) и условию (91).

Оценка пригодности (подбора) карьерных грунтов для первого слоя обратных фильтров, защищающих связные грунты

6.14. По заданному гранулометрическому составу карьерных грунтов, пористости $n_ф$, коэффициенту разнозернистости $\eta_ф$ и величине D_{17}, используя зависимость (18), находим максимальный размер пор в этих грунтах:

$$D_0^{макс} = \varkappa \cdot C \cdot \frac{n_ф}{1 - n_ф} \cdot D_{17}.$$

Значение $D^{расч}{}_0$, как указывалось выше, определяется по формулам (80), (83) и (84).

Если удовлетворяется основное условие (86): $D^{макс}{}_0 \leqslant D^{расч}{}_0$, то данный состав грунта, имеющий коэффициент разнозернистости $\eta_{доп} \leqslant 50$, может быть использован для первого слоя фильтра без его обработки, т. е. без отсева крупных фракций или добавления мелких. Если условие (86) не удовлетворяется, то следует построить расчетную кривую гранулометрического состава грунта, по приведенному выше методу (п. 7), и по ней подобрать состав грунта (с рассевом) из имеющихся карьерных грунтов.

Примечание. Данный метод подбора карьерных грунтов для первого слоя фильтра применим как для условий недопущения деформаций отслаивания, так и с допущением, в зависимости от определения $D^{расч}{}_0$ по формулам (80) и (83), (84).

Проектирование (подбор) состава фильтровой подготовки под крепления верховых откосов плотин из связного грунта

6.15. 1) Гранулометрический состав фильтровой подготовки под крепления верховых откосов (при защите от волновых воздействий) должен быть практически несуффозионным, удовлетворяющим зависимости (50).

2) Фильтровая подготовка должна надежно защищать связный грунт верхового откоса плотины от волновых воздействий, размыва фильтрационным потоком, вытекающим из тела плотины (при сработке горизонта воды), размыва течением (в каналах) и пр.

а) Для условий динамических нагрузок на откос плотины, пульсирующей фильтрации в слое фильтровой подготовки, переменного горизонта воды в верхнем бьефе и возможного ее высачивания на верховой откос плотины, расчетный размер диаметра фильтрационных пор материала фильтровой подготовки рекомендуется определять по следующей формуле *:

$$D_0^{расч} = \sqrt{\frac{0{,}34}{J_р + 1}}, \qquad (95)$$

* Данной формулой предусматривается условие недопущения отрыва или отслаивания агрегатов частиц грунта плотины.

где

$$J_р = \operatorname{tg} \beta_0, \qquad (96)$$

β_0 — угол наклона верхового откоса к горизонту (рис. 34).

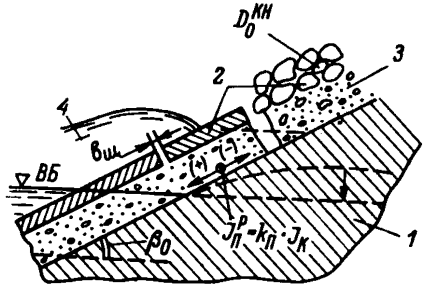

Рис. 34. К проектированию (подбору) фильтровой подготовки под крепления верховых откосов из связного (глинистого) грунта

1 — тело плотины из связного грунта; *2* — верховое покрытие откоса (каменное или железобетонными плитами); *3* — слой фильтровой подготовки; *4* — „накат волны"; β_0 — угол наклона верхового откоса к горизонту; $J^р_п = k_п J_к$ — расчетный градиент напора (при пульсации воды в фильтровой подготовке от наката и спада волны)

б) Гранулометрический состав материала фильтровой подготовки должен удовлетворять основному условию (86), т. е.

$$D_0^{макс} \leqslant D_0^{расч},$$

где $D^{макс}{}_0$ — максимальный размер диаметра фильтрационных пор фильтровой подготовки определяется по зависимости (18).

в) Фильтровая подготовка будет надежно защищать от контактного размыва откос плотины, при пульсирующем режиме продольной фильтрации (от наката и спада волны) в том случае, если будет удовлетворяться следующее условие:

$$J_п \leqslant 0{,}75 J_{кр}, \qquad (97)$$

где $J_п$ принимается по зависимости (71), а $J_{кр}$ по зависимости (92).

г) Если условие (97) не удовлетворяется, тогда следует изменить гранулометрический состав фильтровой подготовки, как указано в п. 6.13.

д) Материал фильтровой подготовки не должен проникать в поры каменной наброски $D^{кн}{}_0$ или в раскрывшуюся щель $b_щ$ железобетонного покрытия (рис. 34).

Это условие выражается следующими зависимостями:

1) Для каменного покрытия:

$$D_{50} \geqslant 0{,}55 D^{кн}{}_0, \qquad (98)$$

где D_{50} — расчетный размер фильтровой подготовки (принимается по расчетной кривой гранулометрического состава, рис. 33); $D^{кн}{}_0$ — диаметр пор каменной наброски, определяется по зависимости (9).

2) Для щели $b_щ$ железобетонного покрытия:

$$D_{50} \geqslant 0{,}55 b_щ. \qquad (99)$$

е) Если расчетный размер фракций материала фильтровой подготовки D_{50} не удовлетворяет зависимостям (98) или (99), то в таком случае следует изменить значение коэффициента разнозернистости $\eta_ф$ в большую сторону (в пределах $\eta^{доп}_ф \leqslant 50$), т. е. назначить более разнозернистый состав грунта фильтровой подготовки.

Если и в этом случае не будет удовлетворяться зависимость (98) или (99), то следует учесть рекомендации, приведенные в 4.1, г.

Определение коэффициента фильтрации суглинистого грунта

6.16. В тех случаях, когда неизвестен коэффициент фильтрации (при разведке карьеров, фильтрационных расчетах и др.), его можно определить по следующей экспериментальной формуле Г. Х. Праведного:

$$k_г = \frac{\sqrt[3]{\eta_г}}{25 \cdot \nu} \cdot \frac{n^3_ф}{(1 - n_ф)^2} \cdot d^2_{17}, \text{ см/с}, \qquad (100)$$

где $\eta_г = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ — коэффициент разнозернистости суглинистого грунта;

ν — кинематический коэффициент вязкости воды, см^2/с;

d_{17} — размер частиц связного грунта, в составе которого содержится 17% и меньше по массе, мм;

$n_ф$ — фактическая пористость связного грунта, определяется по зависимости:

$$n_ф = n_г - W_м \gamma_{ск}, \qquad (101)$$

где $n_г$ — пористость, соответствующая $\gamma_{ск}$ — объемной массе скелета грунта: $n_г = 1 - \frac{\gamma_{ск}}{\Delta}$; $W_м$ — максимальная молекулярная влагоемкость связного грунта, определяется по микроагрегатному методу:

$$W_м = 0{,}016A + 0{,}04Б + 0{,}1B + 0{,}35Г, \qquad (102)$$

где A, $Б$, B и $Г$ — принимаются в процентах в зависимости от размера частиц d:

$$A \to d = 0{,}5 - 0{,}25 \text{ мм}; \quad Б \to d = 0{,}25 - 0{,}05 \text{ мм};$$

$$B \to d = 0{,}05 - 0{,}005 \text{ мм}; \quad Г \to d \geqslant 0{,}005 \text{ мм};$$

(проценты A, $Б$, B и $Г$ — снимаются с кривой гранулометрического состава связного грунта).

Пример. Требуется определить $k_г$ суглинистого грунта, имеющего следующие основные характеристики: $\gamma_{ск} = 1{,}75$ г/см^3; $n_г = 0{,}35$; $\eta_г = \frac{d_{60}}{d_{10}} = 126$; $d_{17} = 0{,}0065$ мм; $\nu = 0{,}013$ см^2/с ($t = 10°$ С); из кривой гранулометрического состава получаем:

$d = 0{,}5 - 0{,}25$ мм ... $A = 8\%$; $d = 0{,}25 - 0{,}05$ мм ... $Б = 20\%$;

$d = 0{,}05 - 0{,}005$ мм ... $B = 20\%$; $d \geqslant 0{,}005$ мм ... $Г = 15\%$.

После подстановки значений в зависимости (100 — 102), получим:

$$W_м = 0{,}016 \cdot 8 + 0{,}04 \cdot 20 + 0{,}1 \cdot 20 + 0{,}35 \cdot 15 = 8{,}2\% = 0{,}082;$$

$$n_ф = 0{,}35 - 0{,}082 \cdot 1{,}75 = 0{,}207;$$

$$k_г = \frac{\sqrt[3]{126}}{25 \cdot 0{,}013} \cdot \frac{0{,}207^3}{(1 - 0{,}207)^2} \cdot 0{,}0065^2 = 4{,}12 \cdot 10^{-6} \text{ см/с}.$$

Примеры расчета гранулометрического состава грунтов первого слоя фильтра, защищающего связные (глинистые) грунты

6.17. Пример 1. В данном примере рассматривается случай, когда гранулометрический состав карьерных грунтов неизвестен.

Требуется запроектировать гранулометрический состав грунта первого слоя фильтра для дренажа, защищающего связный грунт тела плотины (применительно к рис. 6).

Исходные данные

Материал тела плотины — суглинок.

Средние расчетные характеристики суглинка:

Содержание глинистых частиц $d<0{,}005$ мм	15%
Пылеватых частиц от 0,05 до 0,005 мм	20%
Песчаных от 0,05 до 2 мм	45%
Гравийно-галечниковых частиц >2 мм	20%
Объемная масса суглинка при его укладке	1,70 г/см³
Плотность частиц суглинка Δ	2,70 г/см³
Пористость n	0,37
Число пластичности $W_п$	13,98%
Верхний предел пластичности $W_т$	35,46%
Нижний — „ — $W_р$	21,48%
Оптимальная влажность W_0	17%
Коэффициент водонасыщения G	~0,85

Порядок расчета

Материал тела плотины, имеющий основные параметры: глинистых частиц $d < 0{,}005$ мм — 15%, число пластичности $W_п = 13{,}98 > 5$, следует считать связным грунтом и все расчеты по проектированию первого слоя фильтра должны выполняться как для связного грунта.

а) Объемная масса скелета суглинка (нарушенной структуры) при его укладке в дренаж должна быть, согласно зависимости (77):

$$\gamma_{ск} \geqslant \gamma'_{ск} = \frac{\Delta}{1 + \varepsilon_т};$$

при $\Delta = 2{,}70$ г/см³, $\varepsilon_т$ — коэффициент пористости при влажности предела текучести равен:

$$\varepsilon_т = \frac{\Delta W_т}{100 \cdot \gamma_в} = \frac{2{,}70 \cdot 35{,}46}{100 \cdot 1} = 0{,}96; \quad \gamma'_{ск} = \frac{2{,}70}{1 + 0{,}96} = 1{,}38 \text{ г/см}^3.$$

Следовательно, при укладке суглинка в тело плотины объемная масса скелета должна быть

$$\gamma_{ск} \geqslant 1{,}38 \text{ т/м}^3, \text{ по проекту } \gamma_{ск} = 1{,}70 \text{ т/м}^3.$$

б) Градиент напора при входе в дренажную призму, определенный методом ЭГДА, равен $J_{вых} = 0{,}75$.

Согласно зависимости (79) за расчетный градиент напора следует принимать:

$$J_р = 1{,}5J_{вых} = 1{,}5 \cdot 0{,}75 = 1{,}13.$$

в) Для сооружений I класса не допускается отрыв или отслаивание агрегатов частиц связного грунта.

В этом случае $D^{расч}_0$ первого слоя фильтра определяется по зависимости (80):

$$D_0^{расч} = \sqrt{\frac{0{,}34}{\varphi J_р + \cos\theta}} = \sqrt{\frac{0{,}34}{1 \cdot 1{,}13 + \cos 45^\circ}} = 0{,}43 \text{ см} = 4{,}3 \text{ мм},$$

где $\varphi = 1$; $J_р = 1{,}13$; $\theta = 45°$.

г) Гранулометрический состав грунта первого слоя фильтра должен удовлетворять основному условию (86), т. е.

$$D_0^{макс} \leqslant D_0^{расч},$$

где $D^{макс}_0$ — максимальный размер фильтрационных пор материала первого слоя фильтра, определяется по зависимости (18).

За расчетный диаметр пор грунта первого слоя фильтра следует принимать:

$$D_0^{макс} = D_0^{расч} = 4{,}3 \text{ мм}.$$

д) Для определения расчетной кривой гранулометрического состава первого слоя фильтра следует назначить коэффициент разнозернистости первого слоя фильтра $\eta_ф$.

Учитывая, что состав первого слоя фильтра будет искусственно приготовляться, задаемся коэффициентом разнозернистости $\eta_ф = 25$.

Для принятого $\eta_ф = 25$ определяем допускаемую пористость $n_ф$ по зависимости (64):

$$n_ф = 0{,}45 - 0{,}1 \lg 25 = 0{,}31;$$

$n_0 = 0{,}45$ — для щебеночного грунта.

е) Определяем расчетный размер фракции D_{17} по зависимости (87):

$$D_{17} \leqslant \frac{D_0^{расч}}{\varkappa \cdot C} \cdot \frac{1 - n_ф}{n_ф} = \frac{4{,}3}{2{,}25 \cdot 0{,}78} \cdot \frac{1 - 0{,}31}{0{,}31} = 5{,}5 \text{ мм},$$

$$\varkappa = 1 + 0{,}05\eta_ф = 1 + 0{,}05 \cdot 25 = 2{,}25;$$

$$C = 0{,}455 \cdot \sqrt[6]{25} = 0{,}78.$$

ж) Действующий диаметр фракции D_{10} определяется по зависимости (88):

$$D_{10} = iD_{17} = 0{,}63 \cdot 5{,}5 \cong 3{,}5 \text{ мм},$$

для $\eta_ф = 25$, из рис. 32 $i = 0{,}63$.

з) Контролирующий диаметр фракции D_{60} определяется по зависимости (89)

$$D_{60} = \eta_ф D_{10} = 25 \cdot 3{,}5 \cong 87{,}0 \text{ мм}.$$

и) Максимальный диаметр фракций $D_{100} = D_{макс}$ определяется по зависимости (90):

$$D_{100} \leqslant D_{10} + 10^x \cdot D_{60} \cdot \frac{\eta_ф - 1}{5 \cdot \eta^2_ф} = 3{,}5 + 10^{2{,}8} \cdot 87 \cdot \frac{25 - 1}{5 \cdot 25^2} = 420 \text{ мм},$$

$$x = 1 + 1{,}28 \lg \eta_ф = 1 + 1{,}28 \lg 25 \approx 2{,}8.$$

к) По полученным расчетным значениям D_{10}, D_{17}, D_{60}, D_{100} строится расчетная кривая гранулометрического состава грунта первого слоя фильтра (рис. 33) и «зона допустимого состава», как указано в 6.13, д.

л) С целью проверки на контактный размыв связного грунта тела плотины при продольной фильтрации в зоне контакта с обратным фильтром следует пользоваться зависимостью (94):

$$D_0^{макс} \leqslant \frac{0{,}56}{(J^к_р + 0{,}56)^2}, \text{ см},$$

где вместо $J^к_р$ следует подставить величину уклона дренажа $J_д$, а полученное значение $D^{макс}_0$ сравнить с $D^{расч}_0$ (по условию 86).

Для примера принимаем, что $J_д = 0{,}1$. После подстановки в (94), получим:

$$D_0^{макс} = \frac{0{,}56}{(0{,}1 + 0{,}56)^2} = 1{,}28 \text{ см}.$$

Следовательно, основное условие (86) вполне удовлетворяется, так как

$$D_0^{макс} = 1{,}28 > > D_0^{расч} = 0{,}43 \text{ см},$$

отсюда следует, что контактного размыва быть не может.

Примечание. Для защиты связных грунтов применяется крупнозернистый состав фильтра. В связи с указанием следует обращать внимание на толщину слоя $T_{мин}$, в соответствии с зависимостью (61), т. е.

$$T_{мин} \geqslant (5 \div 7) \cdot D^I_{85}.$$

6.18. Пример 2. В данном примере рассматривается случай, когда известен гранулометрический состав карьерных грунтов, предназначенных для укладки их в первый слой фильтра.

Исходные данные

Защищаемый связный грунт тела плотины принимаем из примера 1.

Согласно выполненным расчетам, максимальный размер диаметра пор грунта фильтра должен быть

$$D_0^{\text{макс}} \leqslant D_0^{\text{расч}} = 4{,}3 \text{ мм}.$$

Данные карьерных грунтов

Грунт 1: $D'_{10} = 2{,}0$ мм; $D'_{17} = 3{,}0$ мм; $D'_{60} = 30$ мм; $\eta' = 15$; $n' = 0{,}28$.

Грунт 2: $D''_{10} = 8$ мм; $D''_{17} = 11$ мм; $D''_{60} = 34$ мм; $\eta'' = 4{,}26$; $n'' = 0{,}40$.

По зависимости (18) определяем максимальный размер пор карьерного грунта *1*:

$$C = 0{,}455 \cdot \sqrt[6]{15} = 0{,}71, \qquad \varkappa = 1 + 0{,}05 \cdot 15 = 1{,}75,$$

$$D_0^{\text{макс}} = 0{,}71 \cdot 1{,}75 \cdot \frac{0{,}28}{1 - 0{,}28} \cdot 3 = 1{,}45 \text{ мм} < D_0^{\text{расч}} = 4{,}3 \text{ мм}.$$

Из приведенного расчета видно, что $D^{\text{макс}}{}_0 < D^{\text{расч}}{}_0$, следовательно, основное условие (86) выполняется. Коэффициент разнозернистости $\eta' = 15 < \eta^{\text{доп}}$.

Карьерный грунт *1* может быть использован в качестве первого слоя фильтра для защиты водонасыщенного связного грунта тела плотины.

Для карьерного грунта *2* аналогичным путем получаем:

$$C = 0{,}455 \cdot \sqrt[6]{4{,}26} = 0{,}57, \qquad \varkappa = 1 + 0{,}05 \cdot 4{,}26 = 1{,}21,$$

$$D_0^{\text{макс}} = 0{,}57 \cdot 1{,}21 \cdot \frac{0{,}40}{1 - 0{,}40} \cdot 11 = 5{,}1 \text{ мм} > 4{,}3 \text{ мм}.$$

Из приведенного следует, что в этом случае основное условие (86) не удовлетворяется, так как $D^{\text{расч}}{}_0 = 4{,}3 < D^{\text{макс}}{}_0 = 5{,}1$ мм, поэтому карьерный грунт *2* не может быть использован в качестве первого слоя фильтра, без его обогащения более мелкими фракциями.

Пример 3. Проектирование фильтровой подготовки.

Требуется для суглинистого грунта тела плотины (рис. 34) запроектировать гранулометрический состав грунта фильтровой подготовки под верховое покрытие откоса (каменное или железобетонными плитами).

Грунт тела плотины тот же, что в примере 1.

Порядок расчета

а) Для условий динамических нагрузок на верховой откос плотины и недопущения отслаивания связного грунта тела плотины на контакте с фильтровой подготовкой, расчетный размер диаметра фильтрационных пор материала фильтровой подготовки должен определяться по формуле (95), а расчетный градиент напора по зависимости (96).

Расчетный градиент напора:

$$J_р = \operatorname{tg} \beta_0 = \operatorname{tg} 15° = 0{,}27,$$

где $\beta_0 = 15°$ — угол наклона верхового откоса к горизонту;

$$D_0^{расч} = \sqrt{\frac{0{,}34}{J_р + 1}} = \sqrt{\frac{0{,}34}{0{,}27 + 1}} = 0{,}52 \text{ см} = 5{,}2 \text{ мм}.$$

Следовательно, для того, чтобы не происходило отслаивание связного грунта тела плотины на контакте с материалом фильтровой подготовки должно удовлетворяться основное условие (86), т. е.

$$D_0^{макс} \leqslant 5{,}2 \text{ мм}.$$

где $D^{макс}{}_0$ — максимальный размер фильтрационных пор материала фильтровой подготовки.

б) Фильтровая подготовка с $D^{макс}{}_0 \leqslant 5{,}2$ мм должна надежно защищать от контактного размыва откос плотины при пульсирующей фильтрации (от наката и спада волны).

Это условие будет выполнено, если удовлетворяется неравенство (97), т. е. $J_п \leqslant 0{,}75 J_{кр}$. В данном случае (рис. 34), при $\beta_0 = 15°$, по зависимости (71) определяем

$$J_п = 1{,}35 \sin \beta_0 = 1{,}35 \sin 15° = 0{,}35.$$

Значение $J_{кр}$ определяется по зависимости (92):

$$J_{кр} = \frac{1}{\sqrt{D_0^{макс}}} - 0{,}75 = \frac{1}{\sqrt{0{,}52}} - 0{,}75 = 0{,}64.$$

После подстановки значений в (97), получим:

$$0{,}35 < 0{,}75 \cdot 0{,}64, \text{ т. е. } 0{,}35 < 0{,}48.$$

Следовательно, условие (97) удовлетворяется, данный состав грунта с $D^{макс}{}_0 = 5{,}2$ мм может быть принят в качестве фильтровой подготовки под каменные или железобетонные крепления верховых откосов плотины.

в) Для построения кривой проектируемого несуффозионного состава грунта фильтровой подготовки и определения «допустимой зоны» следует пользоваться методикой, изложенной в 6.13, д.

г) Размер пор (верхового покрытия) каменной наброски $D^{кн}{}_0$ или $b_щ$ определяется из зависимости (98) или (99), см. 6.15, д.

Для данного примера расчета, при $D_{50} = 6$ см, диаметр пор камня $D^{кн}{}_0$ или ширина $b_щ$:

$$D_0^{кн} \leqslant 1{,}8 \cdot D_{50} = 1{,}8 \cdot 6 = 10{,}8 \text{ см}.$$

Примечание. В случае наличия карьерных грунтов, которые могут быть использованы в качестве фильтровой подготовки, подбор состава выполняется с учетом расчетных параметров данного примера.

7. УКАЗАНИЯ ПО ПРОИЗВОДСТВУ РАБОТ ПРИ УСТРОЙСТВЕ ОБРАТНЫХ ФИЛЬТРОВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Общие указания

7.1. Производство работ по устройству обратных фильтров должно вестись в соответствии с «Временными техническими условиями (ВТУ) на возведение дренажных устройств гидротехнических сооружений», которые разрабатываются проектной организацией для каждого конкретного объекта с учетом конструкции дренажных устройств, материала фильтров, способа производства работ и пр.

7.2. Толщина слоев обратных фильтров при их укладке не должна отклоняться от заданной проектом. Допустимые отклонения в ее величине не должны превышать:

при толщине слоя 10 — 20 см — более 3 см;
„ „ 20 — 50 см — более 3 см;
„ „ 50 см — более 5 — 10 см.

Укладку слоев фильтра можно производить как насухо, так и отсыпкой грунта в воду. При укладке слоев фильтра насухо надо следить за тем, чтобы не происходило расслоения грунта.

При отсыпке слоев фильтра в воду расслаивание его неизбежно. Поэтому при таком способе грунт слоев фильтра должен быть более однозернистый, и коэффициент разнозернистости его надлежит принимать $\eta_ф \leqslant 5 - 10$.

Для получения требуемой минимальной толщины слоев фильтра при отсыпке в текущую воду толщину слоев следует принимать:

для однослойного обратного фильтра — не менее 0,75 — 1,0 м,

для двухслойного и более каждый последующий слой должен быть не менее 0,50 — 0,75 м.

При этом следует учитывать скорость движения воды, в зависимости от зернового состава грунта, которая должна быть:

а) для песчаных грунтов фильтра
$$v \leqslant 0{,}80 \text{ м/с};$$
б) для гравия и мелкой гальки фракций до 25 мм
$$v \leqslant 1{,}25 \text{ м/с};$$
в) для крупного зернового состава $D > 25$ мм
$$v \leqslant 1{,}50 \text{ м/с}.$$

7.3. Допустимая пористость песчано-гравийных, галечниковых и щебеночных грунтов не должна выходить за пределы графика $n_ф = f(\eta_ф)$, рис. 9.

Дополнительные указания

7.4. Транспортировка материалов к месту укладки обратных фильтров, разбивка фильтров на участки, последовательность укладки должны исключать возможность засорения материала и перемешивания слоев при укладке.

7.5. Поверхность основания, предназначенная под обратные фильтры, предварительно планируется с уплотнением до заданного объемного веса скелета (сухого) грунта.

При планировке основания срезка грунта допускается только до заданных отметок. В случаях переборов и необходимости подсыпки последняя осуществляется грунтом основания с уплотнением его до требуемого объемного веса, или грунтом первого слоя фильтра. Спланированная поверхность не должна иметь выступов, впадин, превышающих ± 5 см при проверке рейкой.

7.6. Укладка слоев фильтра наслонного дренажа на откос производится бульдозером снизу вверх. При этом материал на откос плотины спускается по специальным лоткам с небольшой высоты.

В случае двухслойного фильтра наслонного дренажа укладка второго, т. е. последующего слоя фильтра должна выполняться после окончания укладки первого слоя и приемки его техинспекцией.

При перерыве в работе, во избежание перемешивания материалов первого и второго слоев фильтра, первый слой фильтра должен выступать не менее чем на 1 м из-под вышележащего слоя.

7.7. При устройстве дренажных призм сначала выполняются работы по возведению их нижней части с установкой между слоями продольных шаблонов, обеспечивающих правильное сопряжение верхней и нижней части дренажной призмы.

7.8. При положительных температурах укладка грунтов первого и второго слоев обратных фильтров должна производиться с увлажнением до 5%.

7.9. Проезд по уложенному тонкослойному фильтру, а также сбрасывание на него камня с большой высоты воспрещается. Для дальнейшего производства работ уложенную часть фильтра необходимо защитить от засорения и разрушения.

7.10. Укладку трубчатого дренажа в намывные плотины, во избежание его заиления и вывода из строя, следует производить после намыва тела плотины. Участки траншей с готовым трубчатым дренажем засыпаются грунтом низовой призмы плотины с уплотнением тела плотины до установленного объемного веса.

7.11. В случае устройства трубчатого дренажа до намыва плотины, участки траншеи с готовым трубчатым дренажем должны быть (до намыва плотины) обсыпаны грунтом низовой призмы плотины. При этом, толщина слоя обсыпки должна быть не менее 3—5 м. Только после указанных мероприятий производится намыв тела плотины.

7.12. При производстве работ в зимнее время должны соблюдаться следующие правила:

а) песчаные и щебеночные грунты должны укладываться в сыпучем состоянии без кусков льда и смерзшихся комьев льда и снега;

б) после снегопада снег перед укладкой новых слоев фильтра должен быть тщательно удален;

в) укладка слоев фильтра на мерзлое песчаное основание допускается только после тщательной его подготовки — очистки от комьев снега, льда и удаления с поверхности мерзлой корки;

г) укладка смежных слоев фильтра должна производиться непрерывно и на полную высоту.

7.13. Должен быть обеспечен непрерывный тщательный контроль качества работ по сооружению дренажных устройств как строительными, так и проектными организациями, осуществляющими авторский надзор. Приемка готового дренажного устройства должна производиться специальной комиссией с оформлением надлежащей документации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Строительные** нормы и правила (СНиП), часть II 53-73. Плотины из грунтовых материалов. — М.: Стройиздат, 1974. — 29 с.

2. **Инструкция** по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений. ВСН 02-65/ ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. — Л.: Энергия, 1965. — 95 с.

3. **Указания** по проектированию переходных зон каменно-земляных плотин: ВСН 47-71/ ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. — Л.: Энергия, 1971. — 52 с.

4. **Указания** по проектированию противофильтрационных устройств подземного контура бетонных плотин на скальных основаниях с трещинами тектонического происхождения: ВСН 02-73/ ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. —Л.: Энергия, 1974. — 38 с.

5. **Временные** указания по проектированию и подбору гранулометрического состава фильтров переходных зон, защищающих связные (глинистые) грунты ядер (экранов) высоких и сверхвысоких плотин из местных материалов: ВСН 01-66/ БНИИГ им. Б. Е. Веденеева. — Л.: Энергия, 1965. — 51 с.

6. **Руководство** по расчетам фильтрационной прочности плотин из грунтовых материалов: II 55-76/ ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. — Л.: Энергия, 1976. — 79 с.

7. **Праведный Г. Х.** Проектирование и подбор гранулометрического состава фильтров переходных зон высоких плотин. — М. — Л., Энергия, 1966. — 83 с.

8. **Патрашев А. Н., Праведный Г. Х.** Определение расчетных размеров частиц несвязных грунтов при проектировании обратных фильтров. — Труды координационных совещаний по гидротехнике/ ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1965, вып. XXI, с. 170 — 177.

9. **Павчич М. П.** Способ определения несуффозионных гранулометрических составов грунта. — Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1961, т. 68, с. 197 — 202.

10. **Праведный Г. Х.** Обратные фильтры из пористого бетона для скважин и дренажей. — Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1960, т. 63, с. 143 — 157.

11. **Праведный Г. Х.** Проектирование обратных фильтров, защищающих связные грунты. — Труды координационных совещаний по гидротехнике/ ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1964, вып. IX, с. 19 — 28.

12. **Праведный Г. Х.** К вопросу проектирования переходных зон земляных плотин. — Гидротехническое строительство, 1970, № 8, с. 35—37.

13. **Руководство** по проектированию дренированных золоотвалов тепловых электрических станций: П 64-77/ ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева; Теплоэлектропроект. Л., 1977. — 69 с. (Праведный Г. Х., Румянцев О. А. Методика проектирования гранулометрического состава обратных фильтров дренажей золоотвалов и примеры расчета).

14. **Патрашев А. Н., Праведный Г. Х.** Проект инструкции по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений. — М. — Л.: Госэнергоиздат. 1963. — 87 с.

15. **Чугаев Р. Р.** Земляные гидротехнические сооружения (теоретические основы расчета). — Л.: Энергия, 1967, 460 с.

16. **Аравин В. И., Нумеров С. Н.** Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений. — 2-е изд. — М. — Л.: Стройиздат, 1955. — 291 с.

17. **Истомина В. С.** Фильтрационная устойчивость грунтов. — М.: Госстройиздат, 1957. — 295 с.

18. **Жиленков В. Н.** Водоупорные свойства грунтов ядер и экранов высоких плотин. — Л.: Энергия, 1968. — 113 с.

19. **Моисеев С. Н.** Каменно-земляные и каменнонабросные плотины. — М.: Энергия, 1970. — 224 с.

20. **Сторожук С. И.** Фильтрационная прочность супесчаных и пылеватых грунтов Средней Азии и проектирование к ним обратных фильтров. Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. — Ташкент, 1972. — 23 с. с ил. САНИИРИ им. В. Д. Журина.

21. **Беляшевский Н. Н., Бугай Н. Г.** Контактная устойчивость обратных фильтров под дренированным креплением с учетом пульсации давления. — Гидротехническое строительство, 1964, № 3, с. 15 — 17.

22. **Доценко Т. П., Канарский В. Ф.** Плотины и дамбы распластанного профиля. — М.: Энергия, 1975. — 152 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ 6

Принятые термины и обозначения 6
Назначение обратных фильтров 9
Требования к обратным фильтрам 9
Задачи проектирования обратных фильтров 10
Классификация обратных фильтров 10
Материалы для обратных фильтров 11
Исходные данные для проектирования 12

2. РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ГРУНТОВ ОБРАТНЫХ ФИЛЬТРОВ 12

Расчетные параметры несуффозионных и суффозионных грунтов 14
Расчетные зависимости для определения коэффициента фильтрации песчано-гравелистых и щебеночных грунтов 14
Каменная наброска 15
Определение расчетного диаметра фильтрационных пор в несвязных грунтах 17
Определение расчетных диаметров сводообразующих частиц на контакте сопряжения грунта с фильтром 17
Определение размеров суффозионных частиц в песчано-гравелистом (щебеночном) грунте 19
Расчетные зависимости для критических скоростей и градиентов суффозии в песчано-гравелистых (щебеночных) грунтах 21
Определение допустимых градиентов напора в области дренажа и размеров дренажных устройств 24
Определение размеров кольматирующих фильтр частиц . . . 26

3. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБРАТНЫХ ФИЛЬТРОВ, ЗАЩИЩАЮЩИХ НЕСВЯЗНЫЕ ГРУНТЫ 28

Общие указания 28
Оценка несуффозионности (суффозионности) грунтов и определение процента выноса 28
Определение расчетных размеров сводообразующих частиц грунта, защищаемого обратным фильтром 30
Пределы применимости разнозернистых грунтов для обратных фильтров 32
Определение допустимых междуслойных коэффициентов . . . 33
Минимальное значение коэффициента фильтрации обратного фильтра 33

Толщина и число слоев фильтра 33
Определение допустимых пористости и объемной массы грунта фильтров 35
Расчетные случаи проектирования гранулометрического состава грунтов обратных фильтров 36
Методика проектирования гранулометрического состава первого слоя обратного фильтра для I и II расчетных случаев 37
Методика подбора гранулометрического состава первого слоя фильтра для III, IV, V и VI расчетных случаев 45

4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ (ПОДБОР) СОСТАВА ФИЛЬТРОВОЙ ПОДГОТОВКИ ПОД КАМЕННЫЕ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КРЕПЛЕНИЯ ВЕРХОВЫХ ОТКОСОВ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН ИЗ НЕСВЯЗНОГО ГРУНТА 66
Порядок расчета 70

5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБРАТНЫХ ФИЛЬТРОВ ИЗ ПОРИСТОГО БЕТОНА 73

Общие указания 73
Требования к обратным фильтрам из пористого бетона . . . 74
Методика подбора гранулометрического состава щебеночного (гравийного) материала для устройства обратных фильтров из пористого бетона (рис. 27—31) 75
Технология изготовления фильтров из пористого бетона . . . 78
Пример расчета 81

6. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБРАТНЫХ ФИЛЬТРОВ, ЗАЩИЩАЮЩИХ СВЯЗНЫЕ ГРУНТЫ 84

Общие указания 84
Методика подбора гранулометрического состава грунта первого слоя обратного фильтра к связному водонасыщенному грунту . . . 86
Оценка пригодности (подбора) карьерных грунтов для первого слоя обратных фильтров, защищающих связные грунты 91
Проектирование (подбор) состава фильтровой подготовки под крепления верховых откосов плотин из связного грунта 91
Определение коэффициента фильтрации суглинистого грунта . . 93
Примеры расчета гранулометрического состава грунтов первого слоя фильтра, защищающего связные (глинистые) грунты 94

7. УКАЗАНИЯ ПО ПРОИЗВОДСТВУ РАБОТ ПРИ УСТРОЙСТВЕ ОБРАТНЫХ ФИЛЬТРОВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ 99

Общие указания 99
Дополнительные указания 99
Список литературы 102

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ОБРАТНЫХ ФИЛЬТРОВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

П 92-80

ВНИИГ

Научный редактор *Г. Х. Праведный*
Редактор *Л. Г. Сетко*
Технический редактор *Т. М. Бовичева*

Сдано в набор 16.06.81. Подписано к печати 2.09.81.
М-21584. Формат бумаги 60×90/16. Бумага типографская № 2.
Литературная гарнитура. Высокая печать. Печ. л. 6,5.
Уч.-изд. л. 6,0. Тираж 980. Заказ 307. Цена 90 к.

Типография ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева.
[illegible]0, Ленинград, Гжатская ул., 21.

gost.e-ecolog.ru