

*Николай Кожевников*

*Проектирование  
и строительство  
земляных плотин*

*Строительство  
земляных плотин  
сухим способом  
и намывом.  
Нормативы  
и расчеты*

Николай Кожевников

**Проектирование и строительство  
земляных плотин**

«Издательские решения»

**Кожевников Н. Н.**

Проектирование и строительство земляных плотин /  
Н. Н. Кожевников — «Издательские решения»,

ISBN 978-5-44-748111-7

Книга содержит краткое обобщение трудов известных гидротехников России и собственных изданий автора. Изложен перечень документов по расчету и строительству земляных плотин, в том числе возведения сухим способом и намывом. По ней удобно произвести квалифицированное проектирование и строительство земляных плотин, не прибегая к помощи специализированных организаций. Книгу можно использовать для обучения техников и инженеров в неспециализированных институтах.

ISBN 978-5-44-748111-7

© Кожевников Н. Н.  
© Издательские решения

# Содержание

1. Назначение и конструкции земляных плотин	6
2. Классификация гидротехнических сооружений по капитальности	12
3. Типы земляных плотин	13
4. Условия работы земляной плотины	16
5. Дренаж плотин и расчет фильтрации земляных плотин и основания	18
5.1. Основные положения теории фильтрации	19
5.2. Расчет фильтрации земляных плотин и основания	20
6. Устойчивость откосов плотины	24
Конец ознакомительного фрагмента.	26

**Проектирование и строительство  
земляных плотин  
Строительство земляных  
плотин сухим способом  
и намывом. Нормативы и расчеты  
Николай Николаевич Кожевников**

© Николай Николаевич Кожевников, 2016

Создано в интеллектуальной издательской системе Ridero

## 1. Назначение и конструкции земляных плотин

*Плотиной* называют гидротехническое сооружение, перегораживающее реку для подъема уровня воды перед ним, сосредоточения напора в месте расположения сооружения и создания водохранилища. Плотина неразрывно связана с водохранилищем. Водохозяйственное значение плотины многообразно: подъем уровня воды и увеличение глубин в верхнем бьефе для обеспечения судоходства, водозабора для водоснабжения городов, нужд орошения с/х земель, регулирования годового стока реки для предотвращения паводкового затопления территорий и селений, обеспечения водой в меженный период. В большинстве случаев плотины и водохранилища строят совместно с гидроэлектростанцией (ГЭС) для выработки электроэнергии из природного возобновляемого источника – воды реки.

На территории России водяные мельницы с плотинами строились еще во времена Киевской Руси. Мощные ГЭС с плотинами больших размеров начали строить лишь при Советской власти после принятия плана ГОЭЛРО. В послевоенный период для ускоренного восстановления разрушенного хозяйства началось большое строительство мощных гидроузлов (ГЭС) на реках Волге, Днепре, Днестре, Каме, Даугаве, Куре, а с 1970 г. развернуто строительство в районах Сибири и Дальнего Востока.

В настоящее время гидроэнергетические ресурсы крупных рек в центральной части России почти полностью освоены. В планах дальнейшего развития гидроэнергетики предусматривается строительство ГЭС на малых реках в центральной России и мощных ГЭС в Сибири, Якутии, Эвенкии для обеспечения строительства горно-обогатительных комбинатов добычи ценных металлов, которыми богаты Сибирь и Заполярье России.

Разновидностью плотин по удержанию поверхностных вод или гидроотвалов техногенных отходов являются *дамбы*. По проектированию и технологии строительства дамбы не отличаются от плотин, обычно, только меньшими напорами, высотой и уменьшенными размерами профиля. Зато многие дамбы имеют большую протяженность. Так, например, при строительстве Чебоксарской ГЭС при полном проектируемом напоре затапливаются огромные земли сельскохозяйственного назначения. Протяженность защитных дамб достигает десятки километров, их строительство растянулось на многие годы из-за недостаточного финансирования, и Чебоксарская ГЭС до сих пор работает с пониженным использованием мощности установленных гидроагрегатов.

Другим назначением дамб служит ограждение гидроотвалов Горно-обогатительных комбинатов и золоотвалов ГРЭС. Часто эти гидроотвалы, если позволяет местность располагают в глубоких оврагах и ограждающие дамбы достигают больших высот и представляют весьма ответственное гидротехническое сооружение. Примером может служить гидроотвал «Березовый лог» КМА, где высота гидроотвала из местных грунтов доходит до 100 м. Местные прорывы дамбы имели место и были локализованы.

Техногенная катастрофа произошла в Киеве в 1961 г. на гидроотвале «Бабий яр», когда при производстве работ (намыве) произошел прорыв разжиженных грунтов, которые в виде селя обрушились на близлежащий район города. Этот пример свидетельствует о необходимости тщательного проектирования и строительства подобных объектов. Государственная комиссия, расследовавшая эту аварию, отметила, что проектной организацией треста «Гидромеханизация» Минмонтажспецстроя были допущены ошибки в проектировании объекта повышенной опасности.

Расчет устойчивости дамб, удерживающих разжиженные грунты, производят давление жидкости с плотностью выше  $1 \text{ г/см}^3$ . В этом принципиальное отличие от расчета устойчивости плотины на давление воды в водохранилище.



**Рис. 1.1.** Последствия прорыва дамбы гидроотвала «Бабий яр» в Киеве в 1961 г. [15].

Гипотетическую опасность представляют каскады ГЭС на больших реках. В большинстве случаев прорыв воды верхнего водохранилища каскада может привести к переполнению нижнего водохранилища и последовательному разрушению плотин. Таких катастроф в России не было, но при отсутствии контроля над состоянием плотин они могут произойти. Поэтому проектирование и строительство плотин крайне ответственно и выполняются специализированными изыскательскими, проектными и строительными организациями.

Основоположниками гидротехнических расчетов плотин и водохранилищ в России были академик Н. Н. Павловский и профессор Н. Е. Жуковский, создавшие престижную и высоко ценимую мировой наукой школу российских гидротехников. В 1960 – 1990 гг. Советские гидротехники выполняли строительство многих гидроузлов в Арабских странах, в том числе уникальной Высотной Асуанской Плотины на р. Нил.

При выборе створа строительства плотин, кроме других необходимых условий, учитывают наличие и возможность использования для строительства местных грунтов.

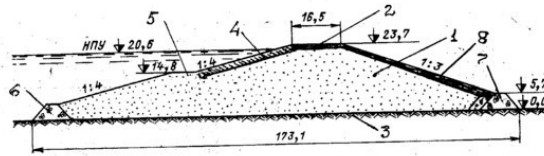
Наиболее дешевым вариантом строительства являются земляные плотины и дамбы из местных месторождений грунтов: песка, глины, камня. Возведение земляных плотин всегда много дешевле, чем бетонных, хотя по объему они многократно превышают объем бетонных плотин. Но при размещении гидроузла в каньоне реки возводят бетонные плотины, которые позволяют в одном сооружении совместить плотину, водосбросы и здание гидроагрегатов.

Земляные плотины возводят при строительстве ГЭС на равнинных реках с развитой поймой. К таким относится построенный каскад гидроузлов на реках Волга, Днепр, Дон, Кама, где на широких поймах и самом русле рек возведены протяженные земляные песчаные плотины огромного объема, намывные способом гидромеханизации из местных песчаных месторождений.

Проектированием плотин, неразрывно связанных с водохранилищами, производят специализированные проектные институты, в частности ОАО «Гидропроект», в котором работают квалифицированные дипломированные инженеры гидротехники.

Для обучения техников и инженеров открытых горных работ, для которых написана эта литература, глава «Проектирование и строительство земляных плотин» изложена в сокращении по сравнению с программой для обучения инженеров – гидротехников, но достаточным для ознакомления с конструкциями, расчетами и производством работ.

Конструкция земляной плотины зависит от многих местных природных факторов: грунтов основания, наличия имеющихся местных грунтовых материалов, размеров водохранилища, климатических условий. Поэтому каждая плотина привязывается к местным условиям и её конструкция в каждом случае индивидуальна и не может быть типовой, как в гражданском строительстве. На нескольких примерах построенных плотин приведем их конструктивные элементы.



**Рис.1.2.** Поперечный разрез русловой намывной земляной плотины Рижской ГЭС [11].

Пример простейшей плотины:

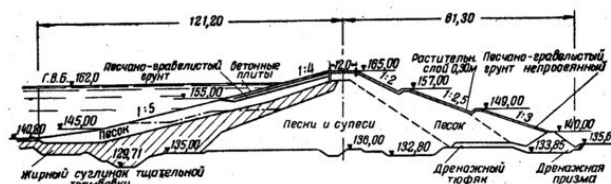
1 – тело земляной плотины из песка; 2 – гребень плотины – дорожное покрытие (гравий – асфальт); 3 – не фильтрующее основание плотины; 4 – крепление бетонными плитами против волнового воздействия на откос; 5 – берма на откосе упорная; 6 – банкет из каменной наброски для перекрытия русла р. Даугавы; 7 – дренажная призма для снижения выхода фильтрационный вод на низовой откос; 8 – крепление низового откоса посевом трав.

Назначение каждого элемента плотины понятно из описания.

На рис. 1.3. Показан поперечный разрез плотины с экраном и понуром.

**Понур** – это водонепроницаемое покрытие дна водохранилища, примыкающее к плотине и предназначенное для удлинения пути фильтрации воды под сооружением и снижения фильтрационного давления на его подошву. Устройством понура, достигается уменьшение скорости и расхода профильтровавшейся воды и, следовательно, опасности разрушения основания сооружения фильтрационным потоком. Для устройства понура применяют глину, глинобетон, битумные материалы, торф, бетон, железобетон.

Для уменьшения фильтрации через тело плотины и основания плотины применяют также **экраны**.



**Рис.1.3.** Земляная плотина с экраном и понуром на канале им. Москвы [12].

Если в основании плотины залегают хорошо фильтрующие пески, то для уменьшения фильтрации воды через основание и тело плотины, для повышения устойчивости плотины и сокращения потерь воды из водохранилища, применяют так называемые ядра и диафрагмы. Материалом ядра могут служить глина, суглинок, глинобетон, плотно трамбуемые или укатываемые слоями. (рис. 1.4, 1.5)

Диафрагмы (рис. 1.5) могут выполняться не только из бетона, но и из металлического шпунта. Плотины рис. 1.3, 1.4, 1.5 выполнялись сухой отсыпкой грунта.

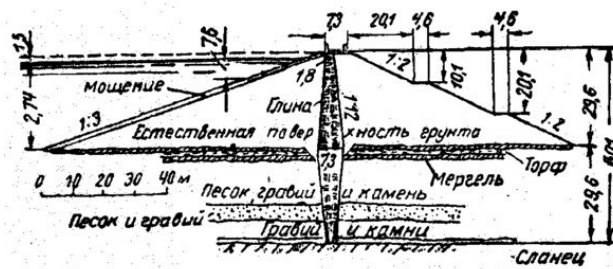


Рис.1.4. Плотина с ядром, опущенным до водоупора [2].

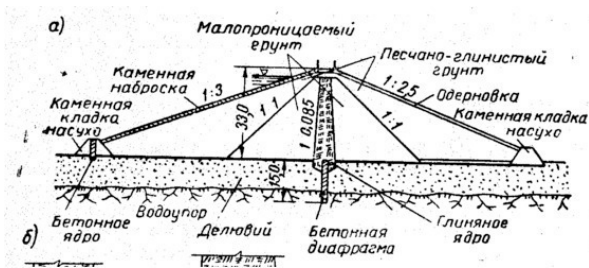
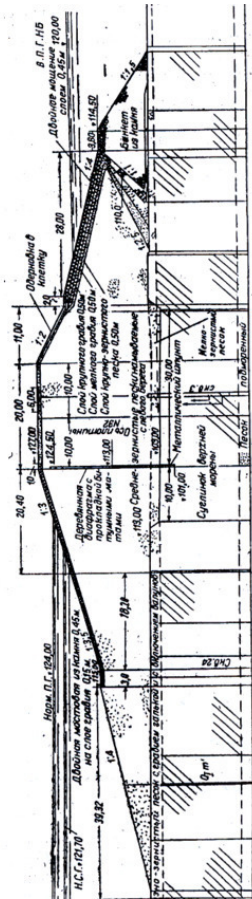


Рис.1.5. Плотина с глиняным ядром и бетонной диафрагмой [2].

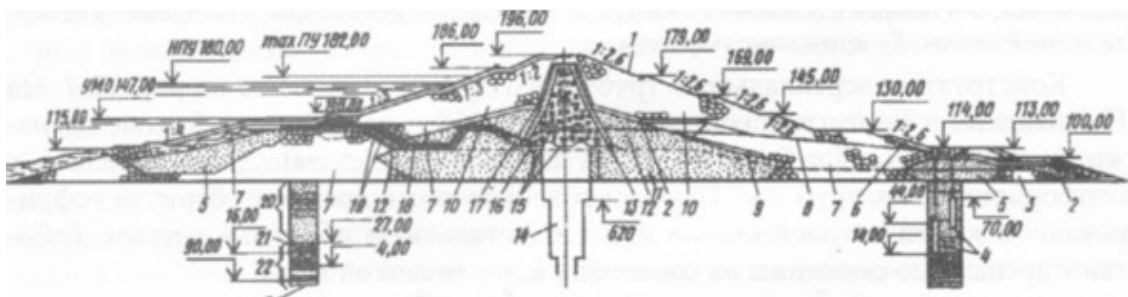
Первой намывной плотиной в России, выполненной способом гидромеханизации, была Ианьковская плотина, выполненная в 1935 – 1936 гг. под руководством профессора Н. Д. Холина при строительстве при строительстве канала Москва – Волга [12].

Плотина надежно сохраняет водохранилище до сегодняшнего времени (рис. 1.6).



**Рис.1.6.** Типовой профиль Ивановской песчаной плотины с деревянной противофильтрационной диафрагмой и металлическим шпунтом в основании [12].

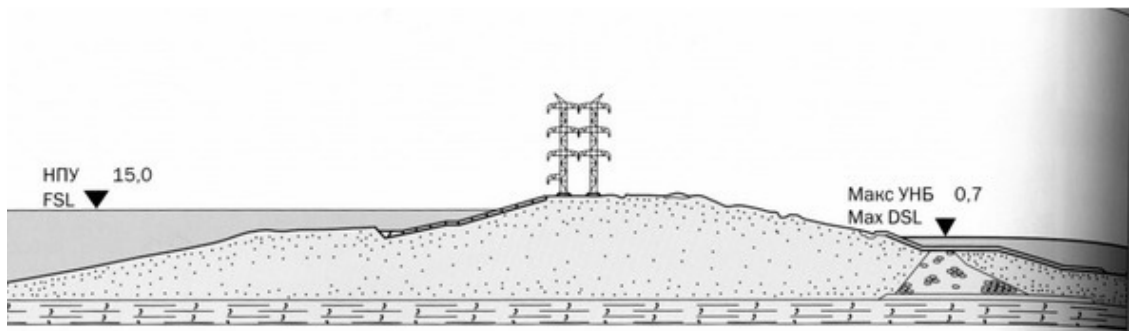
Большим достижением российских гидротехников, признанным во всем мире, явилось проектирование и строительство Высотной Асуанской плотины на р. Нил в Египте. В каменно-набросной плотине советские гидротехники выполнили плотный замыв мелким дюнным песком каменную отсыпку, а также осуществили впервые в практике гидростроительства уплотнение с помощью специальной плавучей установки с мощными вибраторами намывтого в воду мелкозернистого песка на глубине до 30 м.



**Рис. 1.7.** Конструктивный профиль Высотной Асуанской плотины на р. Нил [14].

1 – мостовая по щебню; 2 – трехслойный фильтр (1 м щебня размером 40—150 мм, 0,5 м щебня размером 5—35 мм и 1 м крупного песка  $d=1,5$  мм); 3 – карьерная мелочь; 4 – дренажные скважины; 5 – дюнный песок; 6 – уплотненный дюнный песок; 7 – камень крупнее 150 мм, замытый песком; 8 – кривая депрессии; 9 – щебень 40—150 мм; 10 – каменная наброска с гидроуплотнением; 11— шеллалский песок; 12 – уплотненный дюнный песок; 13 – уплотненный шеллалский песок; 14 – цементно—глинистая завеса; 15 – цементационные и смотровые галереи; 16 – ядра из ила; 17 – щебень; 18 – понур из глины; 19 – щебень размером 40—150 мм; 20 – песок различной крупности; 21 – галька и валуны с песчаным заполнителем; 22 – переслаивание супесей, суглинков, песков и песчаников; 23 – магматиты

Из намывных однородных песчаных плотин, возведенных на реках центральной зоны России и Украины, как типичный профиль, приводим на рис. 1.8 разрез плотины Волжской ГЭС на Волге у г. Волгограда (г. Волжский).



**Рис. 1.8.** Намывная песчаная однородная плотина Волжской ГЭС. [4]

Аналогичный профиль имеют и плотины ГЭС, построенных на р. Волге в 1946 – 1960 гг.

## 2. Классификация гидротехнических сооружений по капитальности

Плотина являются одной из важнейших и ответственных частей гидротехнического сооружения. Поэтому их расчет производится в комплексе с другими элементами гидротехнического сооружения: водохранилищем, водосбросом и другими элементами. Поэтому при проектировании плотин учитываются все требования, предъявляемые к гидротехническому сооружению, одним из важнейших является их классификация по капитальности или безопасности [Л. 2.].

Характер сооружения	Разряды				
	1	2	3	4	5
	Класс				
<i>А. Постоянные</i>					
1. Основные . . . . .	I	II	III	IV	IV
2. Второстепенные . . . . .	III	III	IV	IV	V
<i>Б. Временные</i>					
1. Основные (со сроком службы менее 5 лет) . . . . .	III	III	IV	IV	V
2. Второстепенные . . . . .	IV	IV	IV	V	V
3. Вспомогательные . . . . .	IV	IV	IV	V	V

Таблица 1 [2].

В целях обеспечения надежности в соответствии с их важностью и ответственностью все гидросооружения разбиваются на пять классов в зависимости от капитальности:

I – особо капитальные, II – повышенной капитальности, III – обычной капитальности, IV – облегченные, V – особо облегченные. Классы сооружений устанавливаются по производственной эффективности, значению сооружения и сроку их службы.

По производственной эффективности сооружения делятся на пять разрядов (подробнее см. ГОСТ 3315—46). Определение класса и разряда сооружения необходимо для назначения коэффициентов запаса в расчетах с учетом всех факторов, влияющих на эксплуатацию сооружений, включая объем работ при изысканиях и состава проекта.

### 3. Типы земляных плотин

Поперечное сечение земляной плотины представляет собою обычно трапецию (рис. 3.1.), или близкую к ней фигуру с ломаным очертанием боковых сторон, называемые откосами – верховой со стороны водохранилища и низовой откос за гребнем плотины. Откосы могут нести горизонтальные площадки – бермы необходимые для производства крепления верхового откоса камнем или бетоном от волнового воздействия и упора крепления на откосе.

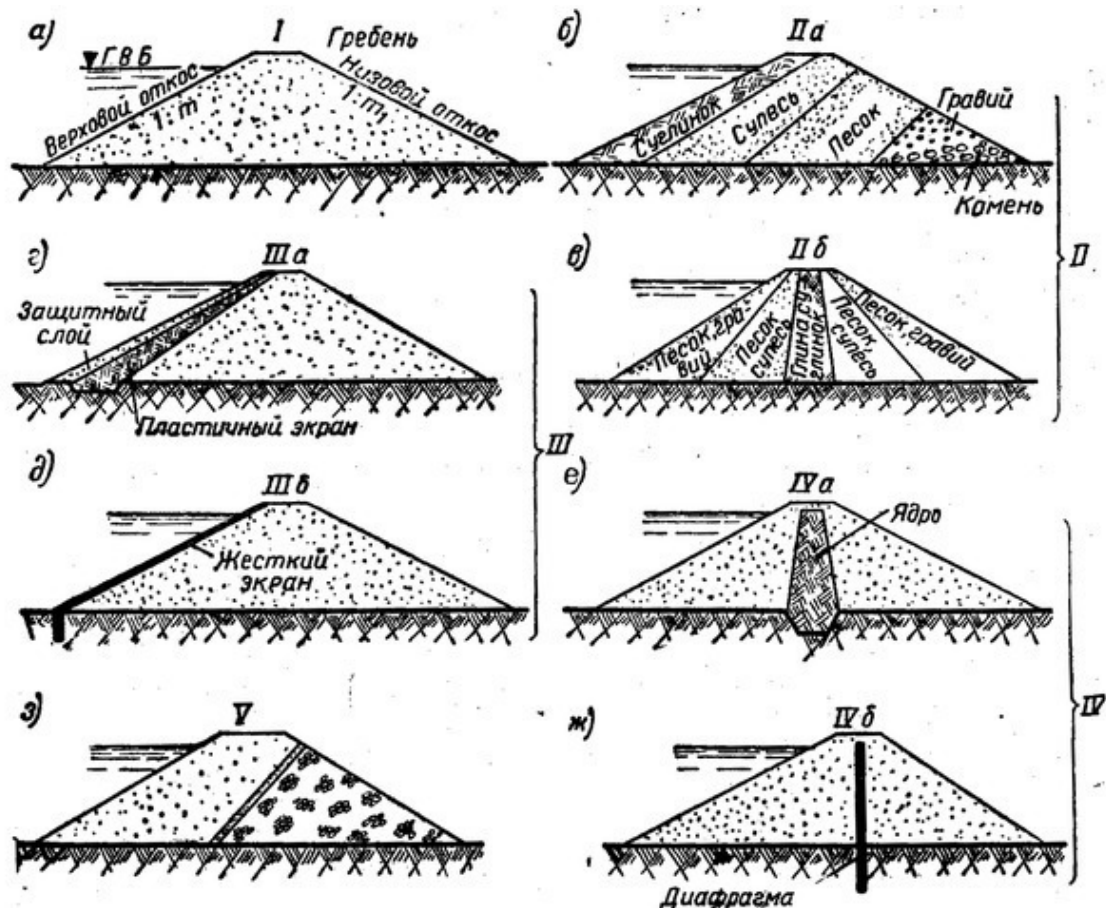


Рис.3.1. Основные типы земляных плотин [2]

В зависимости от применяемых для тела плотины материалов и их размещения в сооружении, а также способов обеспечения водонепроницаемости земляные плотины делятся на следующие основные типы:

I а – плотины из одного материала, например, из песка, супеси, суглинка;

II – плотины из нескольких разных грунтов: из суглинка и супеси, или из глины, супеси и песка и т.п., располагаемых в известном порядке; тип II, а – с водонепроницаемым грунтом на верховом откосе и II б – с водонепроницаемым грунтом в центральной части. Тип II применяется в тех случаях, когда в распоряжении строителей не имеется одного вполне удовлетворительного материала в достаточном количестве;

III – плотины с водонепроницаемым покрытием – экраном; тип III а – с пластичным экраном из слоя глины, суглинка или торфа; тип III б – с жестким экраном – из бетона и железобетона, дерева, металла; применяются в тех случаях, когда основной материал плотины сильно водопроницаемый;

IV – плотины с водонепроницаемой внутренней преградой; тип IVa – с ядром, выполняемым из пластичного материала (глины, жирный суглинок); тип IVб – с жесткой диафрагмой, выполняемой из бетона, металла, дерева и т.п.; этот тип применяется в тех же условиях наличия сильно фильтрующего грунта;

V – тип – плотины каменно-земляные – из земли и камня, в которых преобладает земля, и лишь меньшая, низовая часть выполнена из камня.

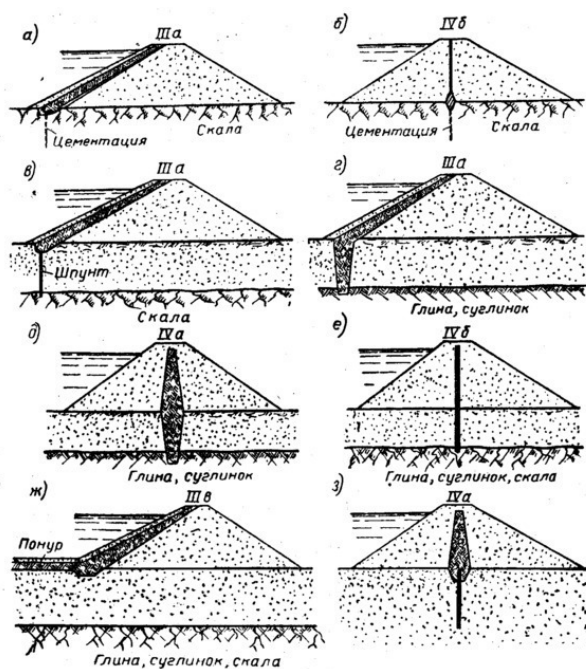
Эта классификация предполагает надежное водонепроницаемое основание. Но земляные плотины можно строить практически почти на любых основаниях, кроме сильно разжиженных илистых грунтов или глубоких торфяниках, или пород, характеризующихся крайней неравномерностью механических свойств. Это обстоятельство является одним из крупнейших преимуществ земляных плотин.

Однако в случае водопроницаемого основания, простирающегося на ту или иную глубину до водоупора, необходимо надежное сопряжение водонепроницаемых частей плотины с водонепроницаемыми слоями основания, или во всяком случае принятия мер по защите от вредных явлений фильтрации в основании. В соответствии с этим описанные выше типы плотин получают дополнительные отличия.

При наличии скального основания водонепроницаемая часть плотины (экран, диафрагма) должна быть соединена со скалой зубом или бетонной шпонкой (рис. 3.2 а – б). При наличии сильной трещиноватости в скале под зубом или диафрагмой устраивается цементационная или битумная завеса.

При наличии нескального основания, если водонепроницаемый грунт (глина, скала и т.п.) расположен на приемлемой глубине, плотину сопрягают с водоупорным зубом (глиняным, бетонным) или шпунтовой стенкой, идущей соответственно от экрана, ядра или диафрагмы плотины (рис. 3.2 в, г, д, е). При глубоком залегании водонепроницаемого пласта или его отсутствии устраивают понур, являющийся продолжением экрана или другой водонепроницаемой части плотины (рис. 3.2 ж) и удлиняющий пути фильтрации в основании. Вместо понура при устройстве в теле плотины ядра или диафрагмы под последним опускается «висячий» зуб или шпунтовая стенка (рис. 3.2 з). В настоящее время как противофильтрационное мероприятие через основание плотины используют технологию «Стена в грунте».

Заложение откосов плотины зависит от её материала и определяется расчетом устойчивости и может быть от 1: 3 до 1: 5.



**Рис.3.2.** Типы сопряжений плотин с основанием [2].

С 1970 г. г. получили распространение при строительстве ограждающих дамб с ограниченным волновым воздействием и высотой (водоемы – охладители тепловых и атомных электростанций, так называемые пляжные динамически волноустойчивые верховые откосы из песчаных и песчано-гравийных грунтов с заложением откоса 1: 20 – 1: 30 при намыве дамб способом гидромеханизации. Несмотря на значительное увеличение объема дамбы, это решение часто бывает более экономичным, чем крепление откоса бетонными плитами или камнем.

Такие инженерные решения были использованы при строительстве ограждающих дамб прудов-охладителей Курской и Печорской АЭС. Это решение перенесено от природных пляжей на Рижском взморье (Паланга) и побережий Дании. Существуют относительные расчеты заложения пляжных откосов в зависимости от крупности песка и высоты волны. Эти дамбы с намывными пляжными откосами введены в нормативы проектирования [1].

По способу их постройки плотины делятся на: а) насыпные, возводимые путем сухой отсыпки грунта и последующего его уплотнения (укатки); б) плотины намывные, возводимые способом гидромеханизации; в) плотины полунамывные, когда грунт разрабатывается экскавацией и отсыпается в боковые призмы или бункер, из которого грунт размывается водяной струей и подается в тело плотины (плотина Мингечаурской ГЭС, Плявиньской ГЭС).

В плотинах намывных, выполняемых из неоднородного грунта, последний сортируется при намыве по крупности, при этом с помощью воды, крупность частиц грунта к откосам плотины постепенно увеличивается, создавая центральную часть из мелких частиц с меньшим коэффициентом фильтрации.

## 4. Условия работы земляной плотины

Материал тела земляной плотины всегда проницаем для воды. Поэтому в теле плотины создается поток воды, фильтрующийся из верхнего бьефа в нижний. Свободная поверхность этого фильтрационного потока (рис. 4.1), постепенно понижающийся к нижнему бьефу, называется поверхностью насыщения или депрессионной поверхностью, а линия пересечения ее с вертикальной плоскостью, проводимой поперек оси плотины, называется линией насыщения или депрессии, или депрессионной линией.

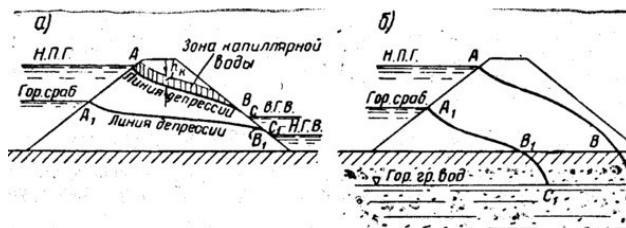


Рис. 4.1. Схема фильтрации и насыщения плотины водой [2].

Ниже депрессионной поверхности грунт плотины насыщен водой, взвешивается ею; выше депрессионной линии находится зона капиллярного поднятия воды, высота которой зависит от свойства капиллярности грунта: в песчаных грунтах она достигает 5 – 15 см, в суглинистых и глинистых – 0.5 – 1.5 м и более.

Выше капиллярной зоны грунт обладает небольшой влажностью, так называемой естественной влажностью, зависящей от климатических условий и состава самого грунта.

Границы описанных зон изменяют свое положение в зависимости от колебаний горизонта воды в верхнем и нижнем бьефах. Например, при сработке водохранилища линия депрессии АВ или АВС (рис. 4.1) понижается до линии А<sub>1</sub>В<sub>1</sub> или А<sub>1</sub>В<sub>1</sub>С<sub>1</sub>. Положение депрессионной линии зависит также от высоты уровня нижнего бьефа, а при проницаемом основании и отсутствии воды в нижнем бьефе – и от уровня грунтовых вод.

Линия депрессии устанавливается в положениях, указанных на рис. 4.1., лишь с течением времени при длительном стоянии определенных горизонтов верхнего и нижнего бьефов; в остальное время она занимает промежуточные положения.

Эти изменения положения линии депрессии необходимо учитывать особенно при расчете плотин ГАЭС, где уровни верхнего и нижнего бассейнов изменяются на большие величины дважды в сутки. Фильтрация, воздействие воды верхнего и нижнего бьефов, климатические условия создают сложный режим земляного тела плотины.

В зоне насыщения водой грунт взвешивается гидростатическим давлением и подвержен действию фильтрационных сил (гидродинамическое давление), стремящихся сдвинуть частицы грунта в направлении к низовому откосу; мельчайшие частицы грунта могут при этом выноситься в нижний бьеф, самый же откос может оползнуть, обрушиться. Прочность грунта, насыщенного водой, несколько падает вообще по сравнению с сухим. В плотинах из проницаемых грунтов могут иметь значение потери воды из верхнего бьефа (фильтрационный расход).

Волнения воды в верхнем и нижнем бьефах может размывать грунт откосов в пределах колебания уровней воды, это вызывает необходимость крепления откосов. Ледяной покров, образующийся в верхнем бьефе, может также повреждать откосы.

При температурах ниже 0° откосы плотины выше горизонта воды и гребень ее могут промерзнуть, а суглинистые и глинистые грунты их при этом будут пучиться, а при оттаивании

оползать и образовывать трещины; трещины могут появляться в тех же грунтах и при высыхании откосов в жаркое время года. Поперечные трещины опасны ввиду возможности развития по ним разрушительной фильтрации.

Атмосферные осадки, выпадающие на плотину, частью просачиваются внутрь и смачивают тело плотины, частью стекают по откосам. Смачивание тела плотины водой понижает прочность ее грунта, что нежелательно, поэтому принимаются меры к ускорению и упорядочению стока дождевых вод с гребня и откосов путем поверхностного дренажа и крепления откосов.

Таким образом, водонепроницаемость грунта и фильтрация воды в теле земляной плотины играют весьма важную роль. Статистика показывает, что большинство аварий и разрушений земляных плотин произошло вследствие недостаточности мер по борьбе с фильтрацией воды.

Кроме фильтрации через тело плотины, на её устойчивость и безопасность влияет фильтрация воды под плотиной и в её примыкании к берегам и бетонным сооружениям.

Уменьшение фильтрации в примыкании к берегам при фильтрующих или трещиноватых грунтах достигается путем их цементации или устройством шпунтовой стенки, а также уширением плотины по гребню.

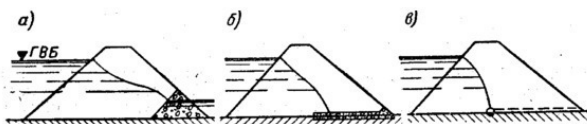
Сокращение фильтрации в основании плотины (если это необходимо) достигается устройством диафрагмы: шпунтовой завесой, зуба из глины или бетона, цементацией (рис. 2,3).

Превышение гребня плотины над форсированным максимальном горизонтом воды водохранилища и расчетным накатом волны назначается в соответствии с [1] и классом ответственности сооружения. На гребне плотины со стороны водохранилища по соображениям безопасности для транспорта и пешеходов часто сооружают железобетонный банкет.

## 5. Дренаж плотин и расчет фильтрации ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН И ОСНОВАНИЯ

В целях уменьшения водонасыщенной зоны в плотинах и повышения устойчивости откосов, получения более обжатых и экономичных профилей плотин, применяется дренаж плотин. Дренаж достигается введением в тело плотин зон или полостей, заполненных крупнозернистым материалом (гравием, щебнем, камнем) с ничтожным сопротивлением фильтрации, а на больших плотинах труб с фильтрующим не тканым материалом, перехватывающим фильтрационный поток. Дренаж приводит к снижению депрессионной кривой.

Существуют основные виды дренажа: 1) дренажная призма (рис. 5.1. а), 2) дренажный тюфяк (рис. 5.1. б), 3) трубчатый дренаж (рис. 5.1. в). В зависимости от наличия или отсутствия дренажа земляные плотины делятся на дренированные и не дренированные.



**Рис. 5.1.** Схемы дренажа плотин [2].

Эксплуатационные качества земляной плотины зависят от положения и очертания поверхности фильтрационного потока в теле плотины (кривой депрессии), расхода фильтрации через тело плотины и под основание плотины. От этого в большой степени зависит устойчивость плотины.

Для надежной работы земляной плотины необходимо, чтобы кривая депрессии была заглублена в тело плотины не менее, чем глубина промерзания грунта в районе строительства, а её выклинивание (высачивание) на низовом откосе было под уровень воды нижнего бьефа либо в границах дренажного устройства. Фильтрационный расход не должны превышать допустимого значения водохозяйственного расчета потерь воды, а фильтрация не влияла на деформацию грунта плотины и основания и вымыв частиц грунта (суффозию).

## 5.1. Основные положения теории фильтрации

Фильтрация воды в порах грунта происходит под влиянием силы тяжести благодаря наличию разности напоров воды в отдельных точках потока. Движение фильтрационных вод подчиняется закону Дарси:  $q = k\omega J$ , (1) где:  $q$  – расход воды;  $k$  – коэффициент фильтрации грунта;

$\omega$  – полная геометрическая площадь сечения потока;

$J$  – гидравлический уклон (градиент) фильтрационного потока, равный  $H/l$ , где:

$H$  – потеря напора на длине пути фильтрации  $l$ ;

Из формулы (1) следует, что расход грунтового потока линейно зависит от градиента, что имеет место при ламинарном движении воды.

Закон Дарси выражается также зависимостью:

$$V = kJ \quad (2).$$

Выражение для скорости  $V$  можно записать также в виде:  $V = q / \omega$  (3),

где  $V$  – фиктивная скорость фильтрации, отнесенная к полному сечению потока  $\omega$ .

Действительная скорость течения воды в порах грунта равна:  $V^I = V/m$  (4),

где  $m$  – активная пористость грунта.

Наименование грунтов	Глина	Суглинок	Супесь	Иловатые грунты	Торфяные грунты
Коэффициенты фильтрации $k$ см/с	$\leq 10^{-7}$	$10^{-7} - 10^{-5}$	$10^{-5} - 10^{-3}$	$10^{-3} - 10^{-2}$	$10^{-4} - 10^{-3}$
Наименование грунтов	Песок мелкозернистый	Песок среднезернистый	Песок крупнозернистый	Гравий и галька	
Коэффициенты фильтрации $k$ см/с	$10^{-4} - 10^{-3}$	$10^{-3} - 10^{-2}$	$10^{-2} - 10^{-1}$	$10^{-1} - 10$	

Таблица №2 [3].

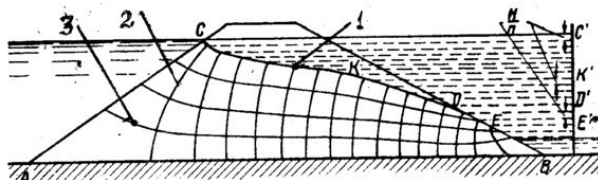
Примерные осредненные значения коэффициентов фильтрации различных грунтов приведены в таблице №2 [3].

При рабочем проектировании профиля плотины и расчетов фильтрации коэффициент фильтрации определяют на основании исследования карьерных грунтов. Из приведенной таблицы 2, видно, что эти коэффициенты могут отличаться на порядок и более от натуральных.

## 5.2. Расчет фильтрации земляных плотин и основания

Существуют десятки способов теоретических методик расчета фильтрации через тело плотины и основания плотины, в том числе включающих построение фильтрационной сетки – линий тока и эквипотенциалей – линий равного давления. Фильтрационная сетка может быть построена вручную методом постепенного приближения. Но точнее, для разных контуров сооружений, строится на приборе ЭГДА – метода электрогидродинамической аналогии – аналогии движения фильтрационных вод с движением электрического тока, разработанного академиком Н. Н. Павловским. Большинство методик сводится к решению сложных дифференциальных математических уравнений с тремя неизвестными. С методом построения линий тока и эквипотенциалей вручную и на устройстве ЭГДА можно ознакомиться в специальной литературе по гидротехнике.

Для ознакомления с фильтрационной сеткой приводим рис. 5.2. с построенными линиями тока и эквипотенциалами для плотины на водоупорном основании [2].

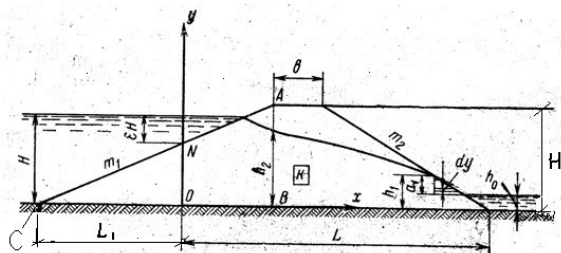


**Рис. 5.2.1.** Фильтрационная сетка в однородной плотине на водоупорном основании: 1 – депрессионная кривая; 2 – вертикальные линии равного давления или эквипотенциали; 3 – линии тока или течения фильтрационных вод.

При ручном способе построения сетки величина напора делится на  $n$  частей и линии эквипотенциалей на пересечениях с соответствующими горизонтальными линиями деления напора  $H$  дают точки *кривой депрессии*, разделяющую линию течения воды фильтрации и сухой части плотины.

В сокращенном курсе, каким является настоящая работа, целесообразно использовать для расчета земляных плотин на фильтрацию более простые уравнения, не требующие для решения сложных методов [7].

Рассмотрим вначале упрощенный расчет однородной плотины на непроницаемом основании – наиболее тяжелый случай для устойчивости низового откоса плотины, изображенный на рис. 5.2.2.



**Рис. 5.2.2.** Расчетная схема фильтрации однородной не дренированной плотины на непроницаемом основании [7].

Острый клин верхового откоса плотины принимает очень малое участие в фильтрации. Поэтому эта часть верхового откоса из рассмотрения выбрасывается и заменяется условной трапецией ONAB. В компенсацию этого допущения положение раздельной линии ON определяется значением  $\epsilon$ , принимаемым от 0.3 до 0.4 (чем круче откос верхового клина, тем меньше  $\epsilon$ ). Линия депрессии и расход фильтрации в условиях трапеции будут близкими к действительности.

Тогда  $ON = H - \epsilon H$ ; А отрезок от 0 координат до сопряжения откоса  $m_1$  с основанием в точке С, будет равен:  $L_1 = (H - \epsilon H) m_1$ ;

Вычислим  $L$ :  $L = H_1 m_1 + B + H_1 m_2 - L_1$ ;

Согласно Л.7. Высота выклинивания линии депрессии на низовом откосе будет:

$h_1 = L/m_2 + h_0 - [L^2/m_2^2 - (H - h_0)^2]^{0.5}$ . При отсутствии воды в нижнем бьефе  $h_0 = 0$ .

Фильтрационный расход на 1 м длины плотины:

$$q_1 = k (H^2 - h_1^2) / [2 (L - m_2 h_1)]$$

Ординаты депрессионной кривой находятся из уравнения  $y = [H^2 - (2q/k) x]^{0.5}$

Приведем пример №1 расчета параметров фильтрации для заданных размеров плотины и напора: Напор  $H = 20$  м; Ширина по гребню плотины  $B = 10$  м; Высота плотины  $H_1 = 22$  м;

Заложение откосов  $m_1 = m_2 = 4$ ; Коэффициент смещения координат  $\epsilon = 0.4$ ; Коэффициент фильтрации  $k = 0.036$  м/час (как средний в песчаной однородной плотине Цимлянской ГЭС); Глубина воды в нижнем бьефе  $h_0 = 0$ ;

Тогда:  $L_1 = (H - \epsilon H) m_1 = (20 - 0.4 \times 20) \times 4 = 48$  м ;

$L = H_1 m_1 + B + H_1 m_2 - L_1 = 22 \times 4 + 10 + 22 \times 4 - 48 = 138$  м;

Высота выклинивания линии депрессии на низовом откосе  $h_1$  будет при  $h_0 = 0$ ;

$$h_1 = L/m_2 - [L^2/m_2^2 - H^2]^{0.5} = 138/4 - [(132^2/4^2 - 20^2)]^{0.5} = 34.5 - 28.1 = 6.4 \text{ м}$$

Фильтрационный расход на 1 м длины плотины  $q_1 = k (H^2 - h_1^2) / [2 (L - m_2 h_1)]$

$$q_1 = 0.036 (20^2 - 6.4^2) / [2 (138 - 4 \times 6.4)] = 12.9/224.8 = 0.057 \text{ м}^3/\text{час},$$

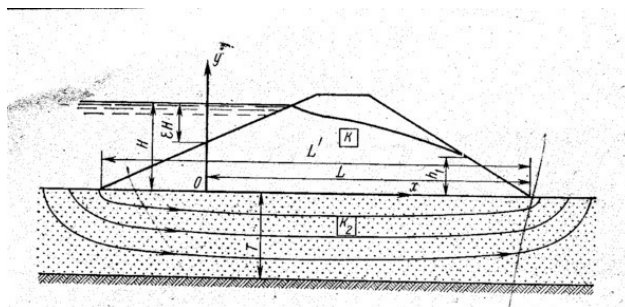
или на 1 км длины плотины  $Q = 57 \text{ м}^3/\text{час}$

Ординаты депрессионной кривой находим из уравнения  $y = [H^2 - (2q/k) x]^{0.5}$

$$Y = [20^2 - (2 \times 0.057/0.036) x]^{0.5} = [400 - 3.16X]^{0.5}; \text{ При } X = 0 \text{ } Y = H = 20 \text{ м};$$

При  $Y = h_1 = 6.4$  м;  $X = L - m_2 h_1 = 138 - 4 \times 6.4 = 112.4$  м; Задаваясь значением  $X$  от нуля до 112 м можно построить кривую депрессии.

Обратимся к расчету расхода фильтрации плотины на проницаемом основании.



**Рис. 5.2.3.** Схема фильтрации однородной недренированной плотины на проницаемом основании [7].

Общий расход фильтрации равен сумме двух расходов: расхода  $q_1$  через однородную плотину на непроницаемом основании и расхода  $q_2$  через проницаемое основание. Первый расход определяется по формуле, положение кривой депрессии – по уравнению (205). Второй расход – представляет расход воды, протекающий по прямоугольной трубе высотой  $T$  и шириной  $1$  м кривыми струйками, средняя длина которых  $\beta L'$ , а средний градиент потока  $H/\beta L'$ . Поэтому расход через основание:

$$q_2 = k_2 HT / \beta L'$$

Суммарный расход фильтрации:

$$q = k (H^2 - h_1^2) / [2 (L - m_2 h_1)] + k_2 HT / \beta L' \quad (219),$$

Где  $h_1$  – высота выклинивания линии депрессии на низовом откосе по уравнению (203),

$k_2$  – коэффициент фильтрации грунта основания;  $\beta$  – коэффициент удлинения пути фильтрации через основание:

Выполним примерный расчет фильтрации под основание плотины (пример №2) при глубине залегания водоупора  $T = 20$  м и условиях принятых в примере №1.

**Отношение  $L'/T = 186/20 = 9.3$ .** По интерполяции из таблицы можно принять коэффициент

**$\beta = 1.17$ ; При этих условиях расход фильтрации через основание плотины будет:**

$$q_2 = k_2 HT / \beta L' = 0.036 \times 20 \times 20 / 1.17 \times 186 = 14.4 / 217.6 = 0.066 \text{ м}^3/\text{час на } 1 \text{ м длины}$$

**плотины. Суммарная фильтрация в основании и тело плотины составит:**

$$Q = 0.066 + 0.057 = 0.123 \text{ м}^3/\text{час}.$$

В литературе [2] рассмотрены и другие, более сложные случаи определения фильтрации: высоты выклинивания линии депрессии на низовом откосе и расхода фильтрации для однородной дренированной плотины, экранированной плотины с дренажем, экранированной плотины с зубом и дренажем. Эти случаи рекомендуем изучать непосредственно по первоисточнику.



**Рис. 5.2.4.** Дренажная призма из камня с наклонным дренажем [2].

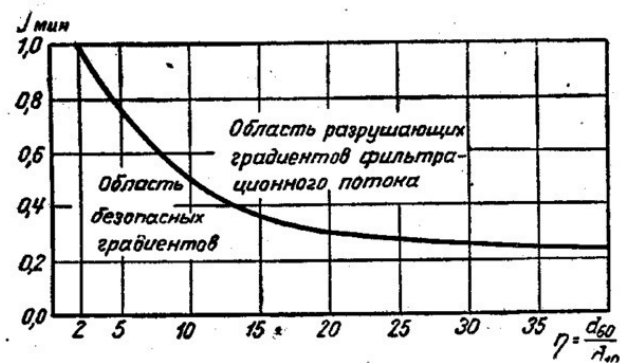
Из приведенного расчета фильтрации через однородную плотину на непроницаемом основании, изображенной на рис. 5.2., видно, что линия депрессии на низовом откосе выклинивается на значительной высоте  $h_1$ , что может вызвать суффозию грунта, особенно при промерзании. В целях исключения суффозии и понижения выхода выклинивания фильтрационных вод используют дренажную призму и наклонный дренаж (рис. 5.2.4.).

В литературе [2] помещена таблица определения суффозии по коэффициенту неоднородности грунта плотины и градиентам фильтрации  $H/l$ .

По исследованиям В. С. Истоминой, скорости и градиенты фильтрации, при которых начинается механическая суффозия, существенно зависят от неоднородности грунта, характеризующейся, как известно, коэффициентом

$$\eta = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

На фиг. 4—12 приводится график минимальных (безопасных) градиентов направленной снизу вверх фильтрации, при которых суффозия исключается. Как видно из графика, чем больше неоднородность грунта  $\eta$ , тем при меньших градиентах начинается суффозия. Ввиду недостаточной еще проверки графика 4—12 на практике, рекомендуется уменьшать полученные по графику значения  $I$  в 1,5—2 раза в зависимости от класса сооружения.



**Фиг. 4—12.** Минимальные (безопасные) градиенты (при которых отсутствует суффозия в несвязных грунтах) в зависимости от неоднородности грунта (по предложению В. С. Истоминой)

## 6. Устойчивость откосов плотины

Минимально возможный профиль земляной плотины представляет собою трапецию с откосами, обычно не круче 1: 1,5. Вес плотины такого профиля настолько значителен, что о сдвиге ее под действием горизонтальных сил от давления воды верхнего бьефа не может быть речи. Поэтому расчет земляной плотины на сдвиг не производят.

Неустойчивыми могут оказаться откосы плотины как сами по себе, так и в связи с недостаточной устойчивостью основания.

1. В насыпях из сыпучих (несвязных) грунтов, лишенных сцепления и обладающих лишь внутренним трением, если отсутствуют фильтрационные силы, устойчивый откос представляет собою плоскость, наклоненную к горизонту под углом  $\varphi$ , где  $\varphi$  – угол внутреннего трения или естественного откоса. Всякий откос с углом наклона  $\theta$   $\leq$   $\varphi$  является неустойчивым.

Для песчаных грунтов естественной влажности углы внутреннего трения варьируют от  $25^{\circ}$  для песков до  $43^{\circ}$  для гравелистых грунтов в зависимости от плотности.

2. Связные грунты (глина, суглинки) кроме внутреннего трения частиц (угла  $\varphi$ ) располагают силами сцепления  $c$ , измеряемые в единицах давления (паскалях и др.).

В литературе [2] приведен график приближенного метода расчета для однородных земляных откосов из связных грунтов, предполагающий поверхность сползания откоса круглоцилиндрической. По этому графику, зная объемный вес грунта  $\gamma_1$  (т/м<sup>3</sup>), угол внутреннего трения  $\varphi$  сцепление  $c$  (т/м<sup>2</sup>), и высоту откоса  $h$  (м), можно определить угол безопасного откоса  $\Theta$ .

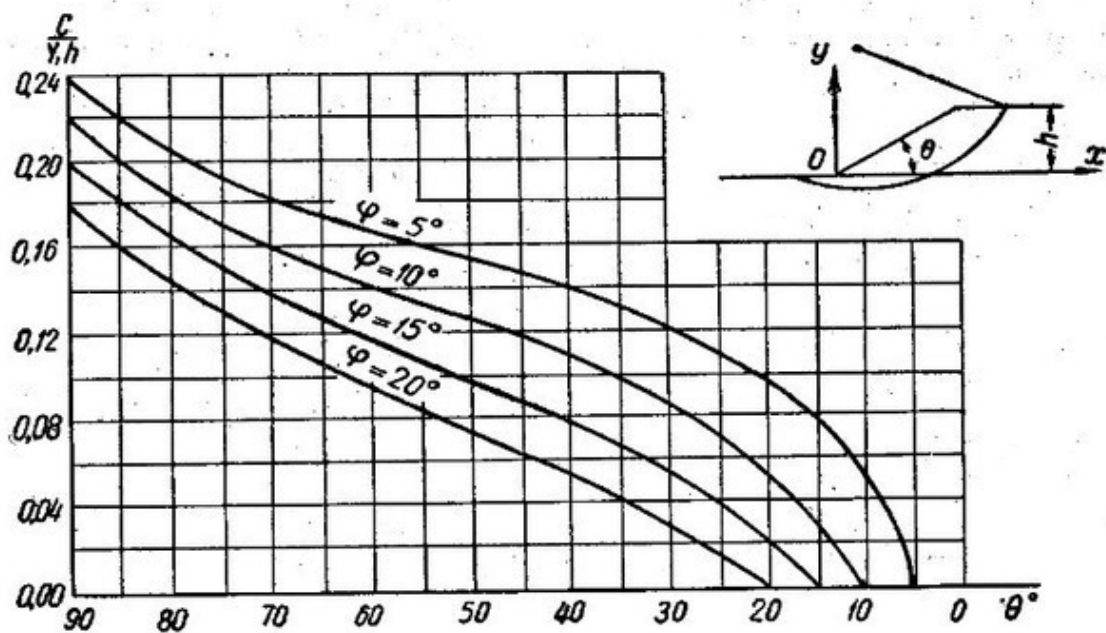


Рис. 6.1. График расчета устойчивости откосов для однородных связных грунтов [2].

Вычисленное значение заложения откоса  $m$  по графику для плотин 1-го и 2-го класса следует увеличить на коэффициент безопасности по СНиП.

3. Как правило, откосы земляной плотины не являются однородными по составу; даже в плотине из однородного грунта часть последнего, лежащая ниже кривой депрессии, имеет иные физические свойства, чем вышележащий сухой грунт: иной объемный вес, иное сцепле-

ние, наличие фильтрационных сил. Кроме того, в большинстве случаев основание плотины может деформироваться вместе с откосами.

Для таких случаев приходится пользоваться при расчете общим методом круговых (цилиндрических) поверхностей скольжения (метод К. Терцаги) [3, 2]. Этот метод сводится к вычислению отношения момента силы веса отсека к моменту сил сцепления относительно произвольно выбранного центра кривой скольжения. По этому отношению определяется коэффициент устойчивости откоса с учетом влияния фильтрационных сил.

Вычисления продолжаются с многократно переносимым центром скольжения, из которых выбирается наиболее опасный центр с минимальным коэффициентом устойчивости.

Расчеты громоздки и требуют много времени для вычисления.

Для проведения расчета необходимо знать фактические величины сцепления, трения, объемного веса участков грунтов, которые определяются лабораторными испытаниями, а также фильтрационных сил, вычисляемых по построенной фильтрационной сетке.

В настоящее время расчет устойчивости выполняется по разработанным программам для ЭВМ. Эти расчеты выполняются специализированными проектными организациями (ОАО «Гидропроект» и др.). Расчетную схему устойчивости приводим ниже. [2].

## **Конец ознакомительного фрагмента.**

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.