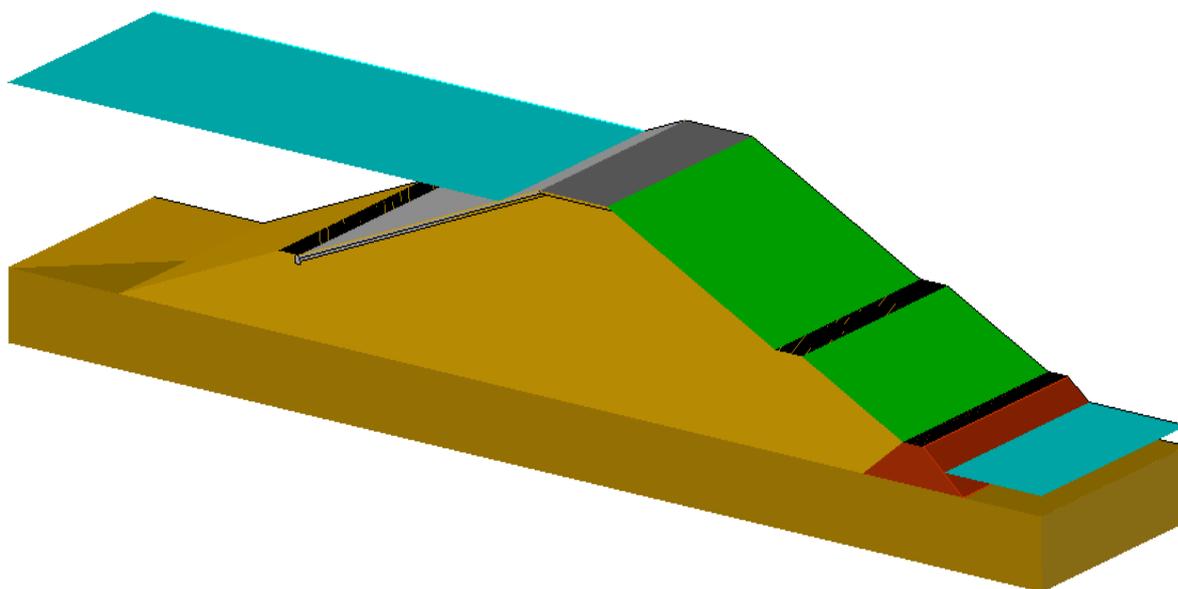

О.Н. Черных, А.Г. Журавлёва, А.В. Бурлаченко, Т.Ю. Жукова

ЗЕМЛЯНЫЕ ПЛОТИНЫ И ДАМБЫ



Москва 2023

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –
МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА

Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства
имени А.Н. Костякова

О.Н. Черных, А.Г. Журавлёва, А.В. Бурлаченко, Т.Ю. Жукова

ЗЕМЛЯНЫЕ ПЛОТИНЫ И ДАМБЫ

Учебное пособие

Под общей редакцией О.Н. Черных

Москва
2023

Учебное пособие посвящено памяти известного учёного и педагога в области гидротехнических сооружений к.т.н., доц. Г.И. Журавлёву

УДК 626.627

ББК 38.37

Ч 45

DOI: 10.26897/978-5-9675-1994-9-2023-207

Рецензенты:

Т.А. Суэтина, д-р техн. наук, проф. зав. кафедрой гидравлики МАДИ ГТУ;

А.О. Щербаков, канд. техн. наук, зав. отделом гидротехники и гидравлики ФГБНУ ВНИИГиМ им.

А.Н. Костякова

Черных, О. Н. Земляные плотины и дамбы: учебное пособие / О. Н. Черных, А. Г. Журавлёва, А. В. Бурлаченко, Т. Ю. Жукова. Под общей редакцией О. Н. Черных ; Российский государственный аграрный университет имени К. А. Тимирязева. – Москва : РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 2023. – 207 с.

ISBN 978-5-9675-1994-9

В учебном пособии изложены сведения по проектированию земляных плотин и дамб из местных материалов небольших сельскохозяйственных гидроузлов АПК и насыпных сооружений мелиоративных систем разного назначения. Содержатся методологические основы конструирования, проектирования и расчётов земляных плотин и дамб с применением ПК. Даны понятия об общих свойствах и характеристиках грунтов для возведения земляных плотин, их эксплуатации. Учебное пособие предназначено для освоения теоретического материала и выполнения курсовых, расчётно-графических и выпускных работ бакалаврами по направлению 20.03.02 Природообустройство и водопользование направленность Управление водными ресурсами и природоохранные гидротехнические сооружения, направления 35.03.11 «Гидромелиорация» направленности «Проектирование и строительство гидромелиоративных систем», «Техника и технология гидромелиоративных работ» ФГОС ВО. Рекомендуются к изданию учебно-методической комиссией Института мелиорации, водного хозяйства и строительства им. А.Н. Костякова, протокол №2 от 18.09.2023 г.

Chernykh, O.N. Earthen dams and dams: textbook / O. N. Chernykh, A. G. Zhuravleva, A. V. Burlachenko, T. Yu. Zhukova. Under the general editorship of O. N. Chernykh; Russian State Agrarian University named after K. A. Timiryazev. - Moscow: RGAU-MSHA named after K. A. Timiryazev, 2023. - 207 p.

The manual provides information on the design of earthen dams and dams from local materials for small agricultural hydroelectric complexes of the agro-industrial complex and bulk structures for reclamation systems for various purposes. The methodological bases of designing, designing and calculations of earth dams with the use of PC are contained. Concepts about the general properties and characteristics of soils for the construction of earthen dams and their operation are given. The textbook is intended for the development of theoretical material and the implementation of coursework, settlement-graphic and final work by bachelors in the direction 20.03.02 Environmental engineering and water use, direction Water resources management and environmental hydraulic structures, direction 35.03.11 "Hydromelioration" of the direction "Design and construction of hydromeliorative systems", "Technique and technology of irrigation and drainage works" of the Federal State Educational Standard of the Higher Education. It is recommended for publication by the educational and methodological commission of the Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction named after. A.N. Kostyakova, protocol No. 2 of September 18, 2023.

© Черных О.Н., Журавлёва А.Г.,
Бурлаченко А.В., Жукова Т.Ю., 2023

© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГРУНТОВЫХ ПЛОТИНАХ И ДАМБАХ.....	10
1.1. Назначение и область применения грунтовых плотин и дамб.....	10
1.2. Классификация грунтовых плотин и дамб.....	19
1.3. Выбор створа земляной плотины.....	39
1.4. Общие вопросы расчётов при проектировании земляных плотин и дамб.....	44
2. ГРУНТЫ ДЛЯ ПЛОТИН И ДАМБ.....	48
2.1. Грунт как строительный материал.....	48
2.2. Общие свойства и строительная классификация грунтов.....	56
2.3. Физико-механические свойства грунтов.....	61
3. ОЦЕНКА ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПЛОТИНУ И ДАМБУ.....	64
3.1. Волновое воздействие на откосы.....	64
3.2. Определение отметки гребня плотины или дамбы над расчетным уровнем воды в верхнем бьефе.....	74
4. ДЕТАЛИ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН И ДАМБ.....	78
4.1. Гребень.....	78
4.2. Откосы и бермы.....	88
4.3. Крепление откосов земляных плотин.....	93
4.4. Дренажи земляных плотин и дамб.....	124
4.5. Противофильтрационные устройства	145
5. ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ РАСЧЁТЫ.....	154

5.1. Расчётные схемы и формулы для фильтрационных расчетов.....	154
5.2. Методы фильтрационных расчётов.....	159
5.3. Цифровизация фильтрационных расчётов.....	161
6. ОСАДКА ПЛОТИН И ДАМБ, УСТОЙЧИВОСТЬ ИХ ОТКОСОВ.....	180
6.1. Стабилизированная осадка основания плотин и осадка во времени.....	180
6.2. Устойчивость откосов земляных плотин и дамб.....	183
7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	195
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	198
Приложение 1. Грунты для плотин и дамб.....	202
Приложение 2. Примеры поперечных сечений земляных плотин.....	204
Приложение 3. Основные типы дренажей земляных плотин.....	205
Приложение 4. Определение отметки гребня земляной плотины на ПК по программе В.И. Волкова в редакторе Excel.....	207

ВВЕДЕНИЕ

Россия богата водными ресурсами: средний ежегодный сток речных вод достигает почти 4500 км³. Среднегодовое возобновляемое водные ресурсы по современным данным оцениваются в 4258,6 км³/год, из которых основная масса сформирована на территории страны, а чуть более 200 – это приток с сопредельных территорий. В указанные величины, естественно, включаются и подземные воды, дренируемые речными системами. На территории России насчитывается свыше 2,5 млн. больших и малых рек, более 2,7 млн. озер, сотни тысяч болот и других объектов водного фонда. Общий объём статических водных ресурсов России оценивается приблизительно в 88,9 тыс. км³ пресной воды, из них значительная часть сосредоточена в подземных водах, озёрах и ледниках. В целом под водой (без болот) занято 72,2 млн. га, из них 27,4 млн. га (38,0%) включены в состав земель водного фонда, остальные земли под водой распределены между другими категориями. Значительная их доля приходится на лесной фонд, земли сельскохозяйственного назначения и земли запаса. Наиболее быстро возобновляются запасы в руслах рек. При этом доля рек России от мирового уровня составляет более 20%, пресноводных озер – около 30%, болот и переувлажнённых территорий – свыше одной четверти. Запасы подземных вод составляют менее 1% мирового объёма. Россия стабильно входит в группу стран мира, наиболее обеспеченных водными ресурсами, как по общим запасам, так и в расчете на 1 жителя [13, 29, 32]. Однако, располагая столь значительными водными ресурсами и используя ежегодно в среднем не более 2% речного стока, Россия в ряде регионов испытывает дефицит в воде, поскольку сток поверхностных вод распределён на территории страны крайне неравномерно. Он больше там, где густота населения меньше. На большинстве рек Европейской части России, Западной и Восточной Сибири, а также Дальнего Востока свыше 2/3 стока проходит за 2...3 месяца весеннего половодья. За последние годы водные проблемы существенно обострились в связи с антропогенными изменениями речного стока и бесхозяйственностью. В наиболее обжитых районах страны не осталось крупных рек, не нарушенных

хозяйственной деятельностью, причем как на водосборах, так и в руслах самих рек. Некоторые исследования показывают, что на подавляющей части России в первой половине XXI века следует ожидать увеличения водных ресурсов примерно на 8...10% и уменьшения их внутригодовой неравномерности.

Неравномерность распределения стока и недостаток воды в тех районах, где потребность её большая, а местные водные источники не обеспечивают дефицит в воде, можно устранить за счёт межбассейновой переброски, что неоднократно планировалось сделать ранее [19, 35], но пока по разным причинам в полной мере сделать не удалось. Неравномерность же распределения поверхностного стока, в том числе и в течение года, надёжно регулируется устройством водохранилищ, часто представляющих естественные понижения местности, которые заполняются водой, когда река имеет большие расходы, и расходуя запасы в маловодный период. Использование воды в рамках РФ, снижение её высокой степени загрязнения, ренатурирование водных объектов, комплексное использование поверхностных и подземных вод, а так же борьба с ущербом, приносимым народному хозяйству из-за разрушительного действия водной стихии (наводнения, паводки, сели, размывы берегов рек и водоёмов, отложения наносов и пр.) осуществляется разными отраслями водного хозяйства: гидроэнергетика; водный транспорт; гидромелиорация; водоснабжение; рыбное хозяйство; природоохранная, морская, подземная и промышленная гидротехника.

В современных условиях водные ресурсы используются только комплексно. Это значит, что одновременно учитываются интересы нескольких отраслей водного хозяйства, с преимуществом одного из них. Такое использование воды даёт экономический эффект. Во всех отраслях водного хозяйства, особенно АПК, большое значение имеют гидротехнические комплексы с гидротехническими сооружениями (ГТС) из местных материалов, ярким представителем которых являются земляные плотины и дамбы. В этой связи в учебном пособии изложены сведения по проектированию земляных плотин и дамб из местных материалов небольших сельскохозяйственных

гидроузлов АПК и насыпных сооружений мелиоративных систем разного назначения. Содержатся методологические основы конструирования, проектирования и расчётов земляных плотин и дамб с применением ПК. Даны понятия об общих свойствах и характеристиках грунтов для их возведения. Представленные в учебном пособии материалы должны позволить сократить риски возникновения чрезвычайных ситуаций на средне- и низконапорных мелиоративных гидроузлах и помочь грамотно провести комиссионные обследования, периодическую инвентаризацию при разработке, составлении и утверждении декларации безопасности ГТС.

Учебное пособие предназначено для студентов направления Природообустройство и водопользование 20.03.02 (уровень бакалавриатуры) и 20.04.02 (уровень магистратуры), изучающих курсы «Гидротехнические сооружения гидроузлов», «Гидротехнические сооружения», «Управление безопасностью гидротехнических сооружений», «Природоохранные гидротехнические сооружения», «Проектирование природоохранных гидротехнических сооружений», «Сооружения инженерной защиты территорий», направления Техносферной безопасности 20.03.01 при изучении курса «Безопасность гидротехнических сооружений», направления 35.04.10 «Гидромелиорация» направленности «Гидротехнические мелиорации», «Технологии и техническое обеспечение в гидромелиорации» ФГОС ВО, а также может быть использовано студентами факультета Гидротехнического, агропромышленного и гражданского строительства, обучающихся по направлению подготовки «Строительство» 08.03.01 (уровень бакалавриатуры) и 08.04.01 (уровень магистратуры) по направлению «Строительство уникальных зданий и сооружений», другими студентами по специальностям мелиоративного и строительного профиля, магистрами, аспирантами и инженерами-гидротехниками.

Настоящее учебное пособие является продолжением комплекта учебных пособий, разработанных в последние годы на кафедре гидротехнических сооружений в контуре решения проблемы «Разработка рациональных

конструкций и методов проектирования, а также безопасности гидротехнических сооружений» с учётом цифровизации расчётов ГТС гидроузлов разного назначения АПК. Оно предназначено для ознакомления обучающихся с основополагающими принципами проектирования и расчётов ГТС. Главными задачами учебного пособия являются помочь:

- лучше понять терминологию, используемую в природоохранной и мелиоративной гидротехнике;
- ознакомиться с основными нормативными документами в области проектирования, строительства, эксплуатации и безопасности ГТС III и IV класса опасности;
- изучить комплекс проблем, связанных с проектированием ГТС АПК;
- освоить методологические основы конструирования, проектирования и расчётов земляных плотин и дамб с применением современных компьютерных программных комплексов;
- разработать проект земляной плотины или дамбы с выполнением расчетного обоснования принимаемых вариантов конструкций при их строительстве, ремонте, реновации или ренатурировании водных объектов в разных ландшафтах АПК.

Теоретические знания, полученные при изучении курса, закрепляются и углубляются при выполнении курсовых и выпускных работ с использованием стандартных компьютерных программ фильтрационного расчёта и современных программных комплексов, базирующихся на численных решениях с применением метода конечных элементов, а также с помощью комплекта программ по проектированию и расчёту элементов ГТС низконапорных гидроузлов, установленного на компьютерах кафедры ГТС РГАУ МСХА имени К.А. Тимирязева.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГРУНТОВЫХ ПЛОТИНАХ И ДАМБАХ

1.1. Назначение и область применения грунтовых плотин и дамб

Согласно мировому регистру плотин в мире построено более 100 тыс. водоподпорных сооружений. Среди них более 80 % составляют грунтовые плотины и дамбы, значительная часть которых относится к средне- и низконапорным ГТС III – IV класса опасности [1 - 4]. Продолжительность эксплуатации этих сооружений составляет 30...50 лет, средний процент износа на данный момент – более 50 %.

Грунтовая плотина/дамба – это ГТС, представляющее собой насыпь в виде трапеции, возводимое из однородных или разнородных по механическому составу местных грунтов (рис. 1.1). *Глухая плотина* способна выдерживать разность напоров верхнего (ВБ) и нижнего бьефов (НБ) без перелива воды через верхнюю часть. Под *грунтом* понимают естественные образования, расположенные в верхнем слое земной коры, образовавшиеся в результате химического и физического выветривания горных пород [8]. Дамбы, которые возводят, как правило, из местных грунтов и материалов имеют устройство аналогичное грунтовой плотине (рис. 1.2) [7, 9, 11, 13, 35].

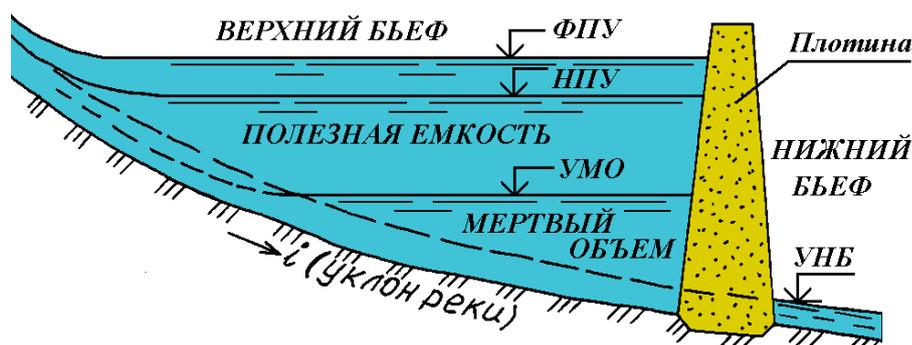


Рис. 1.1. Схема создания грунтовой плотиной водохранилища с основными расчётными уровнями

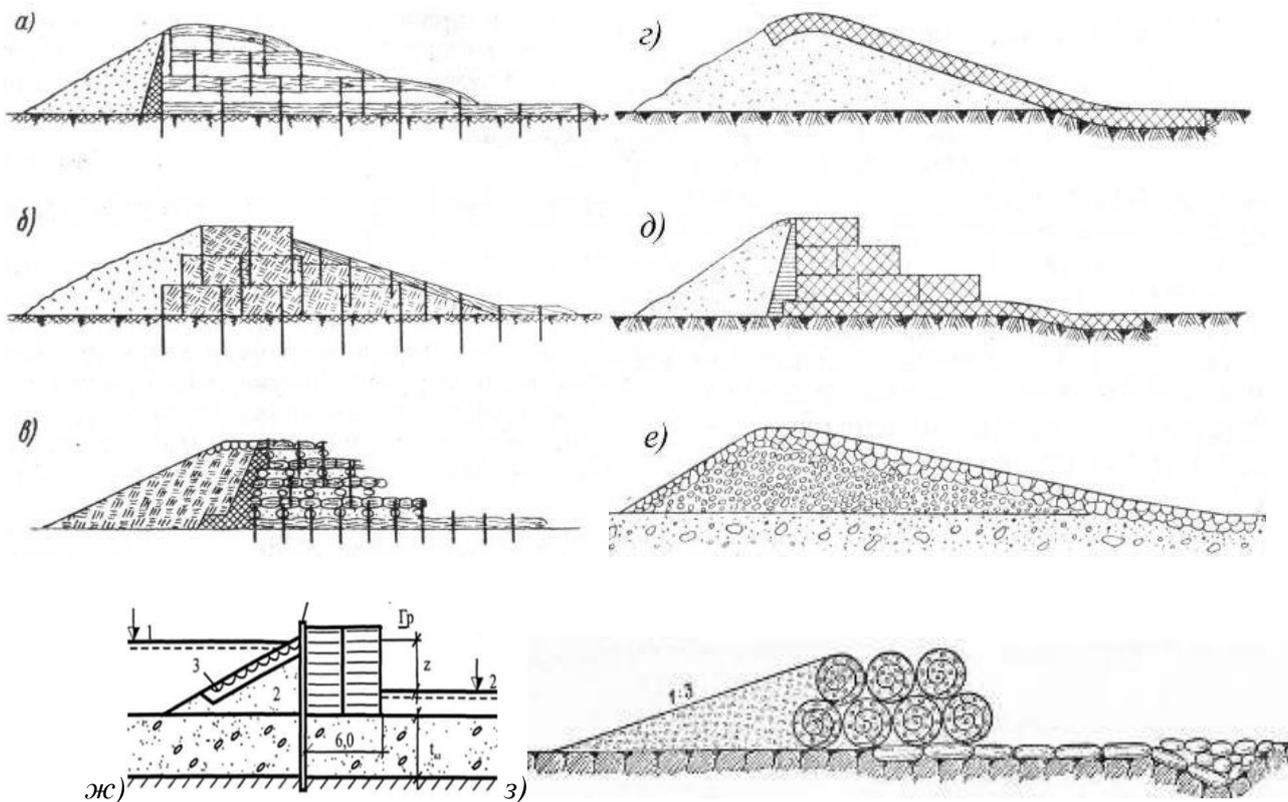


Рис. 1.2. Схемы простейших типов плотин из местных материалов: а – каменно-хворостяная; б – плетневая; в – фашинная; г – из суглинка со стороны верхнего бьефа и габионного тюфяка, заполненного мелкой и средней галькой со стороны нижнего; д – из габионного тюфяка и кладки над ним из габионных ящиков; е – каменно-набросная; ж – ряжевая; з – из карабурной кладки

Ранее было принято условно делить плотины, входящие в состав гидротехнического узла сооружений, на водоподъёмные и водохранилищные, хотя практически любая плотина создаёт водохранилище. **Водоподъёмная плотина** в гидроузле составляет часть напорного фронта и служит для поддержания заданного расчётного уровня, при котором обеспечивается то или иное использование водотока (для подачи воды в ирригационные системы, увеличения глубин в судоходных целях, рыборазведения, в энергетических целях и пр.). Характерная особенность таких плотин – их работа при мало колеблющихся уровнях воды в ВБ и, как правило, при отсутствии в поперечном профиле и основании противофильтрационных устройств. Поскольку в подавляющем большинстве случаев вода из ВБ сбрасывается в НБ через

бетонную водосбросную плотину, входящую в напорный фронт, то потеря воды на фильтрацию через земляную плотину не имеет особого значения.

Водохранилищные плотины служат для образования водохранилищ, в которых происходит накопление воды в период её избытка с последующим расходом, когда ощущается её недостаток (рис. 1.3, 1.4), т.е. за счёт создания водохранилища производится регулирование речного стока, неравномерно распределённого во времени. Поэтому потери воды, в том числе и потери на фильтрацию через тело и основание плотины, должны быть сведены к минимуму. Это обстоятельство определяет и тип таких плотин, в которых устраиваются различные противофильтрационные преграды и предусматриваются инженерные мероприятия по уменьшению потерь через ложе водоёма.

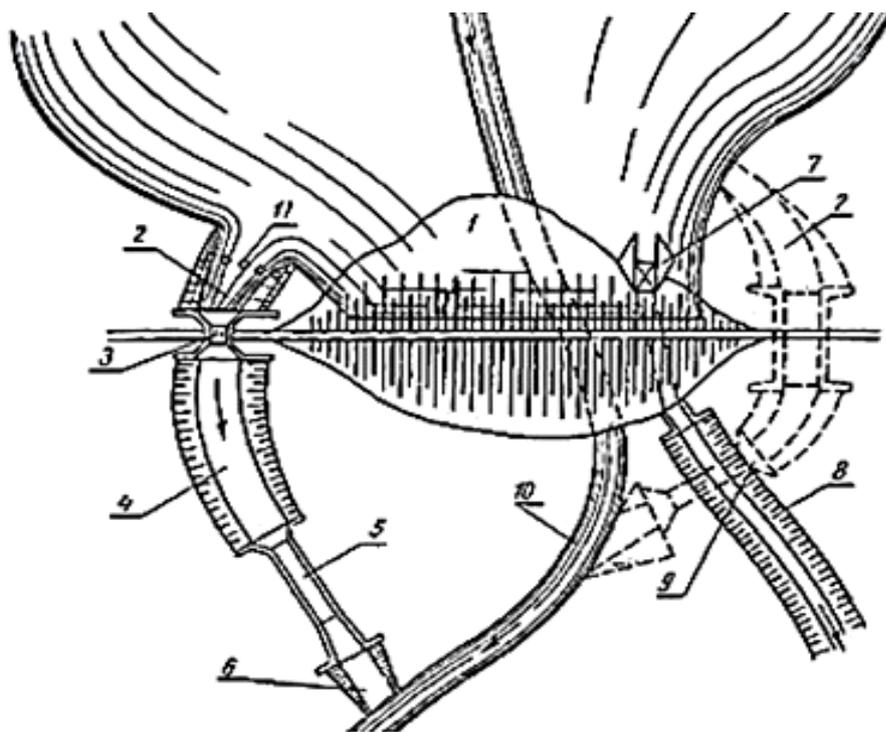


Рис. 1.3. **Водохранилищный узел сооружений [9]:** 1 – земляная плотина; 2 – подводящий канал; 3 – шлюз-регулятор; 4 – сбросной канал; 5 – сопрягающее сооружение; 6 – отводящий канал; 7 – водозаборное сооружение; 8 – магистральный канал; 9 – водопроводящее сооружение; 10 – русло водотока; 11 – ледозадерживающие устройства

К инженерно-техническим мероприятиям по защите земель от затопления относится устройство противопаводковых водохранилищ, которые позволяют частично или полностью снять опасность затопления земель, но приводят к дополнительному затоплению в пределах водохранилища (рис. 1.4). Существует два вида противопаводковых накопителей: водохранилище регулируемого типа (имеются затворы, которые закрываются, когда ниже по течению от них интенсивность паводка достигает критического уровня, а когда наводнение там прекращается, они вновь открываются); водохранилище автоматического удержания паводкового сброса (на выходе из водохранилища автоматического удержания паводка устраиваются водосбросные сооружения, которые достаточны для пропуска нормального расхода, но избыточный поток не пропускают). При паводке поток на выходе такого водохранилища постоянен, а в остальное время он меньше и зависит от притока воды.

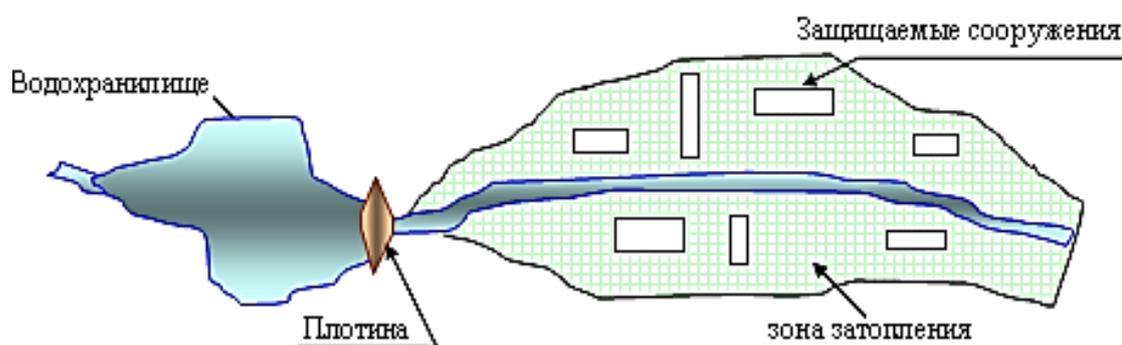


Рис. 1.4. Схема устройства противопаводкового водохранилища с земляной плотиной для защиты прибрежной территории от затопления

Обычно в состав типового водохранилищного гидроузла АПК входит следующий комплекс гидротехнических сооружений (ГТС): земляная/бетонная плотина/дамба, водосбросное сооружение, водозаборное сооружение, водопропускные лесо- и судопропускные сооружения, мосты, дороги, а в некоторых случаях ГЭС, очистные сооружения, ГТС рыбохозяйственной гидротехники (рис. 1.5) [36].

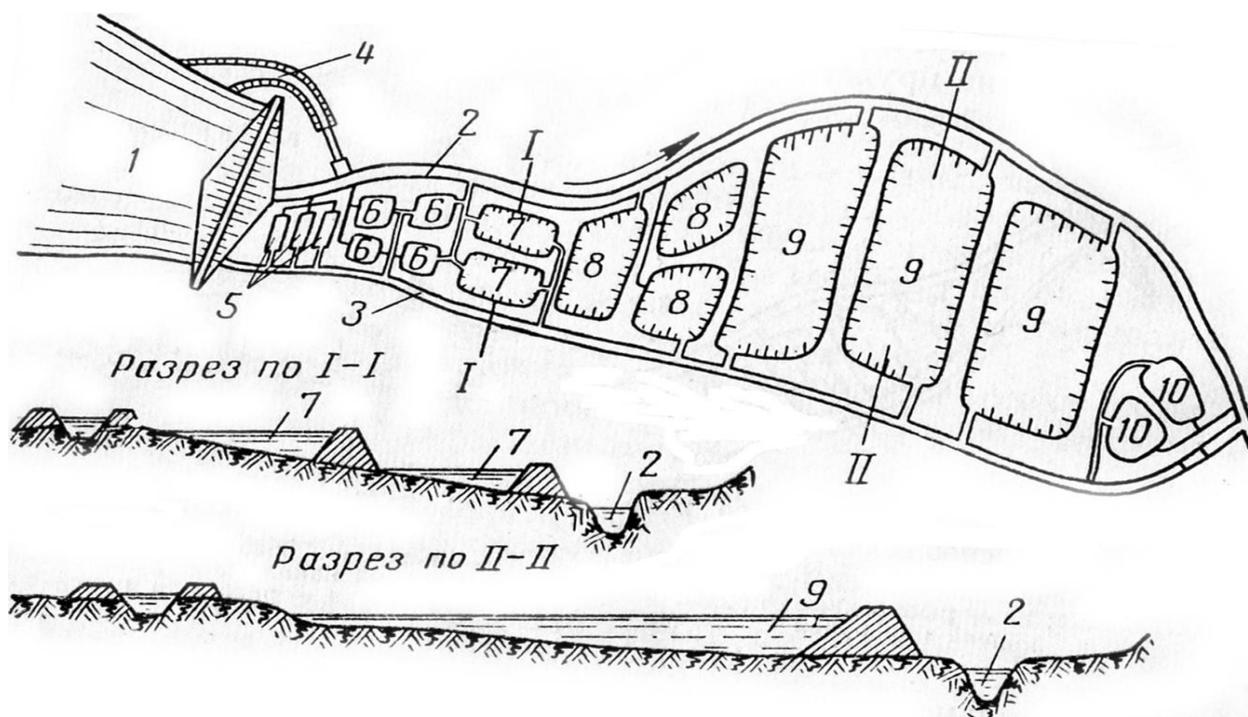


Рис. 1.5. Компоновочная схема типового рыбхоза [16, 36]: 1 – головной пруд с земляной плотиной; 2 – река; 3 – магистральный канал; 4 – открытый водосброс при плотине; 5, 6, 7, 8, 9, 10 – соответственно, зимовальные, нерестовые, летние маточные, выростные, нагульные, карантинные пруды с ограждающими дамбами

Земляные дамбы, валы и валики широко используются как оградительные для защиты территорий от затопления на польдерных системах (Полесский и Славский районы Калининградской области, Курземе в Латвии, озёра Кугурлуй и Котлабух близ Одессы на Украине, по берегам Северного моря в Нидерландах, Дании, Германии и пр.) (рис. 1.6, 1.7) и при лиманном орошении (Заволжье, Северный Кавказ, Калмыкия, степные районы Сибири и др.) (рис. 1.8, 1.9).

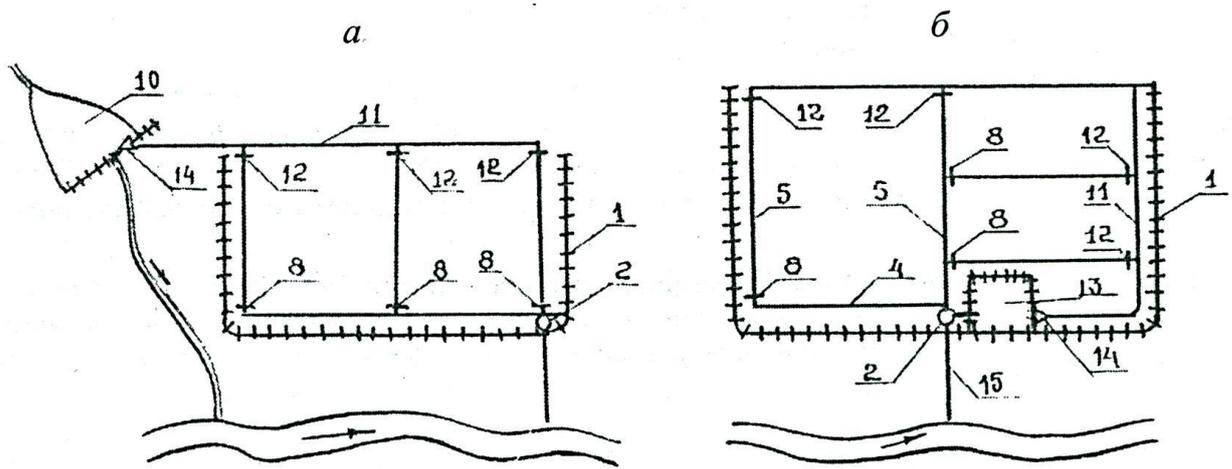


Рис. 1.6. Схемы польдерных систем: а – осушительно-увлажнительный польдер с русловым водохранилищем на водотоке; б – водооборотная польдерная осушительно-увлажнительная система; 1 – оградительная дамба незатапливаемого польдера; 2 – насосная станция; 3 – дюкер; 4 – магистральный канал; 5 – проводящий канал (коллектор); 6 – регулирующая сеть; 7 – регулирующий резервуар; 8 – подпорное сооружение; 9 – нагорно-ловчий канал; 10 – русловое водохранилище; 11 – водоподводящий канал; 12 – водовпускное сооружение; 13 – наливное водохранилище; 14 – водовыпуск; 15 – водосбросной канал

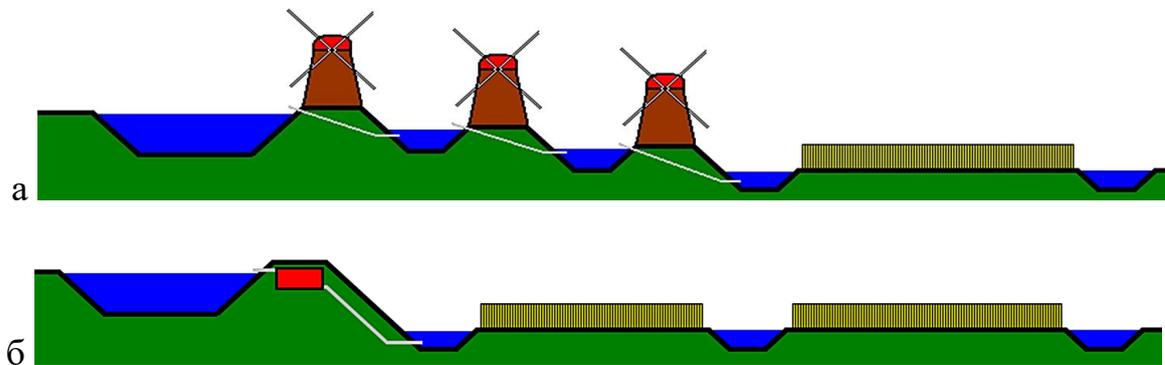


Рис. 1.7. Продольный разрез по польдерам с разными системами откачки воды: а – с ветряными мельницами; б – с насосами

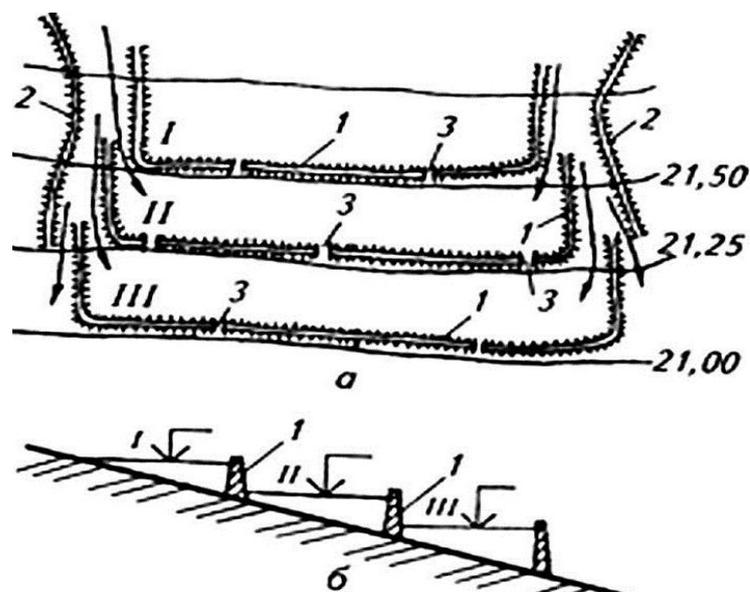


Рис. 1.8. План участка лиманного орошения (а) и разрез по ярусам лиманов (б): 1 и 2 – ограждающие и направляющие валы; 3 – водовыпускные сооружения; I...III – лиманы соответственно 1...3 ярусов

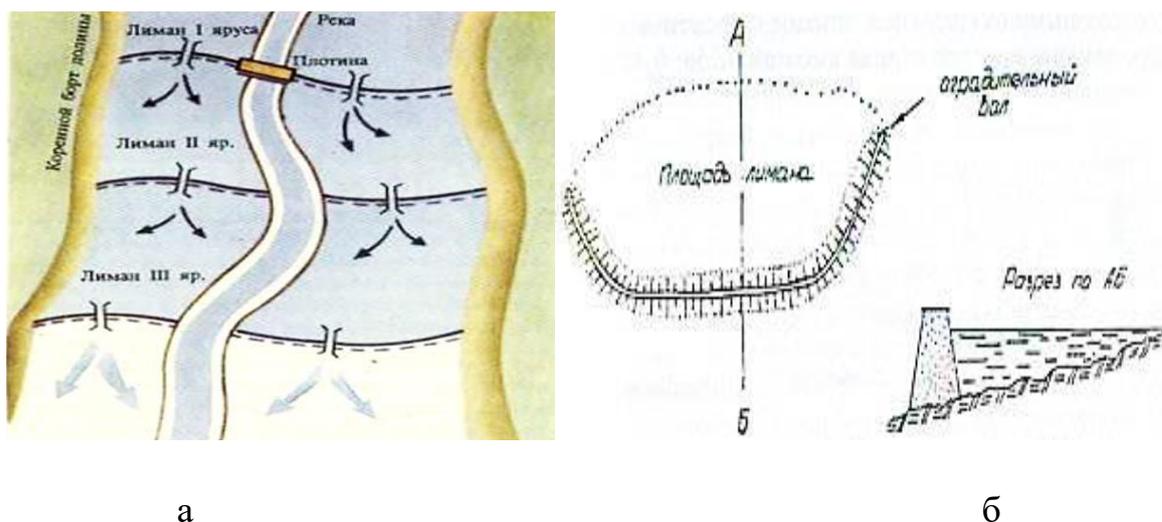


Рис. 1.9. Использование ГТС (дамб, перемычек, ограждающих и направляющих валов) при лиманном орошении: а – план участка многоярусного лимана; б – план и разрез одноярусного лимана

Водохранилище с берегозащитными или берегоукрепительными сооружениями может быть сезонного или многолетнего регулирования. В отдельные многоводные годы, когда объём воды, поступающий в водохранилище при весеннем снеготаянии или ливнях, оказывается больше ёмкости чаши водохранилища, изменении класса гидроузла или при вероятной

гидрологической аварии, излишек воды сбрасывается в НБ через специально устроенный для этого резервный водосброс (рис. 1.11) [18, 32].

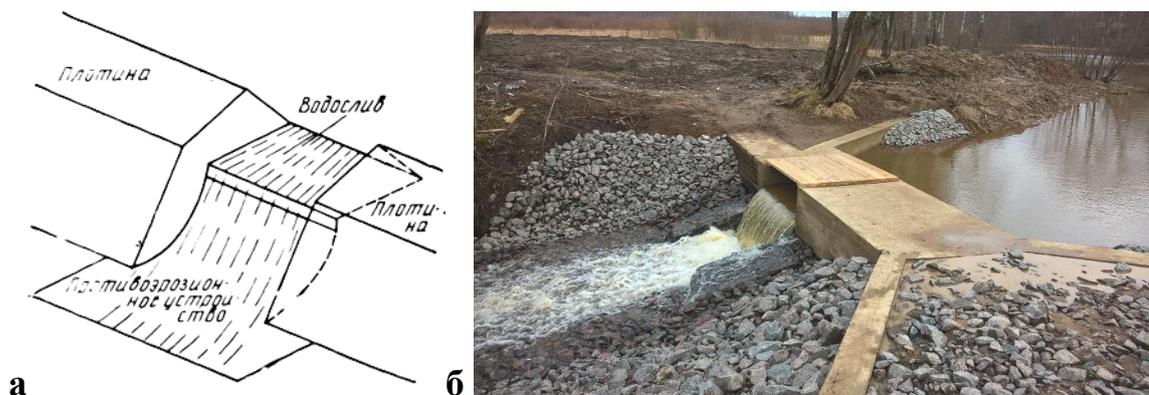


Рис. 1.11. Земляная плотина на запруженном малом водотоке с нерегулируемым водосбросом: а – принципиальная схема; б – с водосбросом из дерева

Путь, по которому сбрасывается вода из ВБ, называется водосбросным/транзитным трактом. На нём могут быть размещены (рис. 1.12): подводящий канал, ледозадерживающее устройство, шлюз-регулятор, сбросной канал, сопрягающее сооружение, отводящий канал.

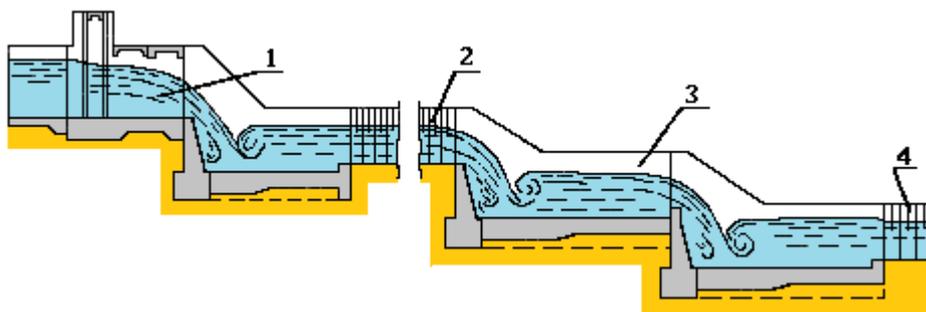


Рис. 1.12. Продольный разрез по возможному водосбросному тракту [9]: 1 – шлюз-регулятор; 2 – сбросной канал; 3 – сопрягающее сооружение – перепад; 4 – отводящий канал

Для подачи воды из водохранилища к месту потребления устраивают водозаборное сооружение. Чаще всего это трубы из металла, железобетона или даже пластика с устройством для регулирования пропуска воды (рис. 1.13). Для малых водоёмов это ГТС с трубой, уложенной в основании плотин и затвором в конце (рис. 1.13а). Для более высоких плотин берут трубы большого сечения

(чтобы во время эксплуатации по ним мог пройти человек), а режим потока в них делают безнапорным [19, 21]. Во входной части такого водозабора устраивают башню (рис. 1.13б), которая служит для размещения затворов и регулирования подачи воды потребителю. Когда обеспечить устойчивость башни из-за её высоты трудно, переходят к безбашенному типу водозабора (рис. 1.13в). Затворы в этом типе ГТС размещают в специальной камере, примыкающей к верховому оголовку. Если водозаборное сооружение и водосбросной тракт размещены на одном берегу, в месте их пересечения устраивают водопроводящее ГТС – акведук или дюкер [26, 34]. Такой вариант оказан на рисунке 1.3 пунктиром.

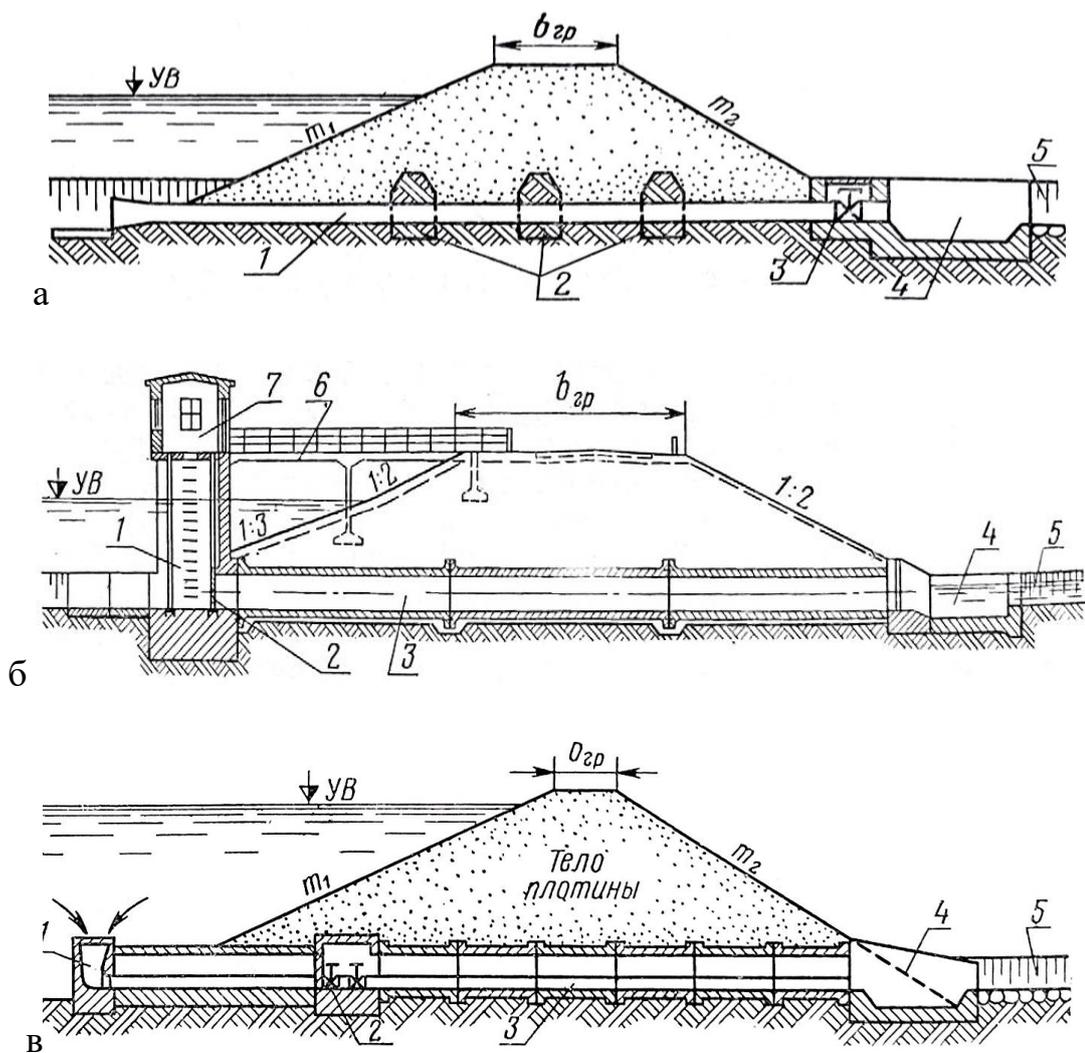


Рис. 1.13. Водозаборные сооружения в водохранилищном узле [9]: а – по типу напорной трубы; б – башенный водозабор; в – безбашенный водозабор

Водоспускные сооружения служат для полного опорожнения водохранилища, а в некоторых случаях одновременно и для пропуска воды в НБ. Водоспуски представляют собой трубы, уложенные в основании плотины и наиболее пониженных точках створа. Регулирование расходов, пропускаемых через трубы, производят затворами или задвижками, устанавливаемыми обычно со стороны НБ.

1.2. Классификация грунтовых плотин и дамб

1.2.1. Грунтовые плотины

Плотины, способные выдержать разность напоров ВБ и НБ, строят для задерживания и подъема уровня воды обычно путем перегораживания русла рек, оврагов и балок. Они способны выдержать разность напоров ВБ и НБ. **Грунтовые плотины и дамбы** возводят как из естественных (глинистые, песчаные, крупнообломочные) так и искусственных (грунты природного происхождения, закреплённые и уплотнённые различными методами, смеси естественных грунтов, твёрдые отходы промышленной и хозяйственной деятельности) грунтов. Их классифицируют по способу возведения, конструкции поперечного профиля, противofильтрационных устройств (ПФУ) в теле и основании, высоте и классу опасности. По способу возведения грунтовые плотины могут быть: *насыпные*, грунты с *искусственным уплотнением*; *насыпные*, грунты без *искусственного уплотнения*, с отсыпкой грунта в воду; *насыпные*, образованные *при помощи направленного взрыва*; *намывные*, возводимые с помощью средств гидромеханизации комбинированными методами – наиболее востребованные в настоящее время.

По материалу тела грунтовые плотины бывают *однородные* (возводимые из одного материала, например, только суглинка) и *неоднородные*. При рассмотрении альтернативных вариантов при проектировании чаще всего отдают предпочтение однородным плотинам, что для невысоких плотин не редко является экономически оправданным при минимизации технологий

строительства. По виду материала различают три основных типа грунтовых плотин: **земляные** – в основном из песчаных и глинистых грунтов (более 50% объёма тела плотины) (рис. 1.14); **каменно-земляные**, одна часть поперечного профиля которых выполнена из крупнообломочных, другая – ПФУ из мелкопесчаных или глинистых грунтов (рис. 1.14в, 1.15); **каменно-набросные** – возводимые из крупнообломочных грунтов с ПФУ (если оно требуется) из негрунтовых материалов (рис. 1.16). В СП 39.13330 [5] вычленяют **земляные насыпные** плотины из грунтов от глинистых до гравийно-галечниковых, отсыпаемых насухо с уплотнением или в воду, и **земляные намывные** из грунтов от глинистых до песчано-гравийных и гравийно-галечниковых, намываемых средствами гидромеханизации. По высоте ($H_{пл}$) земляные плотины делятся на низкие ($H_{пл} \leq 15$ м), средние ($15 \text{ м} \leq H_{пл} \leq 50$ м) и высокие $H_{пл} \geq 50$ м), а каменно-земляные и каменно-набросные – на низкие ($H_{пл} \leq 30$ м), средние ($30 \text{ м} \leq H_{пл} \leq 100$ м), высокие ($100 \text{ м} \leq H_{пл} \leq 150$ м) и сверхвысокие ($H_{пл} \geq 150$ м) [24].

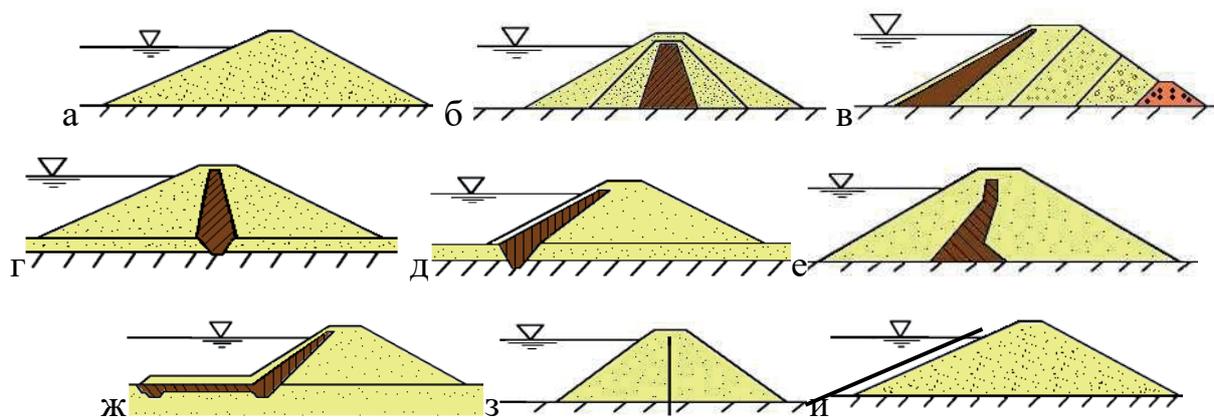


Рис. 1.14. Схемы основных типов земляных плотин [24]: а – из однородного грунта; б – из неоднородного грунта с центральной противофильтрационной призмой; в – из неоднородных грунтов с верховой противофильтрационной призмой; г – с ядром из грунтовых материалов; д – с экраном из грунтовых материалов; е – наклонным ядром; ж – с экраном и понуром; з - с диафрагмой; и – с экраном из негрунтовых материалов

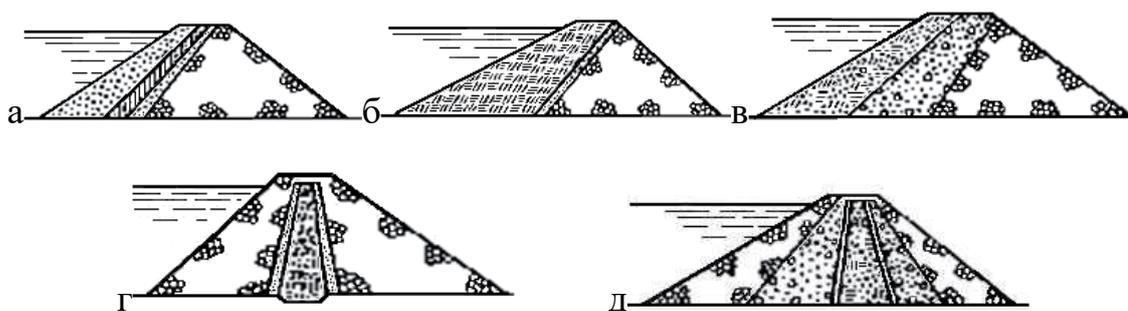


Рис. 1.15. Основные виды каменно-насыпных плотин: а – с земляным экраном; б – отсыпка из малопроницаемого грунта на призме из каменной наброски; в – на слое более проницаемого материала; г – с центральным ядром из глины, суглинка или глинобетона; д - с обсыпкой более проницаемым материалом

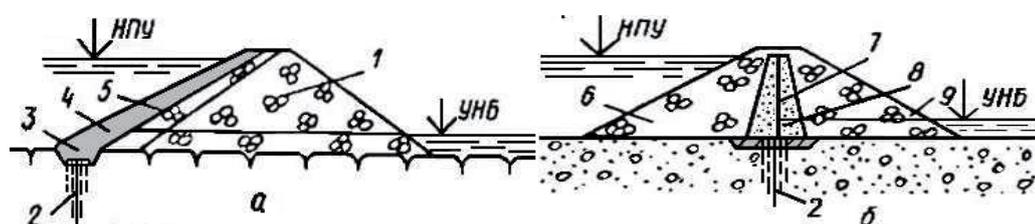


Рис. 1.16. Основные типы современных каменно-набросных плотин [13, 24, 25]: а – с экраном; б – с диафрагмой; 1 – тело плотины; 2 – цементационная завеса в основании; 3 – бетонный зуб; 4 – экран из негрунтовых материалов (асфальтобетон, сталь, дерево, синтетические плёнки); 5 – уплотненная насыпь или подэкрановая кладка; 6 – верховая призма; 7 – диафрагма; 8 – переходные зоны; 9 – низовая призма

По конструкции (ПФУ) в основании различают следующие виды плотин:

- плотины, в основании которых залегает водопроницаемый слой сравнительно небольшой мощности, прорезаемый зубом из грунтового малопроницаемого материала (рис. 1.17а). Наличие такого зуба исключает фильтрацию воды по водопроницаемому слою основания, и плотина рассматривается как на водонепроницаемом основании. Если тело плотины сложено из водопроницаемых грунтов, устраивают ядро или экран, продолжением которых служит зуб;

- плотины с основанием из водопроницаемого слоя, перерезаемого диафрагмой из жестких малопроницаемых материалов (рис. 1.17б). Применяются, когда мощность водопроницаемого слоя ограничена и условия строительного производства позволяют его прорезать;

- плотины с инъекционной завесой, входящей в водоупорную толщу (рис. 1.17в). Такие ПФУ применимы при ограниченной глубине залегания водоупора, если грунтовые условия не позволяют применить диафрагму или зуб. При проницаемых грунтах тела плотины выше завесы может быть устроена противоточная преграда в виде ядра, диафрагмы или экрана;

- плотины с инъекционной завесой, не доходящей до водоупора (рис. 1.17г). Применяют при большой мощности, водопроницаемого слоя преимущественно для скальных оснований;

- плотины с экраном и понуром из грунтовых малопроницаемых материалов (рис. 1.17д). Водопроницаемая толща здесь не прерывается, фильтрационный поток в основании плотины остается, но происходит снижение кривой депрессии в теле плотины и уменьшается фильтрационный расход. Применяют такие плотины, когда тело плотины проницаемо, а основание сложено из песчаных или гравелистых грунтов сравнительно большой мощности.

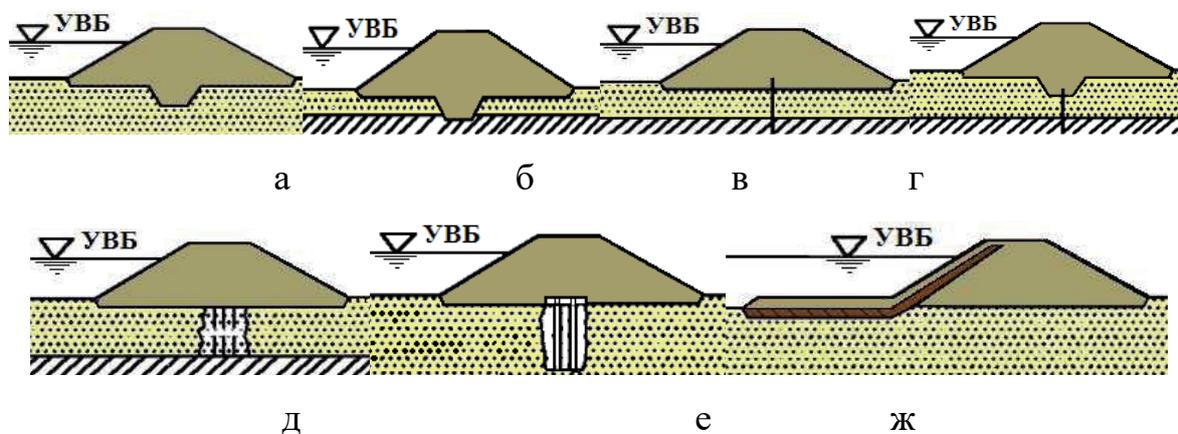


Рис. 1.17. Схемы сопряжения земляных плотин с основанием и ПФУ

[24]: а – зуб; б – замок; в – диафрагма (шпунтовая стенка); г – шпунтовая стенка в сочетании с зубом; д – инъекционная завеса; е - висячая инъекционная завеса; ж - понур

Земляные плотины (рис. 1.18) получили широкое распространение особенно в сельскохозяйственном строительстве, поскольку обладают следующими преимуществами:

- возведение их возможно в любых географических районах, независимо от климатических и грунтовых условий, а в сейсмических зонах они даже надёжнее прочих плотин;

- для возведения земляных плотин пригодны любые местные грунты, находящиеся непосредственно на месте строительства;

- затраты на материал сводятся только к перемещению, укладке и уплотнению его;

- стоимость строительных работ, земляных плотин, как правило, ниже стоимости плотин из других материалов, при этом большинство работ механизировано и потребность в неквалифицированной рабочей силе сведена к минимуму;

- земляные плотины могут быть практически любой высоты;

- материал тела плотины не теряет своих свойств, а прочность земляного ГТС со временем возрастает;

- в процессе эксплуатации земляные плотины не требуют затрат на текущий, а тем более капитальный ремонт, исключая затраты на поддержание в рабочем состоянии покрытия откосов гребня и пр.;

- земляные плотины и дамбы можно неограниченно наращивать по высоте [17, 32], причём без выключения из работы водохранилища при старом контуре плотины.

Недостатком земляных плотин можно считать невозможность сброса паводковых расходов непосредственно через плотину, но это устраняется путём устройства водосбросного тракта резервного водосброса (рис. 1.19) [32].

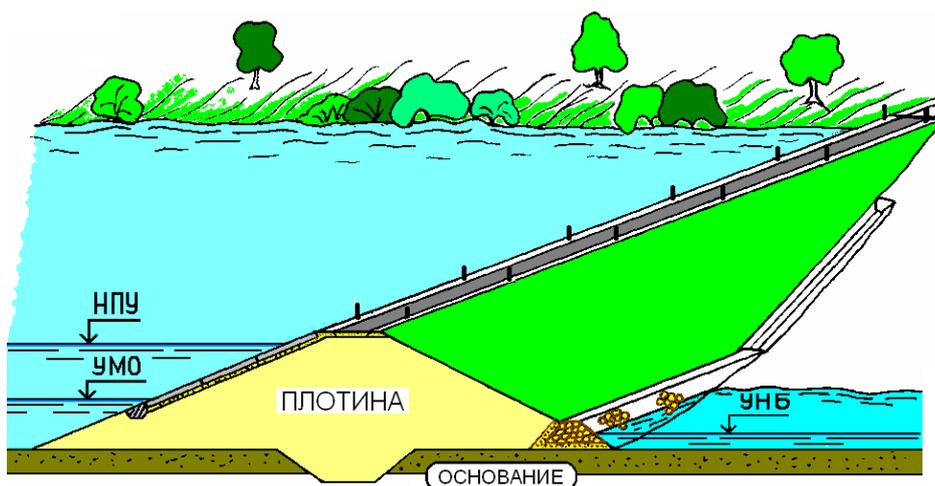


Рис. 1.18. Земляная однородная плотина

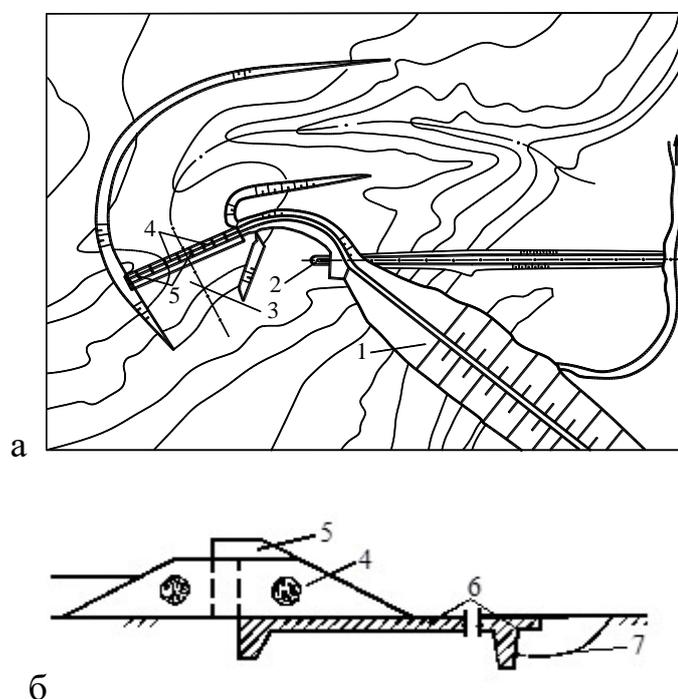


Рис. 1.19. Схема гидроузла Бокс-Бьют (США) с основным ковшовым бетонным водосбросом и с резервным водосбросом типа размываемая («плавкая») вставка [32]: а – план; б – продольный разрез по размываемой вставке; 1 – грунтовая русловая плотина; 2 – основной водосброс; 3 – подводящий канал; 4 – размываемые вставки; 5 – отдельные быки; 6 – бетонный флютбет (ограничитель размыва) под размываемой вставкой; 7 – граница размыва

Классификация водоподпорного ГТС и гидроузла в целом производится комплексно по [4] в зависимости от высоты подпорного ГТС, типа грунта его

основания, назначения и условий эксплуатации, максимального напора на порпорное сооружение и последствий возможных гидродинамических аварий и аварийных ситуаций в зоне территории водохранилища и нижнего бьефа.

Плотины из грунтовых материалов делят в соответствии с СП 39.13330.2012. [4] в зависимости от высоты плотины $H_{пл}$ и типа основания на четыре класса (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Классы ГТС в зависимости от их высоты и типа грунтов оснований [4]

Гидротехническое сооружение	Тип грунта основания	Высота ГТС, м			
		I класс-чрезвычайно высокой опасности	II класс – высокой опасности	III класс-средней опасности	IV класс-низкой опасности
Плотины из грунтовых материалов	А	более 80	от 50 до 80	от 20 до 50	менее 20
	Б	более 65	от 35 до 65	от 15 до 35	менее 15
	В	более 50	от 25 до 50	от 15 до 25	менее 15

Примечания: 1. Грунты подразделяются на: А – скальные; Б – песчаные, крупнообломочные и глинистые в твердом и полутвердом состоянии; В – глинистые водонасыщенные в пластичном состоянии. 2. Высота ГТС и оценка его основания определяются по данным проектной документации.

Высота плотины устанавливается по формуле:

$$H_{пл} = \nabla_{Гр} - \nabla_{дна}, \quad (1.1)$$

где $\nabla_{Гр}$ – отметка гребня плотины, $\nabla_{дна}$ – наименьшая отметка дна реки в выбранном створе.

Наиболее полно особенности земляных плотин и дамб проявляются в случае, когда они входят в состав водохранилищного мелиоративного узла, поэтому в дальнейшем при расчёте и конструировании будет сделан упор на этот случай. Противопаводковые плотины, дамбы обвалования населенных пунктов и промышленных объектов, месторождений полезных ископаемых и горных выработок надлежит проектировать в соответствии с требованиями СП

58.13330 [3], а сельскохозяйственных земель — СП 100.13330 [30]. Проектирование дамб обвалования следует производить в соответствии с требованиями СП 39.13330 [4].

В настоящее время в практике строительства грунтовых водонапорных сооружений и насыпей достаточно широко применяют армирование, где грунтовое сооружение представляет насыпь из композитного материала - послойно укатываемого грунта, армированного каким-либо плотным видом арматуры (металлические полосы или сетки; синтетические полотна или сетка; геотекстиль; стекловолокно; материалы типа «тесоль» (мелкие куски полиэтилена, перемешанные с грунтом и т.п.) (рис. 1.20) [18, 19, 21, 26].

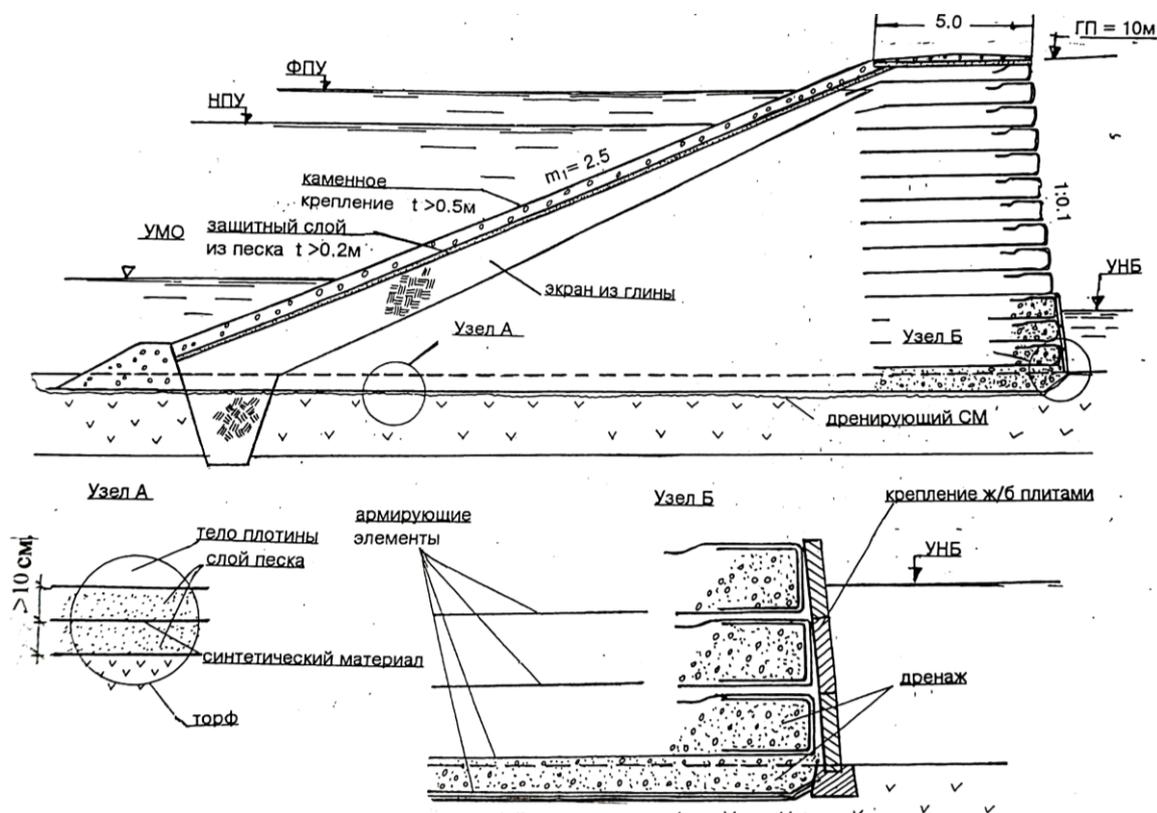


Рис. 1.20. Земляная насыпная переливная плотина из армированного грунта высотой до 10 м, ТП В/О Союзводпроект, 1987 г.

Металлическая арматура должна иметь антикоррозийное покрытие в виде цинкования напылением или гальваническим способом, покрытия из эпоксидных или каменноугольных слоёв, нанесением полимерного порошка с последующим оплавлением. Длина запуска арматуры в грунте должна

составлять: для ГТС высотой до 6 м не менее 5 м, а высотой более 6 м – 0,7...0,8 от высоты сооружения (рис. 1.20).

1.2.2. Особенности грунтовых дамб

Различают *дамбы напорные* и *безнапорные* [35]. **Напорные** дамбы сооружают для защиты речных и морских прибрежных низменностей от затопления и подтопления (*дамбы обвалования*); защиты акватории портов, подводных каналов к шлюзам и других сооружений от волн, ледохода и прочих вредных воздействий (*защитные дамбы*); для сопряжения напорных ГТС гидроузлов с берегами (*сопрягающие*); ограждения места строительства (*перемычки*). Земляную дамбу обвалования часто называют **валом** – земляная, уплотнённая насыпь [35]. Обычно его высота не превышает 1...3 м. Помимо местного грунта при строительстве регулирующих и защитных дамб используют камень (рис. 1.21), каркасно-каменные конструкции, фашинную кладку.

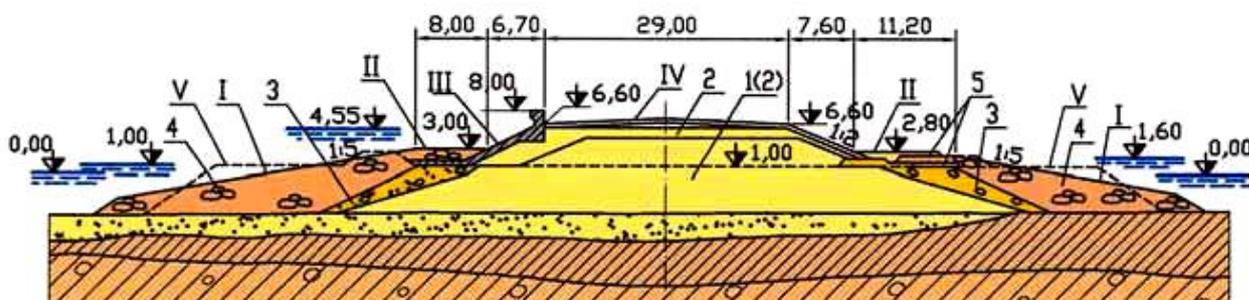


Рис. 1.21. Поперечный профиль каменно-земляной защитной дамбы Санкт-Петербурга от наводнений: I – пологий динамически устойчивый откос; II – волногасящая берма; III – железобетонные плиты крепления верхового откоса; IV – железобетонная волноотбойная стенка; V – поперечный профиль первоочередной отсыпки скального грунта; 1 – мореный суглинок полезных выемок; 2 – песчаный грунт; 3 –

переходной слой из песчано-гравийного грунта; 4 – горная масса; 5 – щебень

Безнапорные дамбы возводят для регулирования русловой деятельности в нужном направлении, для регулирования и выправления русел (регулирующие) (рис. 1.22); уменьшения поверхности стока и задержания частиц почвы, сносимой в результате ливневого стока (*почвозащитные*); для улучшения

условий судоходства и работы водопропускных и водозаборных ГТС (ГЭС, водосливных плотин, отверстий мостов, насосных и т.д.); ограничения растекания гидросмеси за пределы намываемого участка (*обвалование*); для прокладки дорог через поймы рек и заливы водохранилищ (*транспортные*).

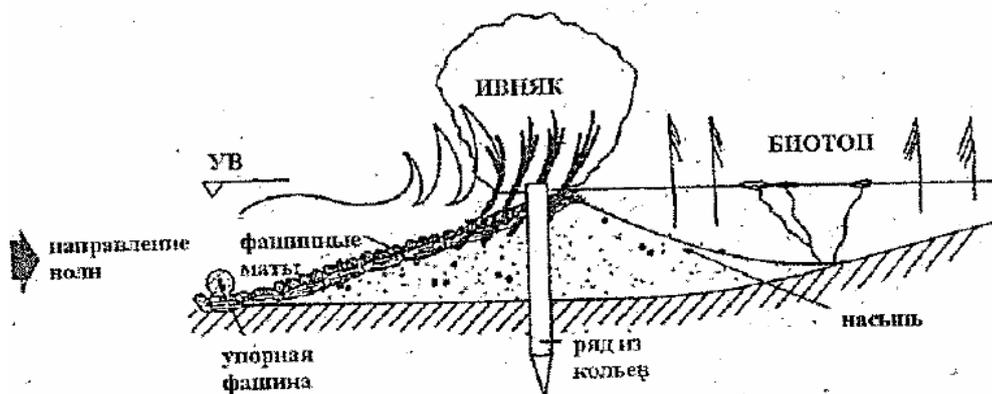


Рис. 1.22. «Живая» продольная дамба из местных материалов для ренатурирования малых рек [23]

Дамбы могут быть *затопляемые* и *незатопляемые*. Незатопляемые дамбы следует применять для постоянной защиты от затопления городских и промышленных территорий, прилегающих к водохранилищам, рекам и другим водным объектам. Для мероприятий по инженерной защите (рис. 1.23) в качестве характерных типов ГТС повсеместно применяются дамбы обвалования разных конструкций.

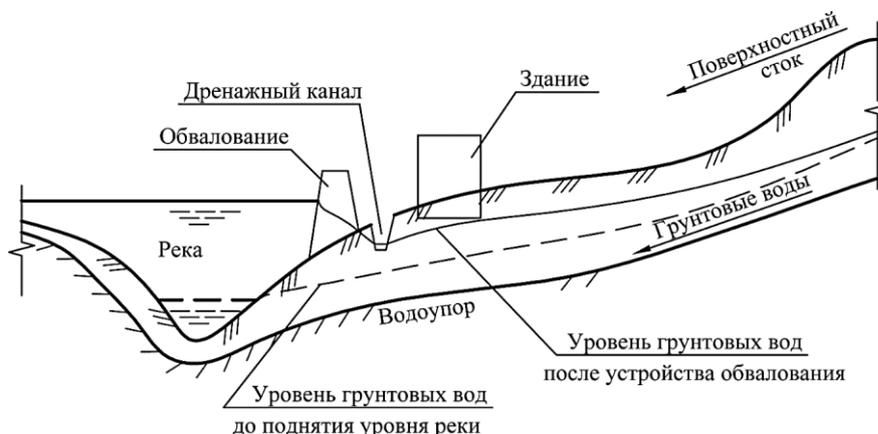


Рис. 1.23. Принципиальная схема обвалования при инженерной защите территории [37]

Затопляемые дамбы допускается применять для временной защиты от затопления сельскохозяйственных земель в период выращивания на них сельскохозяйственных культур при поддержании в водохранилище НПУ, для формирования и стабилизации русел и берегов рек, регулирования и перераспределения водных потоков и поверхностного стока (рис. 1.24). В зависимости от направления потока их подразделяют на продольные и поперечные.

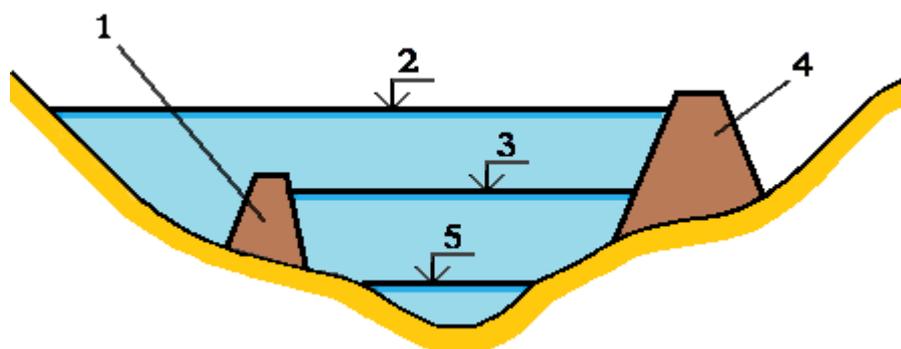


Рис. 1.24. Дамбы обвалования в пойме реки [35]: 1 – затопляемая дамба; 2 – расчётный весенне-паводковый уровень воды; 3 – расчётный летний уровень воды; 4 – незатопляемая дамба; 5 – меженный уровень воды

На меандрирующих реках в качестве средств инженерной защиты территории от затопления предусматривают руслорегулирующие сооружения (табл. 1.2): продольные дамбы, располагаемые по течению или под углом к нему и ограничивающие ширину водного потока реки; струенаправляющие дамбы — продольные, прямолинейные или криволинейные, обеспечивающие плавный подход потока к водопропускным отверстиям моста, плотины, водоприемника и другим ГТС; затопляемые запруды, перекрывающие русло от берега до берега, предназначенные для полного или частичного перекрытия течения воды по рукавам и протокам; полузапруды — поперечные выправительные сооружения русла, обеспечивающие выправление течения и создание судоходных глубин.

Классы защитных водоподпорных сооружений по СП 104.13330.2016

Наименование и характеристика территорий	Максимальный расчетный напор воды на водоподпорное сооружение, м для классов защитных сооружений			
	I	II	III	IV
Селитебные				
Плотность жилого фонда территории района, м ² на 1 га:				
Св. 2500	*	До 5	До 3	-
От 2100 до 2500	*	»8	»5	До 2
»1800 » 2100	*	»10	»8	»5
Менее 1800	-	Св.10	» 10	»8
Оздоровительно-рекреационного и санитарно-защитного назначения	-	-	Св.10	» 10
Промышленные				
Промышленные предприятия с годовым объемом производства, млн.руб.				
Св.500	*	До 5	До 3	-
от 100 до 500	*	»8	»5	До 2
До 100	-	Св.8	»8	»5
Коммунально-складские				
Коммунально-складские предприятия общегородского назначения	-	До 8	До 5	До 2
Прочие коммунально-складские предприятия	-	Св.8	»8	»5
Памятники культуры и природы	-	До 3	-	-
*При соответствующем обосновании допускается защитные сооружения относить к I классу, если выход из строя может вызвать последствия катастрофического характера для защищаемых крупных городов и промышленных предприятий.				

Помимо этого, часто используют шпоры (короткие незатопляемые полузапруды), устанавливаемые под некоторым углом к течению, обеспечивающие защиту берегов от размыва; береговые и дамбовые крепления,

обеспечивающие защиту берегов и откосов дамб от размыва и разрушения течением и волнами; сквозные сооружения, возводимые для регулирования потока воды в русле и наносов путем перераспределения расходов воды по ширине русла и создания у берегов замедленных (неразмывающих) скоростей течения.

Для борьбы с наводнениями и соблюдения стандартов безопасности при наводнениях требуются дополнительные меры защиты от них, что становится актуальным для многих стран мира в том числе и в связи с глобальным потеплением. Здесь опять примером могут служить Нидерланды, где в той части, которая находится ниже уровня моря, были построены дамбы для того, чтобы создать и сохранить условия, пригодные для заселения и освоения. Таким образом, начиная с середины XIV века, сложилась почти полностью взаимосвязанная система дамб, создавшая ландшафт Нидерландов в его нынешнем виде. С каждой стороны поймы располагаются по две дамбы — летняя и зимняя (для сезонных наводнений) (рис. 1.25).

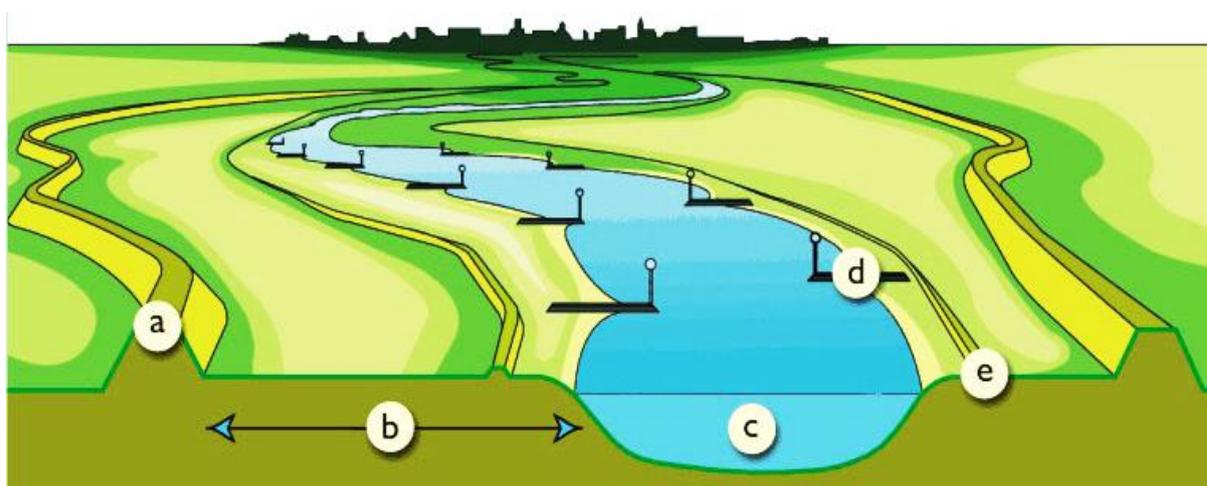


Рис. 1.25. Схема расположения двухрядных обвалований и противопаводковых бун для защиты от наводнений вдоль рек в Нидерландах [37]: а – зимнее обвалование; b – пойма; c – русло реки; d - бунны или струенаправляющие дамбы; e – летнее обвалование

На мелиоративных системах АПК нашли широкое применение **дамбы обвалования**, как незатопляемые на польдерах, так и затопляемые,

защищающие территории от затопления в период вегетации растений. Только в самом большом в России массиве польдерных земель (80%), расположенном с 1613 г. на территории древней дельты Немана в Славском районе Калининградской области, к концу XX века имелось 2 006 км магистральных и 5 733 км мелких каналов, 454 км водозащитных дамб, 19 шлюзов, 145 мостов. Здесь сосредоточены в основном зимние польдеры. Общая протяжённость дамб обвалования составляет около 700 км. **Дамбы польдеров** различаются по расположению и назначению: *береговые, озёрные и морские*, по характеру работы: с *временно действующим напором* (береговые) и с *постоянно или длительно действующим напором* (ограждающие дамбы водоёмов). Береговые дамбы находятся под напором половодий и паводков относительно непродолжительное время (20...40 дней), величина волнового воздействия и давления небольшая, а основная нагрузка обусловлена размывающим действием продольного течения воды и фильтрационным давлением. Речные дамбы бывают односторонними (вдоль одного берега) и двусторонними. Озёрные и морские дамбы подвержены длительному воздействию осветлённой воды, а также разрушительное действие ветровых волн, деформирующие их откосы. Всё это необходимо учитывать при их проектировании.

В *затопляемых дамбах обвалования* в необходимых местах предусматривают регуляторы двустороннего действия или водосливы с широким порогом на отметке максимального уровня для затопления обвалованных земель с тем, чтобы к моменту перелива через гребень обеспечить разность уровней, допустимую по условиям размыва гребня и откосов дамбы обвалования. Целесообразность применения затопляемых и незатопляемых дамб обвалования устанавливается технико-экономическими расчётами. Тело дамб отсыпается из местных минеральных или торфяных грунтов (при степени разложения не менее 50%). Дамбы из торфа по всему профилю покрываются минеральным грунтом слоем не менее 0,5 м.

Заложения откосов незатопляемых дамб при напоре до 3 м

Грунт	Заложение откосов	
	верхового	низового
Глинистый	1:1,5...1:2,5	1:1,5...1:2,5
Песчаный	1:2...1:3	1:1,5...1:3,0
Торфяной	1:2,5...1:3,0	1:2,0...1:2,5

Заложение откосов поперечного сечения *незатопляемых* дамб в виде неравнобедренной трапеции при напоре до 3 м в зависимости от грунтов принимается по таблице 1.3, а при напоре более 3 м исходя из сохранения устойчивости дамб с учётом действующих сил, свойств грунтов тела и основания, фильтрационных условий, технологии строительства. Заложение одернованных откосов дамб *затопляемых (летних)* польдеров назначается в соответствии с таблицей 1.4.

Таблица 1.4.

Заложения откосов затопляемых дамб

Грунт	Заложение откосов	
	верхового	низового
Глинистый	1:1,5...1:2,5	1:2,5...1:3,0
Песчаный	1:2,0...1:3,0	1:2,5...1:4,0

В рыбоводных хозяйствах в основном строят земляные плотины и дамбы (рис. 1.26) с креплением или без крепления откосов [36]. Дамбы возводят чаще при строительстве пойменных прудов при напоре от 1 до 4 м. Дамбы рыбхозов в зависимости от назначения бывают контурные, водооградительные и разделительные. Контурные дамбы обваловывают территорию поймы, где размещены рыбоводные пруды, и предназначены для защиты прудов от паводковых вод. Разделительные дамбы устраивают между двумя смежными прудами. Проектирование дамб выполняют в соответствии с СП [3, 4]. Намывные дамбы сооружаются аналогично намывным плотинам.

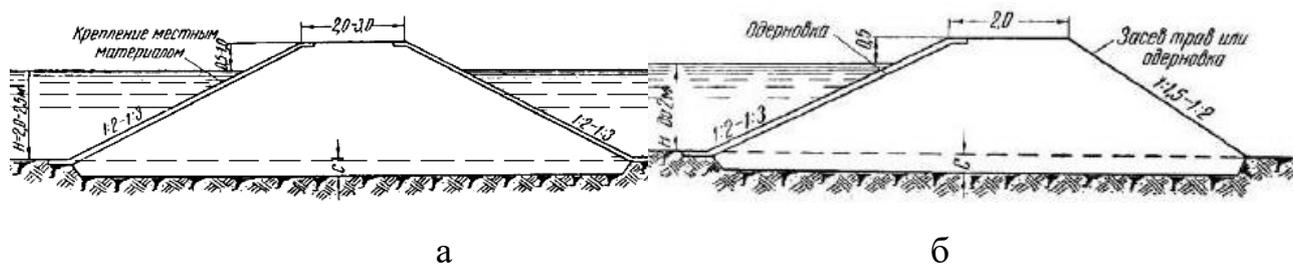


Рис. 1.26. Поперечное сечение типовых дамб прудов рыбхозов: а – разделительных (пойменных, нагульных) размером до 50 га; б – контурных (зимовальных); с – снятие растительного слоя

Дамбы с постоянно или длительно действующим напором более 3 м проектируют как низконапорные земляные плотины. Дамбы, защищающие сельскохозяйственные угодья без населённых пунктов площадью до 50 тыс. га, относят к IV классу опасности, при наличии населённых пунктов на защищаемой территории - к III классу. При защите городов и промышленных предприятий класс дамб допускается повышать при надлежащем обосновании. Для защиты откосов дамб от размывающего воздействия потока, волн, сбойного течения, ледохода и т.п. могут предусматриваться крепления. Напорные дамбы возводят при необходимости неоднородными с ПФУ в виде экрана или ядра из глинистых грунтов или полиэтиленовой плёнки, а при постоянно или длительно действующем напоре может устраиваться дренаж.

Дамбы обвалования с трапецидальным сечением могут быть: нормального профиля (рис. 1.27а-е) с коэффициентом заложения верхового откоса $m_h \geq 3,5$ и низового откоса $m_t \geq 3,00$; с уположенным верховым откосом $m_h \geq 10$ (уширенный профиль с верховым откосом, укреплённым посадками растительности); с волноустойчивым (пляжным) верховым откосом (распластанного профиля без крепления). Дамбы полигонального профиля бывают с комбинированным верховым откосом (рис. 1.27ж), когда в верховой части откоса $m_h \geq 3,5$, а в нижней $m_h \geq 10$ (с бермой или без неё) и с пригрузкой для обеспечения устойчивости слабого основания (рис. 1.27з). При выборе типа

ограждающих дамб следует предусматривать использование местных строительных материалов и грунтов из полезных выемок и отходов производства, если они пригодны для этих целей.

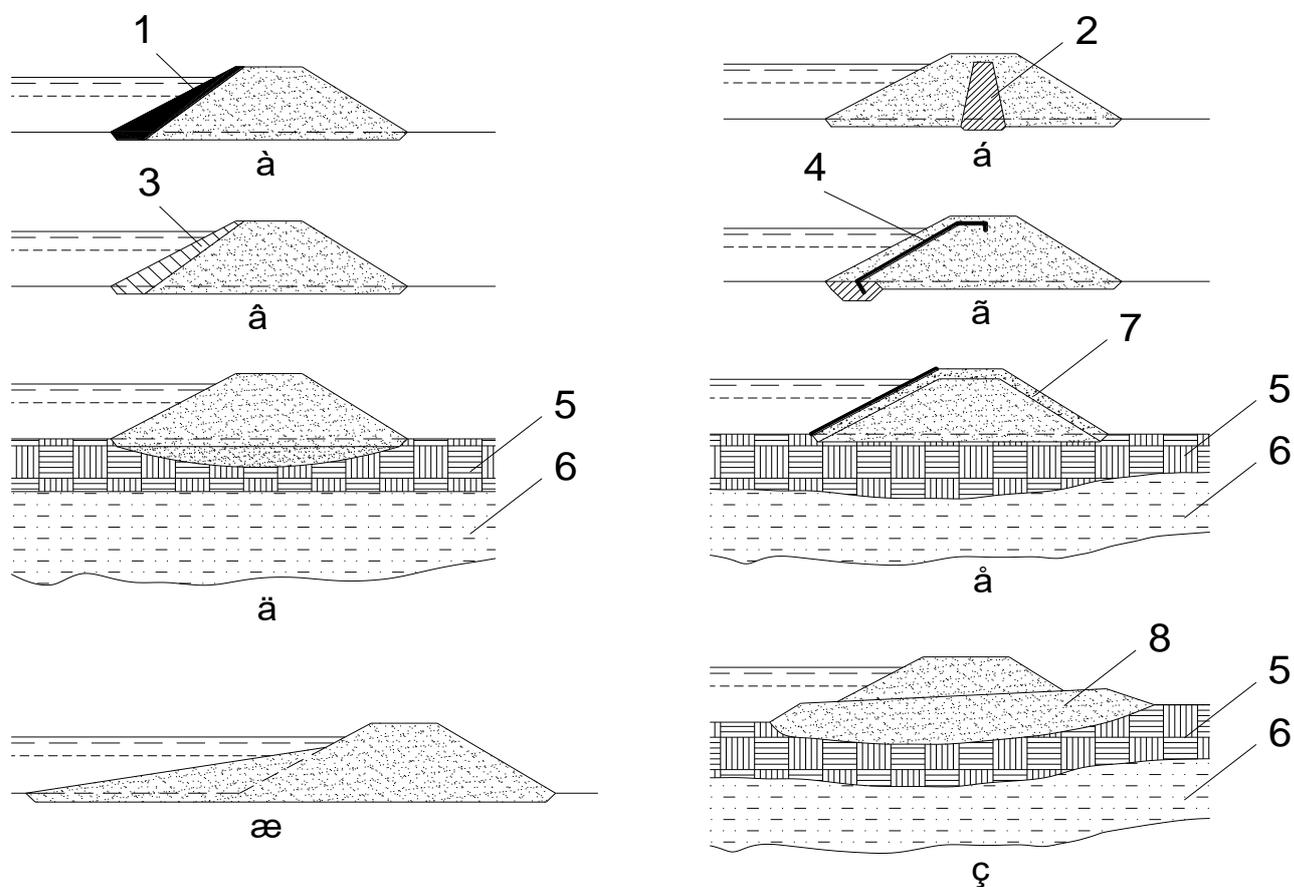


Рис.1.27. Поперечные профили дамб обвалования мелиоративных

систем [35]: а, б, в, г, д, е – нормальные профили; ж – дамбы с комбинированным

верховым откосом; з – дамбы с пригрузкой (на слабом основании); 1 – крепление; 2 – ядро; 3 – экран из грунтового материала; 4 – экран из полиэтиленовой плёнки; 5 – торф; 6 – сапропель; 7 – защитный слой; 8 – пригрузка

При выборе вариантов конструкций дамб обвалования (рис. 1.28, 1.29) надлежит учитывать: топографические, инженерно-геологические, гидрогеологические, гидрологические и климатические условия района строительства; возможность пропуска воды в период половодья и летних паводков; плотность застройки территории и размеры зон отчуждения, требующих выноса строений из зон затопления; возможность и целесообразность применения местных строительных материалов,

строительных машин и механизмов; сроки возведения сооружений; требования по охране окружающей природной среды; удобство эксплуатации; целесообразность утилизации дренажных вод для улучшения водоснабжения прилегающих территорий [31].

На участках, расположенных под защитой дамб, следует иметь достаточный запас песка, мешков и других средств, обеспечивающих возможность наращивания дамб при подъеме уровня воды в реке выше прогнозируемого.

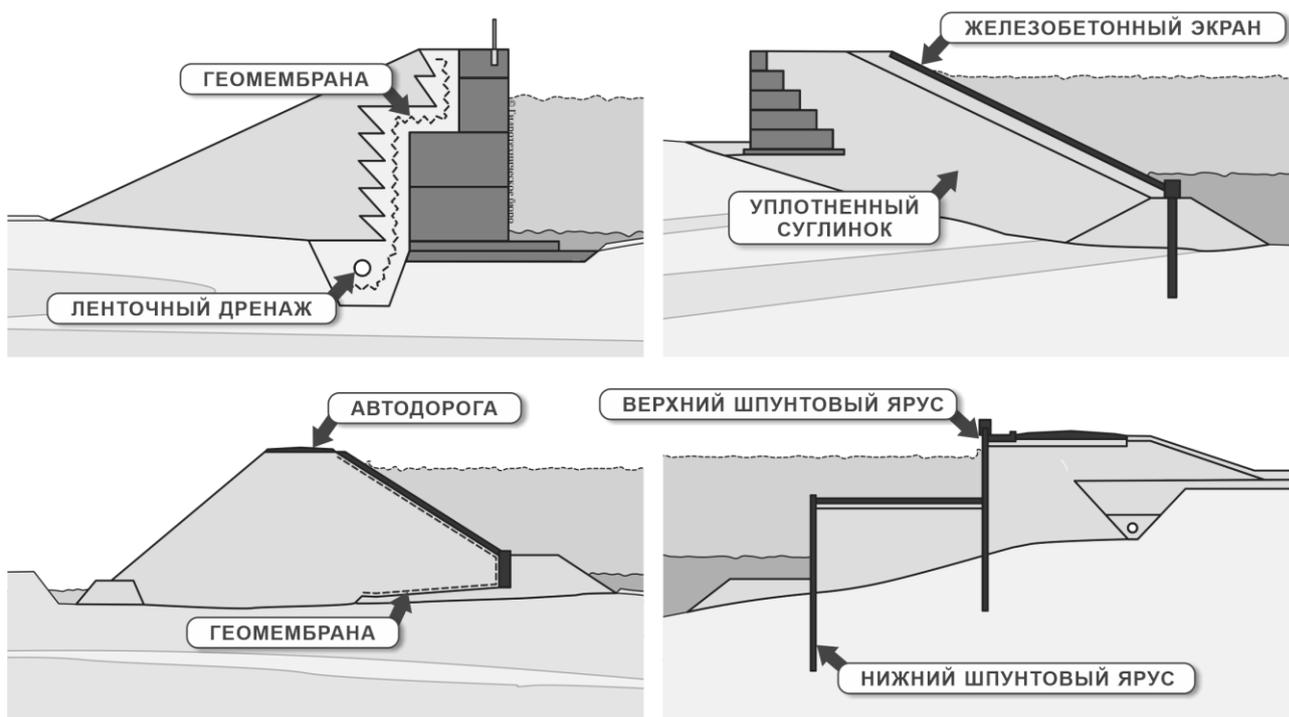


Рис.1.28. Схемы наиболее часто используемых современных конструкций дамб инженерной защиты территорий АПК с использованием грунта от затопления: а –габионная с мембраной; б – габионная с железобетонным экраном; в – земляная с экраном и геомембраной; г – двухъярусная шпунтовая набережная

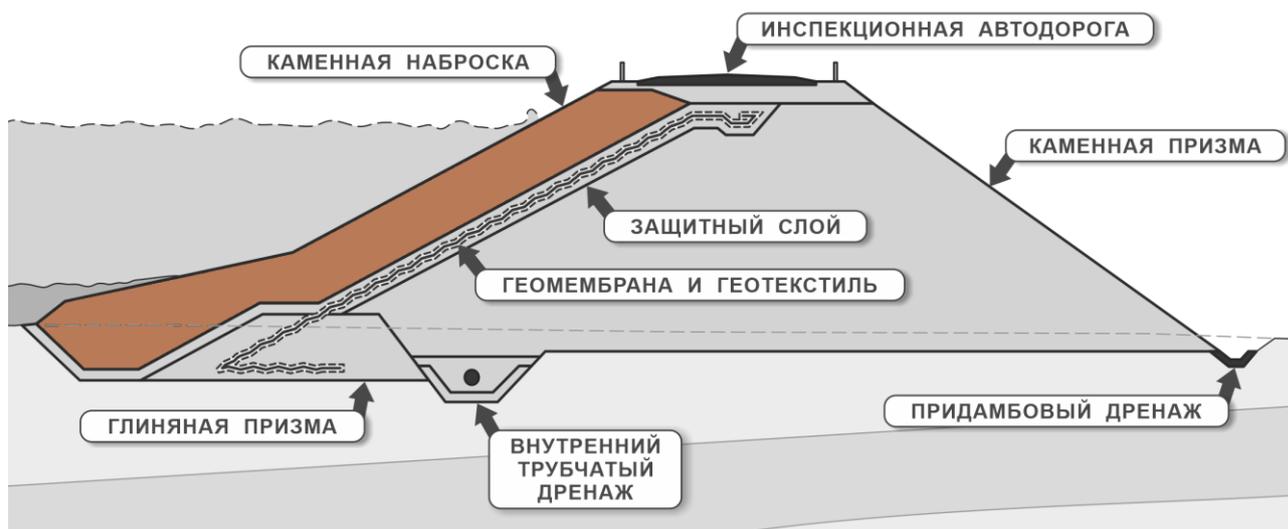


Рис. 1.29. Дамба обвалования из каменных материалов и с геомембраной

В соответствии с конструктивными особенностями применяют грунтовые дамбы обвалования двух типов: обжатого и распластанного профилей. Применение дамб обжатого профиля возможно при армировании слагающего их грунта геотекстильными полотнищами (рис. 1.30), послойной раскладкой арматурных стержней, глубинным виброуплотнением и другими методами. Устройство такого армогрунтового сооружения должно соответствовать всем требованиям СП 45.13330.2017 [39]. При устройстве дамб из армированного грунта следует тщательно подготовить ее основание, удалить все предметы, которые могут привести к повреждению армирующих элементов. Основание таких дамб следует уплотнить. Предпочтительным следует считать применение дамб распластанного профиля с биологическим креплением откосов (посев трав, посадка кустарников и т. п.). При высоте дамб более 5 м следует на половине ее высоты предусмотреть берму.

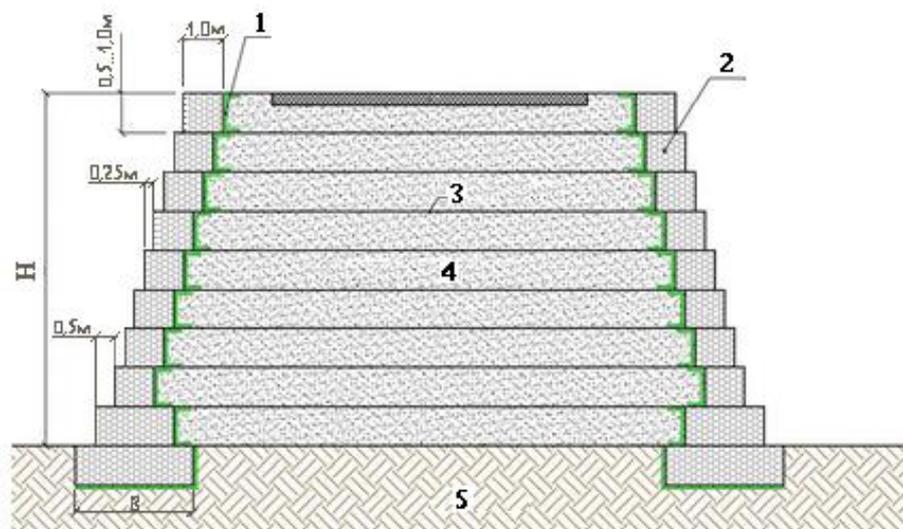


Рис. 1.30. Вариант дамбы из коробчатых габионов и армирующей сетки: 1 – обратные фильтры-геотекстиль; 2 – габионные конструкции коробчатые; 3 – армирующая сетка; 4 – насыпной утрамбованный грунт; 5 - местный грунт

Профиль дамбы (распластанный или обжатый) выбирают с учетом наличия местных строительных материалов, технологии производства работ, условий ветрового волнения на верховом откосе и выхода фильтрационного потока на низовом. Целесообразно комбинировать грунтовые материалы с разными типами современных конструктивных элементов (габионы, геомембраны, геотубы, геосинтетика и пр.) (рис. 1.31, 1.32).

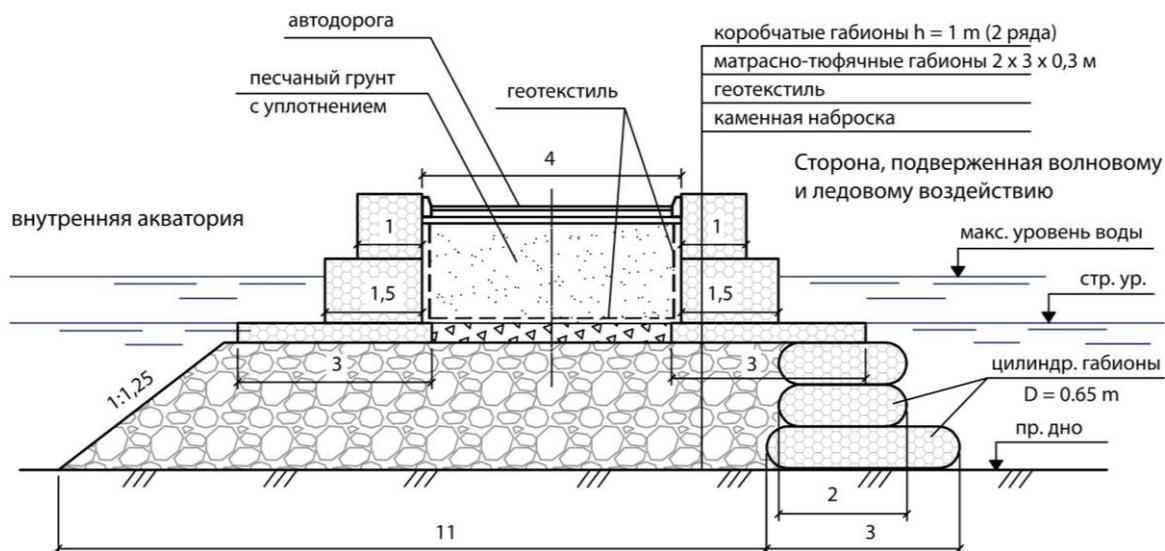


Рис. 1.31. Поперечное сечение дамбы с применением габионов ООО «Габионы Коган»

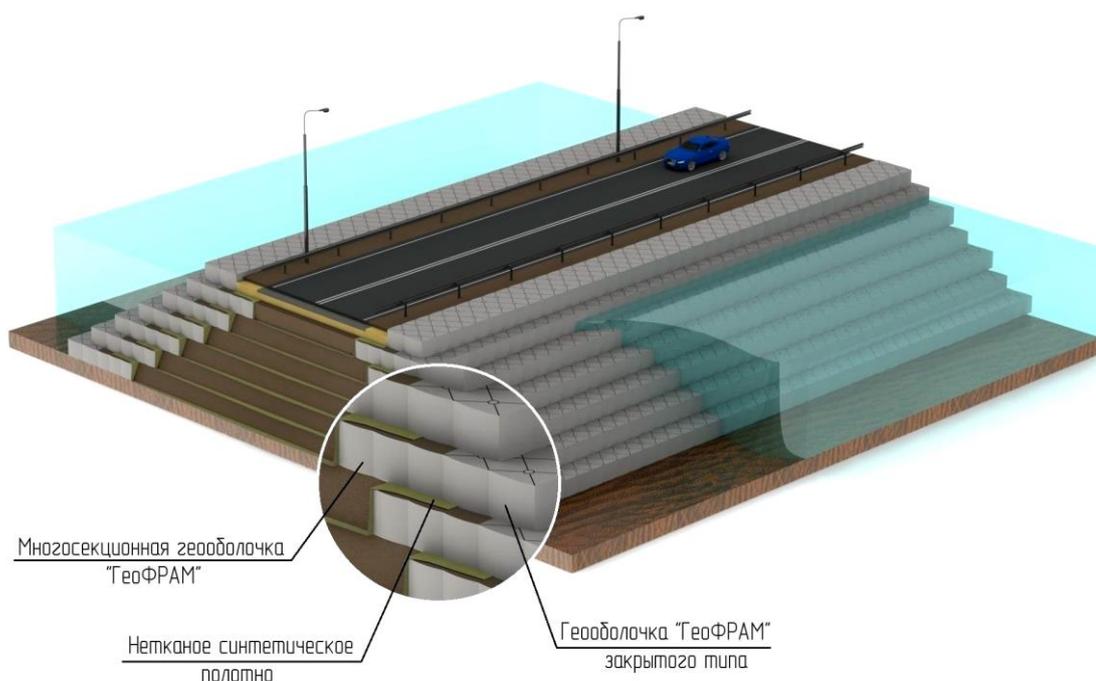


Рис. 1.32. Дорога –дамба с укреплением откосов многосекционными оболочками ГеоФАРМ

Сопрягающие устройства грунтовых дамб с бетонными сооружениями должны обеспечивать: плавный подход воды к водопропускным сооружениям со стороны ВБ и плавное растекание потока в НБ, предотвращающее размыв как тела и основания дамб, так и дна водотока; предотвращение фильтрации по контакту с бетонными сооружениями в зоне примыкания. Конструкции сопрягающих устройств дамб I – III классов опасности должны быть обоснованы лабораторными гидравлическими исследованиями.

Требования к проектированию дамб обвалования в зоне распространения *многолетнемерзлых грунтов* следует устанавливать в зависимости от температурного состояния ПФУ, противоналедного устройства, дренажной системы и класса защитного сооружения [39]. Оградительные, противопаводковые и струенаправляющие дамбы следует проектировать талого, мерзлого или комбинированного типа с использованием многолетнемерзлых грунтов, предусматривая при необходимости в теле дамбы и на ее низовом откосе дренажные системы или охлаждающие устройства.

1.3. Выбор створа земляной плотины

В процессе полевых изысканий, включающих в себя топографическую съёмку, геологические изыскания, гидрологическое обобщение наблюдений над стоком, хозяйственное писание района строительства, намечается ряд возможных створов для плотин (рис. 1.33).

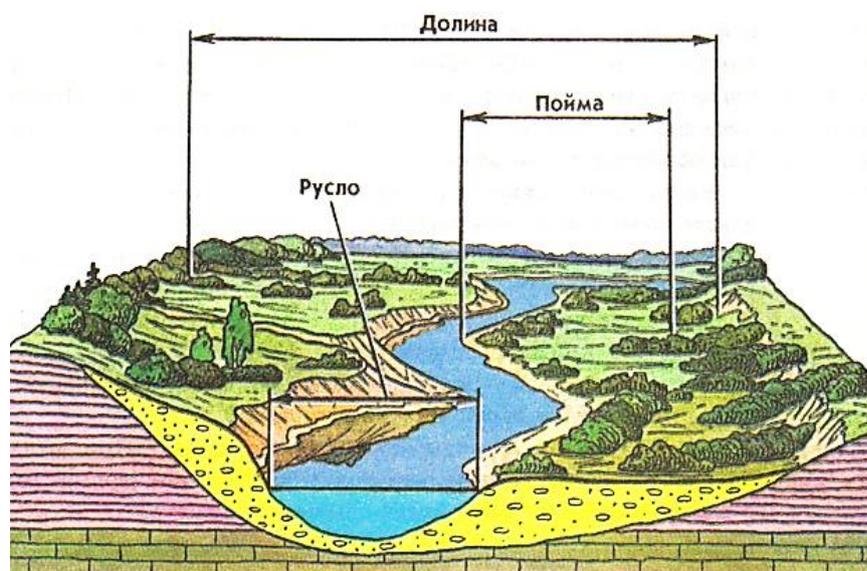


Рис. 1.33. Основные элементы русла водотока

Окончательный выбор створа плотины производится на основании технико-экономических сопоставлений вариантов, принимая во внимание компоновочные решения и эксплуатационные затраты по узлу. Створ плотины обычно выбирают в наиболее узком месте поймы с плотным водонепроницаемым грунтом, где нет выхода родников и ключей. Учитывая, что на выбор створа оказывает влияние ряд условий, необходимо критически подойти к оценке каждого из них и принять тот из вариантов, который удовлетворяет наименьшим затратам, сокращению сроков строительства и простоте последующей эксплуатации узла. При рассмотрении условий, влияющих на выбор створа плотины, необходимо знать те оптимальные пределы, которые и должны быть положены в основу при оценке каждого из вариантов. Основные условия выбора створа – топография, геология и гидрогеология, размещение водосбросного тракта, положение карьеров и хозяйственная значимость узла сооружений. Руководствуясь только

топографией, створ плотины действительно наиболее целесообразно располагать в самом узком месте водотока, так как это дает минимальный объем земляных работ. Желательно, чтобы водохранилище при выбранном створе имело минимальную площадь зеркала воды, что сокращает потери воды на испарение. При этом подразумевается, что по контуру водохранилища не будет оградительных дамб, затраты на которые могут свести на нет преимущество короткого створа (рис. 1.34).

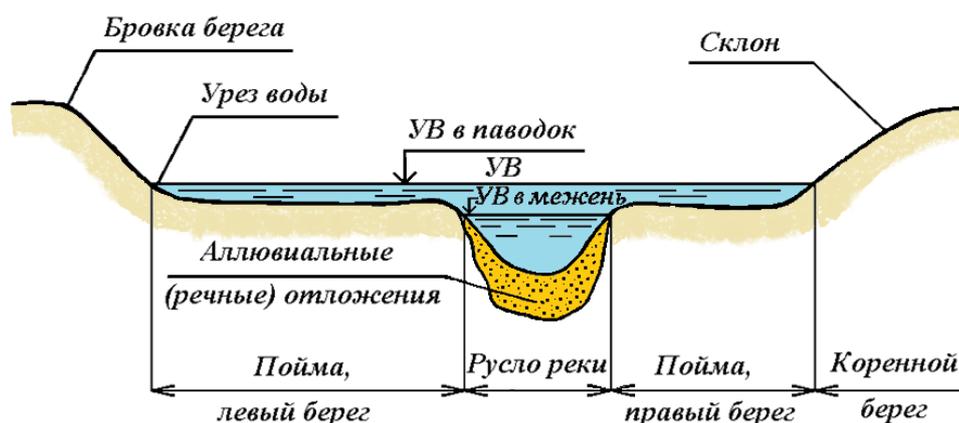


Рис. 1.34. Разрез по водотоку в месте возможного створа земляной ПЛОТИНЫ

Геологические условия створа плотины прежде всего требуют, чтобы грунты в основании плотины были прочны и способны принять на себя дополнительную нагрузку от ГТС. Для водохранилищных узлов сооружений существенную роль играет водопроницаемость грунтов как в створе плотины, так и в чаше водохранилища. Чем более мощный слой грунта с повышенным коэффициентом фильтрации залегает в основании плотины, тем сложнее и дороже противофильтрационные работы. Особенно трудоемки такие работы, когда их проводят непосредственно в ложе водохранилища.

Не всегда можно выбрать трассу и для дамбы обвалования с благоприятными гидрогеологическими условиями - по выбираемым трассам часто залегают болотные отложения, тогда приходится использовать их в качестве оснований (см. п.2.1). При прохождении трассы дамб по оползневому или потенциально оползневому склону должны быть разработаны

противооползневые мероприятия в соответствии с требованиями СП 116.133330. Трассу дамб следует выбирать в зависимости от топографических и инженерно-геологических условий строительства, хозяйственного значения данного участка территории, возможности обеспечения минимального изменения гидрологического режима водотока и максимального использования защищенной территории. При временной боковой приточности целесообразно применять непрерывную трассировку дамб вдоль уреза воды водоема или водотока. При постоянной боковой приточности обвалование, как правило, выполняют по участкам между притоками, которое включает дамбы обвалования берегов основного водотока и его притоков. При обваловании территории переливными дамбами все защитные сооружения должны допускать затопление в период половодья. При прокладке трассы дамб для защиты сельскохозяйственных земель необходимо учитывать требования СП 100.13330 [30]. Трассировку дамб обвалования в городской черте следует осуществлять с учетом использования защищаемых территорий под застройку в соответствии с требованиями СП 42.13330.

На геологическое строение чаши водохранилища нужно обращать особое внимание и при выборе створа плотины учитывать фильтрационные потери воды, которые при неблагоприятном напластовании грунтов могут быть весьма большими. Для иллюстрации приведено несколько характерных случаев напластований грунтов в чаше водохранилища, которые следует учитывать при выборе створа плотины. Если схематически представить себе четыре водохранилища на водотоке и по каждому из них дать поперечное сечение (рис. 1.35), то геологическое строение можно охарактеризовать различными напластованиями; их учет позволит правильно подойти к выбору створа плотины. Первое сечение с синклинальным геологическим строением: падение пластов идёт к оси тальвега (рис. 1.35а). При наличии водопроницаемых пластов такое геологическое напластование благоприятно для устройства водохранилищ, так как безвозвратных потерь воды на фильтрацию здесь не будет. За счет насыщения водой водопроницаемых слоев создается

аккумулирующий объем, используемый по мере сработки уровней воды в водохранилище и обнажения проницаемых слоев.

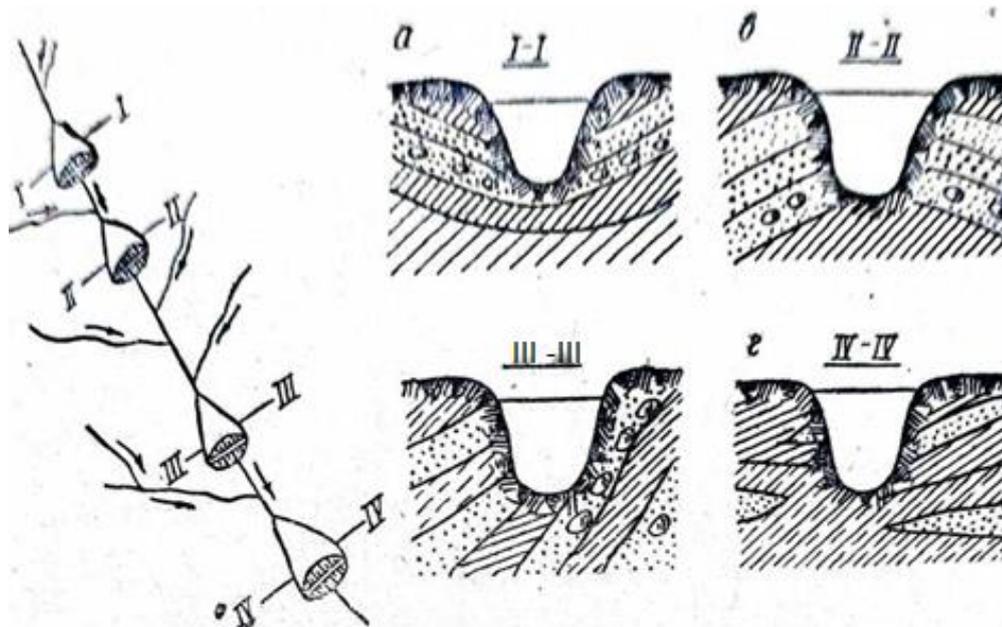


Рис. 1.35. Различные варианты геологических напластований в чаше водохранилища: *а* - синклинальное; *б* — антиклинальное; *в* — наклонное; *г* — линзовое

Второе сечение с антиклинальным геологическим строением: падение пластов идет от оси тальвега (рис. 1.35б). Наличие водопроницаемых пластов, особенно с большим коэффициентом фильтрации, приведет к безвозвратным потерям воды на фильтрацию, размер которых может оказаться таким, что водохранилище высохнет. Антиклинальное расположение напластований неблагоприятно для устройства водохранилищ. Противофильтрационные мероприятия по ложу водохранилища обычно стоят очень дорого и экономически не оправдываются.

Третье сечение с наклонным напластованием водопроницаемых грунтов, перемежающихся водоупорными слоями, занимает промежуточное положение между первым и вторым сечениями. Можно считать, что устройство водохранилищ в этом случае неблагоприятно, но возможно (рис. 1.35в). Четвертое сечение характеризуется тем, что на всем протяжении водохранилища залегают водонепроницаемые грунты, распространяющиеся на очень большую глубину, и только в пределах самого русла водотока имеются

аллювиальные отложения небольшой мощности. Такое геологическое строение и для чаши водохранилища, и для створа плотины наиболее благоприятно, так как потерь воды через водопроницаемый слой не будет. В этом случае по створу плотины предусматриваются противодиффузионные мероприятия. Разновидностью четвертого сечения, встречающегося в практике, является случай, когда основная покровная толща сложена из водонепроницаемых грунтов, а в пределах ее встречаются прослойки или линзы водопроницаемых (рис. 1.35г). Такое напластование также благоприятно для устройства водохранилищ. Но при этом нельзя допускать обнажения водопроницаемых прослоек, через которые фильтруется много воды.

Гидрологические условия влияют на выбор створа плотины так, что при стоке заданной обеспеченности возможно наполнение водохранилища до заданного объема. На выбор створа плотины большее влияние оказывают расположение водосбросного тракта и размещение сооружений на нем. Это влияние сказывается как на стоимости всего узла, так и на эксплуатации. При прочих равных условиях — геологических, гидрологических и хозяйственных — выбор створа плотины нельзя подчинять только топографии, исходя из минимума объема работ по насыпи. Необходимо еще учитывать наиболее удачное расположение водосбросного тракта, так как его стоимость часто превосходит стоимость самой плотины. Особое внимание следует уделять вопросу, связанному с пропуском паводковых вод, от чего зависит устойчивость самой земляной плотины. Влияние хозяйственных условий на выбор створа плотины сказывается на использовании запасов воды в водохранилище, удаленности узла сооружений от потребителя. При использовании запасов воды для ирригационных целей с учётом самотечной подачи требуются заданные отметки уровней в водохранилище, обеспечивающие командование над орошаемой площадью. Близость расположения промышленных объектов может привести к загрязнению воды в водохранилище. Такой водой нельзя пользоваться, например, для водоснабжения. Ряд других условий также оказывает влияние на положение створа плотины.

1.4. Общие вопросы расчётов при проектировании земляных плотин и дамб

Проектированию, в частности водохранилищных узлов ГТС, предшествуют помимо изысканий по району строительства (о геологическом строении, рельефе местности, гидрологических условиях водотока, климате, экономико-производственных, социальных и пр. условиях) гидрологические и водохозяйственные расчёты. На основании **гидрологических расчётов** определяется приток воды с водосборной площади, условия наполнения водохранилища и максимальные сбросные расходы, пропускаемые по водосбросному тракту в период паводка. Непрерывное ежегодное наблюдение над стоком позволяет получить гидрограф (рис. 1.36), обработка которого методом математической статистики даёт возможность построить кривую обеспеченности, показывающая в каком числе случаев может быть превзойдена та или иная величина расхода (%). Пользование кривой обеспеченности сводится к определению гидрологической характеристики, которой может быть расход, объем стока, высота слоя стока или модуль при заданной обеспеченности. Для построения кривой обеспеченности необходимы параметры: среднеарифметическое значение ряда наблюдений (например, расход), коэффициент вариации и коэффициент асимметрии C_3 . Все три параметра вычисляются по данным наблюдений или косвенным методом [8, 38]. Применительно к водохранилищному узлу ГТС строят две кривые обеспеченности: одну для средних расходов, на основании которой решается вопрос о заполнении водохранилища, и вторую для определения максимальных сбросных расходов, пропускаемых через водосбросной тракт, определяемую классом опасности ГТС.

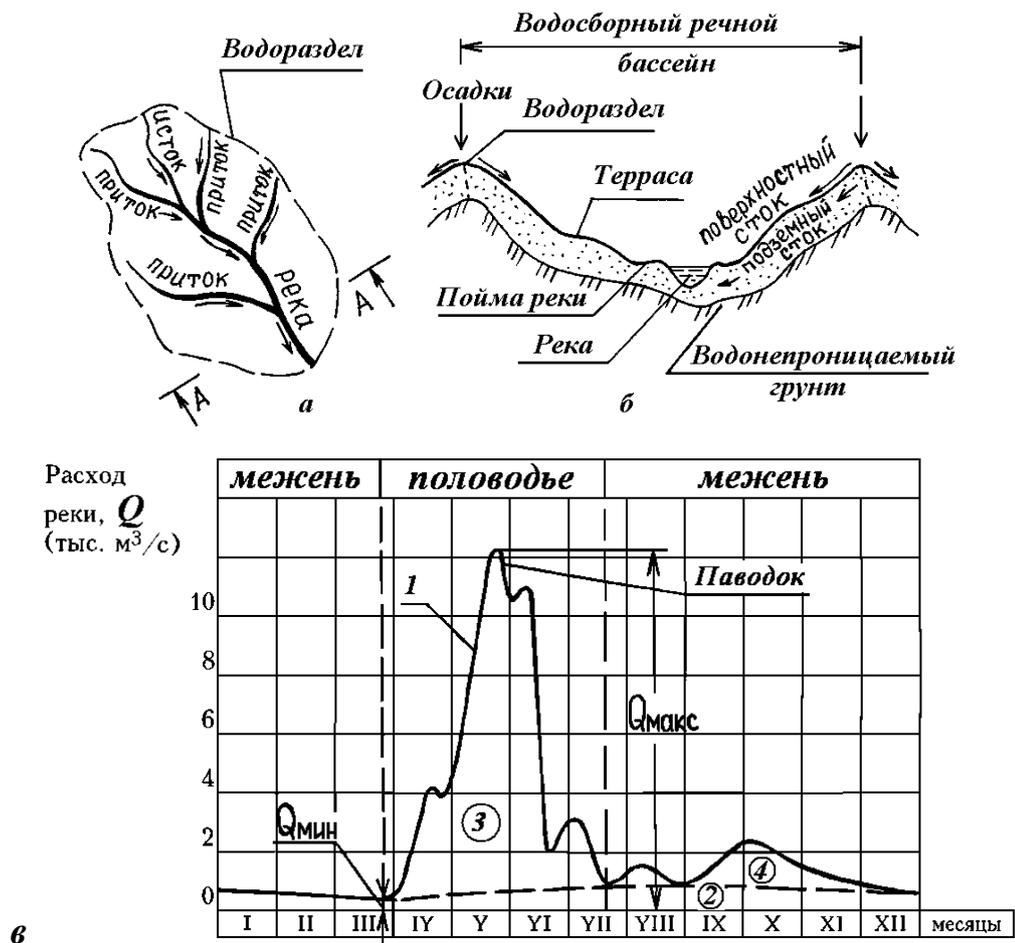


Рис. 1.36. Необходимые для проектирования гидроузла сведения из гидрологии [24]: а – план водосборного бассейна, б – разрез А-А в рассматриваемом створе реки; в - гидрограф

Обеспеченность средних расходов зависит от целей использования водохранилища и наиболее часто принимается: для водоснабжения – 90...97%, для орошения – 75...95%, для энергетики – 75...97%, для водного транспорта – 85...95%. Если наблюдения над стоком в створе плотины кратковременны и не могут служить надежной основой для определения параметров, используются материалы наблюдений на других створах водотока, а также на смежных водотоках, расположенных в аналогичных физико-географических условиях. В случае полного отсутствия наблюдений над стоком по принятому створу плотины применяют приближенные способы нахождения гидрологических характеристик (эмпирические формулы, карты изолиний различных характеристик стока и пр.) [38].

Наряду с гидрологическими расчетами выполняют **водохозяйственные расчеты**, связанные с использованием воды в водохранилище, в результате которых устанавливают характерные уровни воды в водохранилище, используемые затем при конструировании плотин: максимальный форсированный подпёртый уровень – ФПУ, нормальный – НПУ и наинизший уровень мертвого объема – УМО (рис. 1.1) [38]. При сезонном регулировании стока водохранилище сбрасывается до УМО ежегодно, в то время как при многолетнем регулировании – только в конце маловодных периодов, определяемых на основании гидрологических расчётов. При водохозяйственных расчётах, а в последующем в эксплуатационных условиях возникает необходимость определить геометрические элементы водохранилища: объём при заданном уровне $W = f(H)$; площадь зеркала воды $\omega = f(H)$, соответствующую принятому объёму W или отметке (глубине) H . Наличие геометрических характеристик водохранилища в виде кривых, нанесённых на один график (рис. 1.37), которые называют также топографическими характеристиками, значительно упрощает и облегчает все вычислительные работы.

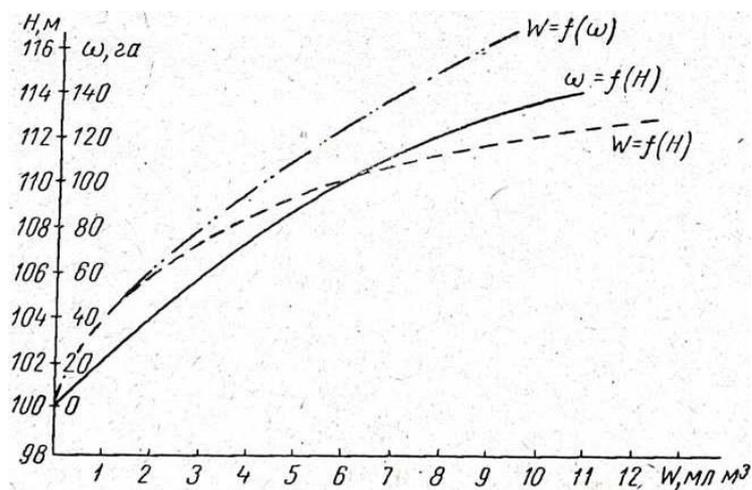


Рис. 1.37. Пример топографических характеристик водохранилища [9]

После предварительно намеченного на основании аналогов и рекомендаций научно-технической и нормативной литературы профиля выбранного типа земляной плотины или дамбы **расчёты их прочности и**

устойчивости выполняют на основное и особое сочетание нагрузок для случаев работы ГТС в период эксплуатации и строительства [3 – 6, 10, 11, 14, 34].

Для плотин III и IV классов опасности в состав обязательного расчётного комплекса входят следующие **расчёты**: определение отметки гребня; фильтрационные; оценки фильтрационной прочности тела, основания и ПФУ; обратных фильтров, дренажей, переходных зон; устойчивости откосов, экрана, защитного слоя; осадок тела и основания плотин и дамб; креплений откосов; порового давления при консолидации тела, ядра или экрана, сложенных из глинистых грунтов. Для плотин и дамб I и II классов опасности помимо этого в обязательный расчётный комплекс входит расчёт напряжений и деформаций, а также горизонтальных смещений.

2. ГРУНТЫ ДЛЯ ПЛОТИН И ДАМБ

2.1. Грунт как строительный материал

Требования, предъявляемые к грунту плотины, сводятся: к *водостойкости*, характеризуемой степенью растворения грунт в воде; *прочности*, характеризуемой сдвиговыми показателями (углом внутреннего трения и сцепления); *водопроницаемости*, характеризуемой коэффициентом фильтрации. Чаще всего о пригодности грунта для земляных плотин и дамб судят не по одному какому-либо показателю, а по их сочетанию, принимая во внимание местоположение грунта в той или иной части поперечного профиля. Если по водохозяйственным расчётам фильтрационные потери недопустимы и не обеспечивается фильтрационная прочность тела плотины/дамбы и основания, то предусматриваются соответствующие противофильтрационные устройства (ПФУ).

По условиям размещения грунта в теле плотины можно выделить три характерные части: основная часть плотины, выполняющая роль массива (обеспечивает устойчивость всего сооружения и создает подпор в ВБ); часть поперечного профиля плотины, включающая ПФУ (ядра, экраны, понуры, зубья и пр.); часть поперечного профиля, занимаемая дренажём. Грунты каждой из этих частей профиля, исходя из тех задач, которые они выполняют, отвечают различным требованиям, резко отличающимся между собой.

В пределах **основной части профиля плотины** практически применимы **все виды нескальных грунтов**, залегающих вблизи створа, или грунты полезных выемок [9], а также отходы металлургической промышленности и тепловых электростанций. Вместе с тем следует отметить, что в ряде случаев следует воздерживаться от применения грунтов, содержащих водорастворимые включения хлоридных солей более 5% по массе, а сульфатных или сульфатно-хлоридных солей более - 10%; не полностью разложившиеся органические вещества (остатки растений и т.п.) – не более 5% по массе; полностью разложившиеся органические вещества (в аморфном состоянии) – не более 8%.

При обосновании и проведении необходимых защитных мероприятий эти грунты также допускается укладывать в тело плотины (как правило, выше депрессионной кривой) [4, 10]. Это особенно следует учитывать, когда речь идет о средних и высоких плотинах.

Растительные грунты не допускается, укладывать в основную часть поперечного профиля плотины или дамбы, особенно там, где есть фильтрационный поток. В низких плотинах растительные грунты, если они отвечают условиям водостойкости, допустимо использовать в основной части профиля плотины, но с условием укладки выше кривой депрессии в низовой части плотины. На плотинах всех типов можно использовать растительный грунт без ограничения для залужения низовых откосов. Поскольку этот грунт является благоприятной средой для землеройных животных, ходы и норы которых могут пропускать воду с повышенной скоростью, что может привести к деформации низовой части плотины, следует предусмотреть химическую обработку растительного грунта, а в процессе эксплуатации плотины вести наблюдения за низовым откосом и своевременно заделывать ходы землероев. При применении грунтов с примесями гумуса необходимо учитывать, что их объемный вес меньше, чем минеральных грунтов, а влажность, которая требуется для эффективного уплотнения, — больше.

Илистые грунты тоже ограничено применяют для основной части профиля плотины. Прямых нормативных указаний о запрещении илистых грунтов нет, но, тем не менее, укладывать их в тело плотины не следует. Дело в том, что они в перенасыщенном водой состоянии имеют очень малый угол внутреннего трения и незначительное сцепление. Эти два показателя определяют устойчивость плотины, а при тех значениях, которые характерны для ила, поперечный профиль получается очень распластанным. Во всех случаях применению илистого грунта должны предшествовать физико-механические испытания, на основе которых решается вопрос о возможности и целесообразности его укладки.

Галечниковые и щебенистые грунты, с точки зрения устойчивости,

применимы для основной части профиля плотины, если только по условиям водохозяйственных расчётов фильтрационные потери не препятствуют этому. Показатели прочности таких грунтов остаются более или менее постоянными не зависимо от влажности грунта. Их чаще используют в разнородных плотинах (рис. 1.14б), укладывая в низовой части профиля. Для снижения фильтрационных потерь в плотинах из таких грунтов предусматривают ПФУ.

Широкое распространение для строительства основной части профиля земляных плотин получили **песчано-галечниковые смеси**. При удачном гранулометрическом составе объемный вес такой смеси превышает объемный вес составляющих и достигает 2 т/м^3 . Это получается, когда содержание фракций диаметром $80...20 \text{ мм}$ составляет $35...45\%$, а содержание фракций диаметром менее 2 мм — $20... 30\%$. При оптимальном уплотнении коэффициент фильтрации смеси уменьшается в $15...20$ раз по сравнению с коэффициентом фильтрации, который каждый из составляющих грунтов имел в карьерах. Показатели прочности песчано-галечниковых смесей после уплотнения тоже повышаются по сравнению с такими же показателями составляющих. Примером земляной плотины, выполненной из песчано-гравелистых смесей, является Орто-Токойская плотина (рис. 2.1).

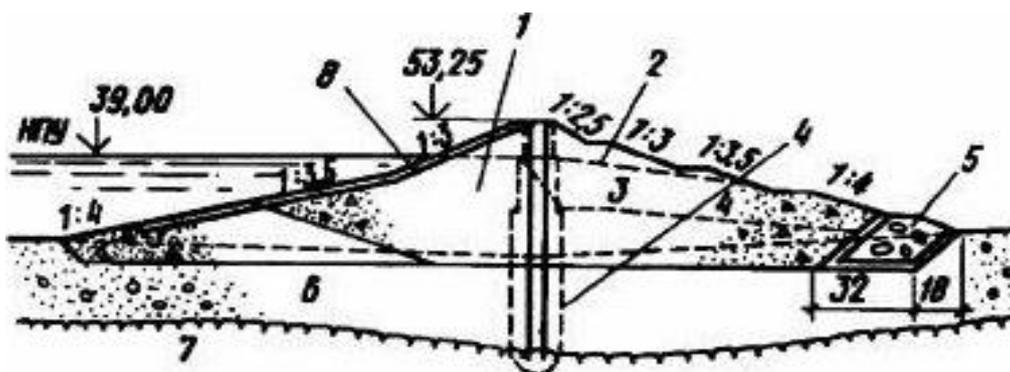


Рис. 2.1. Поперечный разрез Орто-Токойской плотины: 1 – грунт тела плотины (материал конуса выноса $24,5\%$ фракций крупностью менее 2 мм); 2 – положение кривой депрессии в плотине до построения глино-цементной завесы; 3 – то же, после построения глино-цементной завесы; 4 – глино-цементная завеса; 5 – дренажная призма; 6 – аллювий основания; 7 – скальное основание из гранита; 8 – крепление верхового откоса камнем

Наиболее широко используются для основной части профиля плотины **супесчаные и песчаные грунты**. Песчаные грунты (мелкие, средней крупности и крупные) следует применять для однородных плотин и плотин с центральной или верховой противофильтрационной призмой, если обеспечивается фильтрационная прочность грунтов плотины, а величина фильтрационного расхода воды через ее тело допустима по результатам водохозяйственных и энергэкономических расчетов. Повышение водонепроницаемости тела плотины из таких грунтов достигается за счет устройства ПФУ. Значительное распространение песчаные грунты получили в намывных плотинах. **Суглинистые грунты** являются хорошим материалом для основного профиля плотины; из них, как правило, строят однородные плотины (рис. 1.14а). **Суглинки** обладают сравнительно малой водопроницаемостью и достаточной прочностью, так как в них наряду с внутренним трением есть и сцепление.

Глинистые грунты по основным физико-механическим свойствам пригодны для основного профиля тела плотины. Недостаток их – пучение при промерзании. Поэтому плотины из них рекомендуется выполнять с защитным покрытием непучинистыми грунтами по всему наружному контуру, например, песчаной подушкой. Пример, однородная плотина высотой 40 м из аптских глин Симферопольского гидроузла на р. Салгир (рис. 2.2).



Рис. 2.2. Плотина из аптских глин (а) и водосбросное сооружение (б)

Симферопольского водохранилища на р. Салгир в Крыму

При выборе грунта для основной части плотины целесообразно сравнение

гранулометрического состава грунтов у проектируемых и уже построенных, удачно эксплуатируемых плотин. В дамба обвалования, отсыпанных из пучинистых грунтов, также устраивают защитный слой из песка, толщина которого должна быть не менее глубины промерзания, а в дамбах с уположенным и волноустойчивым откосом защитный слой не устраивается.

Если по водохозяйственным расчётам фильтрационные потери недопустимы и не обеспечивается фильтрационная прочность тела плотины, дамбы и основания, то предусматриваются соответствующие ПФУ. **Грунты для ПФУ** должны быть с малой водопроницаемостью. Показателями водопроницаемости служит не абсолютное значение коэффициента фильтрации k , а относительное, определяемое при сопоставлении с проницаемостью грунта, контактирующего с ПФУ. Практически считается, что если коэффициент фильтрации одного грунта меньше другого в 100 раз и более, то первый грунт является водонепроницаемым по отношению ко второму. Хотя условность такого сравнения очевидна, тем не менее, им пользуются при фильтрационных расчетах. К таким слабоводопроницаемым грунтам с $k < 0,1$ м/сут и при числе пластичности $W_n \approx (0,03...0,05)$ можно отнести: суглинки, глины, илы, торф, естественные грунтовые смеси с определёнными соотношениями входящих в них фракций, а также искусственно приготовленные грунты – глинобетоны. При выборе грунта для ПФУ наряду с показателем водонепроницаемости нужно учитывать и показатель прочности. Ограничения, возникающие по отношению к естественным глинистым материалам, в основном связаны с производством работ. Так, недопустимо применять ПФУ из ломовой глины, доставляемой к месту укладки в глыбах. Куски такой глины трудно поддаются разрушению на месте, и, следовательно, невозможно достигнуть проектного уплотнения. Точно так же следует воздерживаться от применения илистых грунтов, которые имеют незначительные углы внутреннего трения и сцепления. Консистенция глинистых грунтов должна отвечать удобоукладываемости, а влажность быть наиболее благоприятной для уплотнения.

Торф как водонепроницаемый материал допустим в

противофильтрационных устройствах при степени разложения не менее 50%, если он не имеет посторонних включений, влияющих на его фильтрационные свойства или подверженных гниению. Из торфа целесообразно делать для низкокласных ГТС контурные противофильтрационные устройства, например экраны и понуры. Пригрузка торфа минеральным грунтом — обязательное условие при строительстве плотин.

Естественные глинистые материалы, обладая положительным свойством малой водопроницаемости, при воздействии на них отрицательных температур значительно деформируются, т.е. подвергаются морозному пучению. А искусственно приготовленный грунт — **глинобетон** (смесь из крупного заполнителя — гравия или щебня песка, глины и воды) сочетает в себе положительные свойства глинистых и зернистых материалов: водонепроницаем и не подвержен морозному пучению. Состав глинобетона подбирают в лабораторных условиях. Основное требование при подборе компонентов смеси — минимальное содержание глинистого материала, необходимого только для связности и водонепроницаемости. Например, ориентировочный состав глинобетона при наличии жирных глин: 40% гравия, 35% песка, 25% глины. Количество воды в смеси определяют, исходя из необходимости смачивания всех компонентов и обеспечения требуемой консистенции для укладки. Однако по стоимости глинобетон выше естественных маловодопроницаемых местных материалов (глины, суглинка).

Грунты для дренажей должны быть с большим значением коэффициента фильтрации, чем у грунта тела плотины: пески, галька, гравий, щебень, песчано-гравийные смеси и крупные камни. Взаимное расположение грунтов зависит от типа дренажа, фракционный состав их специально подбирается [10, 13, 14]. Песчаные грунты должны быть чистыми, без примеси глинистых и пылеватых частиц, при этом допустимо присутствие частиц с $d \leq 0,1$ мм не более 3...5% по весу, коэффициент неоднородности $\eta \leq 10$. Крупнообломочные грунты для дренажей применяют с временным сопротивлением на раздавливание не менее 2000 кг/см², марка камня по

морозоустойчивости не ниже 25. Чаще всего этим условиям удовлетворяет каменный материал, полученный из изверженных пород.

Грунты основания плотин требуют подробного всестороннего учёта их физико-механических свойств. В основании ГТС могут быть *скальные, полускальные и нескальные грунты*. Скальные породы можно использовать без всяких ограничений, но при большой трещиноватости скалы для уменьшения фильтрационных потерь устраивают цементационные завесы. Для плотин низких и средних в сельском гидротехническом строительстве АПК в подавляющем большинстве случаев основанием служат нескальные грунты. Основные ограничения для плотин на нескальных грунтах сводятся к следующему. При залегании в основании иловатых и переувлажнённых глинистых грунтов, в которых возможно поровое давление, следует предусмотреть дренирование основания. При незначительной мощности таких грунтов целесообразно их удалить и плотину возводить на коренных прочных грунтах. Недопустимо оставлять в основании плотин растительные грунты, так как в них могут встретиться неразложившиеся растения с корнями и ходы землеройных животных. Особенно опасны корни растений с горизонтальным расположением, имеющие направление от ВБ к НБ. По сгнившим корням с большими скоростями потечет вода. Неизбежный вымыв грунта основания может привести к деформациям плотины с катастрофическими последствиями. Менее опасно оставлять в основании глубоко идущие вертикальные корни, так как в этом случае при разложении корней могут быть только вертикальные осадки, не влияющие на устойчивость плотины. Считается, что вертикально расположенные корни, равномерно распределенные по основанию и составляющие до 15% общей площади основания, можно не удалять из него без ущерба для работы ГТС. Если основание сложено из грунтов с водорастворимыми солями (более 6% по весу), необходимы исследования, которые учитывают степень выщелачивания грунта во времени и позволяют решить вопрос о мероприятиях для предотвращения их выщелачивания или снижения его до безопасных пределов.

Торф может быть оставлен в основании плотин при степени разложения не менее 50%, но в этом случае дается техническое обоснование, подтверждающее устойчивость плотины, следует учитывать повышенную осадку его при определении отметки гребня плотины. Иногда в качестве основания, когда выторфовывание и использование привозных минеральных грунтов усложняет процесс строительства, например, дамб обвалования, приходится использовать болотные отложения. Сущность метода в регламентации режима загрузки слабого основания (скорости отсыпки) в соответствии с увеличением прочности грунтов основания под воздействием массы отсыпаемой насыпи. Применяются также технологии строительства и методы расчёта дамб обвалования с напором до 3 м из торфа со степенью разложения более 25%, что позволяет значительно расширить диапазон использования местных грунтов и сократить транспортировку минеральных грунтов.

Повышенная водопроницаемость грунтов в основании не является препятствием для возведения на них плотин. Применение ПФУ позволяет локализовать повышенную проницаемость грунтов основания. Сопряжение их с основанием осуществляется без глубокой врезки. Наиболее сложно возведение плотин на просадочных и закарстованных основаниях. Лессовые основания, обладающие ярко выраженными просадочными свойствами, не являются благоприятными для устройства на них плотин. Однако, если будут приняты меры по улучшению свойств лессовых грунтов, их можно использовать в основании. Одна из мер ликвидации просадочности лессовых грунтов — предварительное замачивание основания.

Основанием дамб могут быть любые минеральные грунты и торф со степенью разложения не менее 50%. При подготовке основания под дамбы грунт вспахивают, а при наличии неразложившихся включений растительный слой частично снимают. Контурные дамбы отсыпают непосредственно на основание, с которого по ширине дамбы (3...3,5)H снимают растительный слой.

2.2. Общие свойства и строительная классификация грунтов

В строительной практике **грунтами** называют различные горные породы, используемые в качестве оснований для сооружений или как строительные материалы. И в том и в другом случае необходимо знать физико-механические свойства грунтов и их изменение при приложении к ним внешних нагрузок и тем самым правильно оценить работу сооружения. Как дисперсные системы грунты имеют ряд характерных особенностей наиболее заметных при насыщении их водой. Все грунты, применяющиеся в строительстве, делятся на: **скальные, полускальные и нескальные**. Фильтрационные воздействия потока в этих грунтах имеют свои особенности. К скальным грунтам относят массивно-кристаллические или цементированные горные породы с жесткой связью между зёрнами. По происхождению **скальные** грунты бывают *изверженные* и *осадочные*. Наличие жестких связей придает им монолитность, особенно положительное качество для оснований, так как с ГТС, возводимые на таких грунтах не дают осадки.

Нескальные грунты представляют собой агрегатную систему, состоящую из трех основных частей: минеральная часть, образующая грунтовый скелет (твердая фаза), вода, частично или полностью заполняющая поры грунта (жидкая фаза), и воздух, заполняющий поры грунтового скелета (газообразная фаза). Свойство грунта определяется количественным соотношением отдельных фаз и особенностью взаимодействия их с другими фазами. Если грунт в своем составе имеет все три фазы, то его называют трехфазным. Если же все поры грунтового скелета заняты водой, то такой грунт называют двухфазным. При отсутствии воды в порах твердой фазы грунт следовало бы считать двухфазным, но обычно его считают однофазным, учитывая, что газообразная фаза мало влияет на механические свойства грунта. Однако в естественных условиях такой грунт не встречается, так как вследствие гигроскопичности твердой фазы в нем всегда будет содержаться некоторое количество воды, поглощенное из паров воздуха

Поведение грунтов под нагрузкой, в особенности в присутствии воды, будет ли это насыпь земляной плотины или ее основание, зависят от ряда физико-механических характеристик, которые можно разделить на основные и производные. Основные характеристики, к числу которых относятся удельный вес, объемный вес и весовая влажность определяют в лабораторных или полевых условиях на образцах исследуемого грунта, а производные вычисляют по соответствующим формулам с использованием основных характеристик.'

Основанием **строительной классификации нескальных грунтов** служат два признака: содержание частиц различной крупности и консистенции. В соответствии с этим все грунты можно разделить на два вида. К первому относятся крупнообломочные и песчаные грунты, а ко второму – глинистые. Грунты первого вида почти не обладают сцеплением, в то время как в грунтах второго вида оно является преобладающим. Различно и влияние воды на поведение грунтов. Свойство песчаных грунтов не изменяется при переходе от однофазной к многофазной системе; на глинистые же грунты этот переход существенно влияет, и они из твердого состояния переходят в пластичное, в результате чего изменяются количественные значения физико-механических характеристик.

К крупнообломочным грунтам относят скопления несцементированных и не имеющих между собой сцепления частиц, при содержании более 50% по весу обломков кристаллических или осадочных пород с размерами частиц более 2 мм. К песчаным грунтам относят сыпучие в сухом состоянии минеральные частицы, содержащие менее 50% по весу частиц крупнее 2 мм, причем предполагается, что число пластичности для этих грунтов $W_n < 1$. Крупнообломочные и песчаные грунты в зависимости от зернового состава делятся на виды, характеристика которых приведена в таблице 2.1. При умеренной влажности песок приобретает небольшую связность, вызываемую поверхностным натяжением воды. Учитывая, что грунт в естественном состоянии состоит из частиц различного размера и учесть разнообразие частиц практически невозможно, их объединяют во фракции.

Таблица 2.1

Виды крупнообломочных и песчаных грунтов

Наименование грунтов	Диаметр частиц, мм	Количество частиц крупнее указанного размера, в % от веса сухого грунта
Крупнообломочные грунты		Более
Щебенистые	10	50
Дресвяной и гравийный	2	50
Песчаные грунты		Более
Песок гравелистый	2	25
крупный	0,5	50
средней крупности	0,25	50
мелкий	0,1	75
пылеватый	0,1	Менее 75

Примечание. Для установления наименования грунта по таблице последовательно суммируются проценты содержания частиц исследуемого грунта: сначала крупнее 10 мм, затем крупнее 2 мм, далее крупнее 0,5 мм и т. д. Наименование грунта принимается по первому удовлетворяющему показателю в порядке расположения наименований в таблице.

Их распределение, выраженное в процентах от веса исследуемого образца, называется гранулометрическим составом (табл. 2.2 и таблицы П1.1 в приложении П1).

Таблица 2.2

Примеры табличного гранулометрического состава некоторых грунтов

Наименование грунта	Содержание в % (по весу) частиц крупностью в мм									
	≥ 2	2...	1...	0,5...	0,25...	0,1...	0,05...	0,01...	0,005...	<0,001
		1	0,5	0,25	0,1	0,05	0,01	0,005	0,001	
Суглинок	0,0	4,5	4,7	15,7	13,5	29,0	20,0	10,0	1,4	1,2
Супесь	5,0	3,0	25,0	27,0	20,0	8,0	8,0	3,0	1,0	Нет
Песок	24,6	17,8	12,2	17,0	15,0	10,9	2,3	0,2	Нет	Нет

В практике гранулометрический состав грунтов часто изображают графически в виде суммарных кривых (рис. П1.2 в приложении П1), используя их для определения ряда характеристик. Например, крупнообломочные и песчаные грунты принято характеризовать их коэффициентом неоднородности (разнозернистости) η :

скелета имеется и свободная вода, поведение глинистых грунтов сходно с поведением вязких жидкостей. По мере уменьшения влажности глинистый грунт переходит в пластичное состояние, а затем и в твердое. Этот процесс обратим. Примеси к чистым глинам более крупных частиц изменяют свойство грунта и по мере увеличения их содержания приближают к свойствам песчаных грунтов. В этом случае и название грунта меняется: глины, суглинок, а затем супесь.

Оценку глинистых грунтов производят по числу пластичности, представляющему разность весовых влажностей, выраженных в процентах, соответствующих двум состояниям грунта: на границе текучести и на границе раскатывания:

$$W_n = W_T - W_p, \quad (2.2)$$

где W_T — предел текучести — такое состояние грунта, когда он находится на границе перехода из пластичного в текучее состояние;

W_p — предел раскатывания, или предел пластичности, — такое состояние грунта, когда он находится на границе перехода из твердого в пластичное состояние.

Глинистые грунты в зависимости от числа пластичности подразделяются на виды (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Виды глинистых грунтов

Наименование глинистых грунтов	Число пластичности W_n	Содержание глинистых частиц, % по весу
Супесь	$1 < W_n < 7$	3...10
Суглинок	$7 < W_n < 17$	10...30
Глина	$W_n > 17$	Более 30

2.3. Физико-механические свойства грунтов

Существенной частью исследований грунтов является определение содержания растительных остатков (торф, перегной и т.п.). Если количество

таких остатков не превышает 10% по отношению к весу высушенной минеральной части (при температуре $100^{\circ}\dots 105^{\circ}$), считают, что грунты имеют примесь органических веществ. Если же количество остатков находится в пределах 10...60%, грунт считают заторфованным, а если растительный остаток превышает 60 % — торфом.

На свойство грунта большое влияние оказывает вода, которая может быть в парообразном, твердом (в виде льда) состоянии, а также гигроскопическая и пленочная вода, образующаяся на поверхности частиц в виде пленок различной толщины и прочно с ними связанная, и, наконец, свободная вода. Грунты в естественном залегании всегда содержат некоторое количество воды, а в земляных плотинах, исходя из специфических условий работы, в большей части насыщены водой до полной влагоемкости. Поэтому наибольший интерес представляет свободная вода, которая делится на гравитационную и капиллярную. Гравитационная вода перемещается по порам грунта, под действием силы тяжести, передвижение же капиллярной воды связано с поверхностным натяжением. Капиллярная вода оказывает влияние на работу земляных плотин, и ее приходится учитывать при расчете и конструировании поперечного профиля. Средние значения **высоты поднятия капиллярной воды** в сантиметрах в зависимости от грунтов следующие: песок крупный — 5...10 см, средний — 10...30 см, мелкий — 30...60 см; супесь — 60...120 см; суглинок — 120...160 см; глина — до 400 см.

Одной из основных характеристик грунтов при фильтрационных расчётах является водопроницаемость, т.е. способность фильтровать (пропускать) через поры воду. Показателем её служит **коэффициент фильтрации k** , измеряемый в см/с или м/сут (табл. 2.5).

Среднее значение коэффициентов фильтрации для нескальных грунтов

Наименование грунтов	Коэффициент фильтрации, k	
	см/с	м/сут
Галечник промытый	0,1 и выше	80 и выше
Галечник с песком	0,1...0,2	80...17
Песок крупнозернистый	0,05...0,01	40...8
Песок мелкозернистый и супесь рыхлая	0,005...0,001	4...0,8
Пески глинистые	0,002...0,0001	1,5...0,08
Супесь плотная	0,0005...0,0001	0,4...0,08
Суглинок	0,0001 и ниже	0,08 и ниже
Глина	0,000001 и ниже	0,0008 и ниже

Коэффициент фильтрации меняется в зависимости от температуры: чем она выше, тем больше его значение. В фильтрационных расчётах обычно такими изменениями пренебрегают и считают его постоянным.

Удельный вес ($\gamma_{уд}$) – отношение веса частиц грунта, высушенных при температуре $100^0...105^0$ до постоянного веса, к их объему. Он зависит от минералогического состава и наличия в грунте органических веществ. Грунты, применяемые в земляных сооружениях, обычно имеют более или менее постоянный удельный вес, если они не содержат растительных остатков (табл. 2.6).

Таблица 2.6

Удельный вес различных грунтов

Вид грунта	Удельный вес, т/м ³	Возможные отклонения	
		т/м ³	%
Песок	2,66	±0,010	±0,36
Супесь	2,70	±0,017	±0,63
Суглинок	2,71	±0,020	±0,74
Глина	2,74	±0,027	±0,99

Объемным весом грунта (скелета) ($\gamma_{ск}$) называют вес его в единице объема. Так как грунт в обычных условиях применения относится к трехфазной системе, объемный вес его не остается постоянным, а меняется с изменением

влажности. Исходя из этого различают два вида объемного веса: сухого и влажного грунта. Объемный вес сухого грунта $\gamma_{ск}$, когда он высушен до постоянного веса при температуре $100^0 \dots 105^0$ определяют по формуле:

4.3.1. КРЕПЛЕНИЕ ИЗ КАМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ	99
КАМЕННАЯ НАБРОСКА.....	100
КРЕПЛЕНИЕ ПО ТИПУ МОСТОВОЙ.	102
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ ПЛИТЫ.....	106
4.3.4. ГРАНИЦЫ И УПОРЫ КРЕПЛЕНИЯ ВЕРХОВОГО ОТКОСА.....	118
4.3.5. КРЕПЛЕНИЕ НИЗОВОГО ОТКОСА ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН И ДАМБ	123
НИЗОВОЙ ОТКОС ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН ПОДВЕРЖЕН ВОЗДЕЙСТВИЮ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ И ВЕТРА; ДЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ ИХ РАЗРУШАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ПРЕДУСМАТРИВАЕТСЯ КРЕПЛЕНИЕ, ИЗ КОТОРОГО НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЕНЫ: ЗАЛУЖЕНИЕ, ДЕРНОВОЕ И ГРАВИЙНО-ГАЛЕЧНИКОВОЕ ПОКРЫТИЯ. САМЫМ ПРОСТЫМ И ДЕШЕВЫМ СПОСОБОМ КРЕПЛЕНИЯ ОТКОСОВ ЯВЛЯЕТСЯ СПЛОШНОЕ ЗАЛУЖЕНИЕ ИЛИ ПОКРЫТИЕ ИЗ РУЛОННЫХ ГАЗОНОВ, Т. Е. ИСКУССТВЕННО СОЗДАННЫЙ ДЕРНОВЫЙ ПОКРОВ ЗА СЧЕТ ПОСЕВА МНОГОЛЕТНИХ ТРАВ. В ТЕХ СЛУЧАЯХ, КОГДА ГРУНТ ОТКОСА МАЛО ПРИГОДЕН ДЛЯ ПРОИЗРАСТАНИЯ ТРАВ (НАПРИМЕР, ПРИ ГЛИНИСТЫХ ИЛИ ПЕСЧАНЫХ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИНАХ), ПО ПЛОСКОСТИ ОТКОСА ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАСЫПАЮТ СЛОЙ РАСТИТЕЛЬНОЙ ЗЕМЛИ, А ПО НЕМУ ВЫСЕВАЮТ СЕМЕНА МНОГОЛЕТНИХ ТРАВ. НА КРУТЫХ ОТКОСАХ, ОСОБЕННО КОГДА ОНИ СЛОЖЕНЫ ИЗ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ, СЛОЙ РАСТИТЕЛЬНОЙ ЗЕМЛИ МОЖЕТ СПОЛЗАТЬ. ЧТОБЫ ЭТОГО НЕ СЛУЧИЛОСЬ, УСТРАИВАЮТ УГЛУБЛЕНИЯ - БОРОЗДЫ, НАРЕЗАЕМЫЕ ПАРАЛЛЕЛЬНО БРОВКЕ ОТКОСА (РИС. 4.30). НЕСМОТРЯ НА ПРОСТОТУ И ДОСТУПНОСТЬ СПОСОБА КРЕПЛЕНИЯ НИЗОВЫХ	

ОТКОСОВ СПЛОШНЫМ ЗАЛУЖЕНИЕМ, ПОСЛЕДНЕЕ НАХОДИТ ОГРАНИЧЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ И МОЖЕТ БЫТЬ РЕКОМЕНДОВАНО ТОЛЬКО ДЛЯ ПЛОТИН НЕБОЛЬШОЙ ВЫСОТЫ. ДЕЛО В ТОМ, ЧТО ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОЧНОГО ДЕРНОВОГО ПОКРОВА, СПОСОБНОГО ПРОТИВОСТОЯТЬ РАЗРУШАЮЩЕМУ ДЕЙСТВИЮ АТМОСФЕРНЫХ ФАКТОРОВ, ТРЕБУЕТСЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОЕ ВРЕМЯ. ДО ПОЯВЛЕНИЯ В РЫХЛОМ ЗАЩИТНОМ РАСТИТЕЛЬНОМ СЛОЕ ПРОЧНОЙ КОРНЕВОЙ СИСТЕМЫ, КОТОРАЯ СОБСТВЕННО И ПРИДАЕТ ПРОЧНОСТЬ ПОКРЫТИЮ, ОБИЛЬНЫЕ ДОЖДИ И ЛИВНИ, А, СЛЕДОВАТЕЛЬНО, И РУЧЕЙКИ, СТЕКАЮЩИЕ ПО ОТКОСУ, МОГУТ НЕ ТОЛЬКО СМЫТЬ СЛОЙ РАСТИТЕЛЬНОЙ ЗЕМЛИ, НО И ДЕФОРМИРОВАТЬ ГРУНТ ОТКОСА..... 123

где W — весовая влажность грунта.

В производственных условиях, когда говорят об объёмном весе грунта γ_{gp} , подразумевают вес его в условиях естественной влажности (табл. 2.7).

Таблица 2.7

Осреднённые значения объёмного веса грунтов естественной влажности

Наименование грунта	Коэффициент пористости, ε	Объёмный вес $\gamma_{gp}, \text{Т/м}^3$
---------------------	---------------------------------------	--

Глина	0,5	1,8...2,10
	0,6	1,70...2,10
	0,8	1,70...1,90
	1,1	1,60...1,80
Суглинок	0,5	1,80...2,05
	0,7	1,75...1,95
	1,0	1,70...1,80
Супесь	0,5	1,70...2,00
	0,7	1,5...1,90
Песок:		
	пылеватый	1,80...2,05
	мелкий маловлажный	1,6...2,00
	средней крупности	1,60...1,90
	крупный и гравелистый	1,75...1,85
Торф		0,55...1,02

Для грунта, полностью насыщенного водой, т.е. когда он залегает ниже уровня грунтовых вод, объёмный вес по закону Архимеда, уменьшается на величину вытесненной твёрдыми частицами воды. Объёмный вес грунта, погруженного в воду, может быть определён по одной из двух формул, в зависимости от известных исходных параметров:

$$\gamma_{zp}^0 = (\gamma_{yd} - 1) (1 - n), \quad (2.5)$$

$$\gamma_{zp}^0 = (\gamma_{yd} - \gamma_v) / (1 + \varepsilon), \quad (2.6)$$

где γ_{zp}^0 – объёмный вес грунта, взвешенного в воде; γ_v – удельный вес воды; n – пористость, ε - коэффициент пористости грунта. Для упрощения расчётов часто принимают $\gamma_{zp}^0 = 1$, что соответствует случаю пористости грунта, близкой к 40%. **Пористость** - объём, занимаемый сухим грунтом, делится на две части: одну часть занимают твёрдые частицы, а другую — поры. Пористостью называют отношение объема пор ко всему объему грунта, выраженное в долях объема и в процентах. Пористость грунта непостоянная величина и зависит от плотности его укладки, поэтому при расчётах пользуются показателем плотности грунта – коэффициентом пористости ε , представляющим отношение объема пор к объёму твёрдых частиц грунта. [9, 26].

3. ОЦЕНКА ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПЛОТИНУ И ДАМБУ

3.1. Волновое воздействие на откосы

На поверхности водохранилищ, когда появляется ветер, возникают волны. Они могут быть вынужденными, если все время находятся под воздействием ветра, и свободными (называемыми также волнами зыби), если распространяются после прекращения ветра или при выходе из зоны его действия. Ветровые волны производят механическое воздействие на откос земляной плотины. Для количественной оценки этого воздействия необходимо знать параметры волн (рис. 3.1) и условия, их определяющие: высота волны h — вертикальное расстояние между вершиной и подошвой волны; длина волны λ — горизонтальное расстояние между двумя смежными вершинами волн; крутизна волны $\varepsilon = h/\lambda$ - отношение высоты волны к ее длине; гребень волны — часть волны, расположенная выше статического уровня; средняя волновая линия — горизонталь, делящая высоту волны пополам.

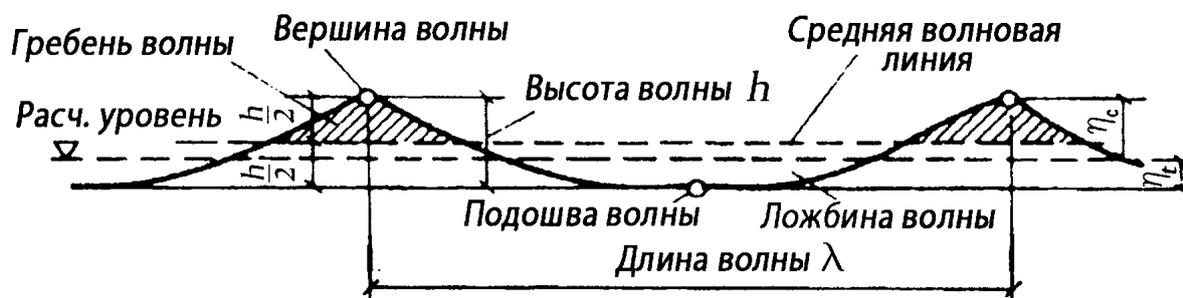


Рис. 3.1. Профиль и элементы ветровых волн

Под действием ветра на водной поверхности водохранилищ возникает сложный процесс волнообразования. Интенсивность волнения на открытой водной поверхности зависит от скорости ветра, продолжительности его действия и разгона волны, а на развитие и распространение волны влияют глубина водоема, шероховатость дна в направлении разгона. Исходя из глубины водоема H , различают глубоководные участки, когда $H > \lambda/2$, где дно не влияет на параметры волны, и мелководные, когда $H < \lambda/2$. Волны, возникающие на водной поверхности при $H > \lambda/2$ имеют колебательный

характер. По мере уменьшения глубины воды происходит деформация волн, высота и длина их уменьшаются. При подходе к откосу на некоторой глубине волны разрушаются. После этого начинается поступательное движение — накат волны на откос, а затем обратное движение вниз.

При волновых воздействиях на откосы земляных плотин и дамб параметры волн обычно определяют для двух уровней. Наиболее высокие уровни воды в водохранилище используют для определения высоты вкатывания волн и последующего расчёта толщины покрытия откоса. Минимальные уровни определяют нижнюю границу крепления откоса. Длину разгона волны при любых расчётных уровнях измеряют по прямой от оси плотины до противоположного берега. Направление разгона принимают по 8 основным румбам и наибольшей протяжённости открытой водной поверхности (рис. 3.2). При наличии по линии разгона местного резкого сужения длина разгона L принимается равной $L \approx 5B$, где B – минимальная ширина водоёма.

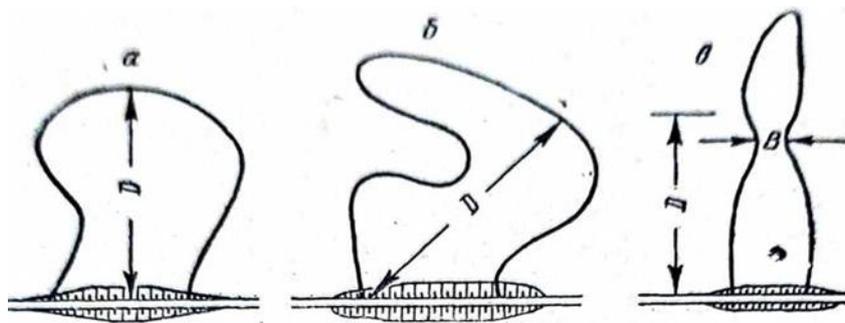


Рис. 3.2. Контуры водохранилищ при определении длины ветрового разгона: a — симметричное; b — несимметричное; b — вытянутое; $D = L$ – длина водоёма

Эта зависимость действительна при условии, если B не больше пятикратной длины волны однопроцентной обеспеченности, а вычисленное значение B не меньше длины разгона до сужения. Скорость ветра по длине разгона принимают постоянной при колебаниях в пределах $\pm 10\%$, а также при значениях скоростей меньше 25...30 м/с и длине разгона менее 100 км.

Скорость ветра, определяющая параметры волн, является величиной переменной во времени, подчиняющейся закону вероятности. Отсюда по

наблюдениям можно установить обеспеченность того или иного ее значения. При определении волновых воздействий на ГТС обеспеченность скорости ветра принимается:

для сооружений I и II классов.....2% (1 раз в 50 лет)
 для сооружений III и IV классов.....4% (1 раз в 25 лет),
 а при ФПУ – 50%.

В целях единого подхода скорость ветра при расчете волновых воздействий принимается над уровнем водоема на одной и той же высоте, равной 10 м (V_{10}). Скорость ветра, измеренная на другой высоте (V_H), приводят к скорости ветра на высоте 10 м по формуле

$$V_{10} = k_w V_H, \quad (3.1)$$

где k_w - коэффициент приведения, принимаемый в зависимости от высоты H .

Таблица 3.1

Значения коэффициента k_w

$H, \text{ м}$	2	6,5	8	10	12	17	28
k_w	1,25	1,05	1,03	1,00	0,98	0,94	0,89

Элементы ветровых волн могут быть определены путём непосредственных наблюдений за их образованием на поверхности водоема или получены путем вычислений по формулам. Второй способ более универсальный, так как позволяет делать прогнозы волнообразований на проектируемых водохранилищах. Для определения элементов волн на открытой водной поверхности широкое распространение в проектной практике получили формулы Н. А. Лабзовского, А. П. Браславского и др. [9, 11, 13, 21].

Для определения высоты наката волны на верховой откос плотины необходимо знать коэффициент заложения откоса m_h в зоне наката и тип крепления

откоса. **Высота наката волны** на верховой откос $h_{run\ 1\%}$ определяется по формуле

$$h_{run\ 1\%} = k_r k_p k_{sp} k_{run} k_j k_\alpha h_{1\%}, \quad (3.4)$$

в которой различные коэффициенты определяются следующим образом:

Значения коэффициентов k_r и k_p устанавливаются в зависимости от типа крепления по таблице 3.2.

Таблица 3.2

Значения коэффициентов k_r и k_p

Тип крепления откоса	Относительная шероховатость крепления $r/h_{1\%}$	Коэффициент k_r	Коэффициент k_p
Бетонные (железобетонные) плиты	-	1	0,9
Гравийно-галечниковое, каменное или крепление бетонными (железобетонными) блоками	Менее 0,002	1	0,9
	0,005...0,01	0,95	0,85
	0,02	0,9	0,8
	0,05	0,8	0,7
	0,1	0,75	0,6
	Более 0,2	0,7	0,5

Примечание. Характерный размер шероховатости r (м) следует принимать равным среднему диаметру материала крепления откоса (D_{cp}) или среднему размеру бетонных (железобетонных) блоков.

Значение коэффициента k_{sp} устанавливается в зависимости от скорости ветра и коэффициента заложения верхового откоса в месте наката волны по таблице 3.3.

Значение коэффициента k_j устанавливается в зависимости от обеспеченности по накату j (в курсовом проекте можно принять $j = 1\%$) по таблице 3.4.

Таблица 3.3

Значение коэффициента k_{sp}

Значение коэффициента заложения откоса m_h	1...2	3...5	Более 5
Коэффициент k_{sp} при скорости ветра V_W , м/с:			
20 и более	1,4	1,5	1,6
10	1,1	1,1	1,2
5 и менее	1	0,8	0,6

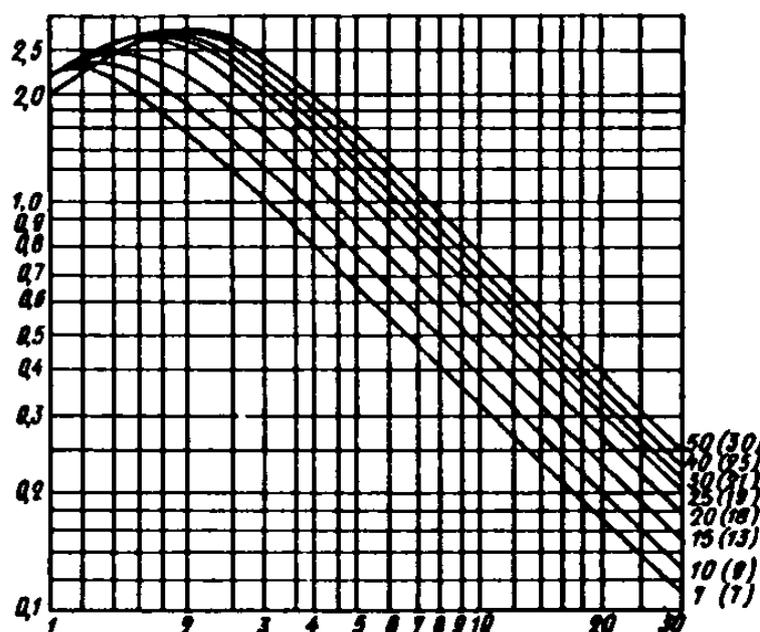
Примечание: m_h - коэффициент заложения верхового откоса. При скоростях ветра между 10 и 20 м/с и между 5 и 10 м/с значение коэффициента k_{sp} определяется интерполяцией.

Таблица 3.4

Значение коэффициента k_j

Обеспеченность по накату j , %	0,1	1	2	5	10	30	50
Коэффициент k_j	1,1	1	0,96	0,91	0,86	0,76	0,68

Значение коэффициента k_{run} устанавливается в зависимости от пологости волны, т.е. отношения $\bar{\lambda}_d/h_{1\%}$, и коэффициента заложения верхового откоса m_h по графику на рисунке 3.3.

Рис. 3.3. Графики для определения коэффициента k_{run} .

На рисунке стрелками показан ход определения коэффициента k_{run} ; при $m_h = 2,75$ и $\bar{\lambda}_d/h_{1\%} = 9$, $k_{run} = 1,34$

При подходе фронта волны к сооружению под углом α , град, со стороны открытой акватории значение коэффициента k_α , следует принимать по таблице 3.5. В курсовом проекте значение угла α следует принять равным 0° .

Таблица 3.5

Значение коэффициента k_α

Значение угла α , град	0	10	20	30	40	50	60
Коэффициент k_α	1	0,98	0,96	0,92	0,87	0,82	0,76

При определении основных средних параметров волн: высоты \bar{h} , длины $\bar{\lambda}_d$, периода \bar{T} и $h_{1\%}$ сначала определяются безразмерные параметры gL/V_w^2 и

gt/V_w , в которых $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, а t – длительность воздействия ветра в секундах (при отсутствии данных $t = 6 \text{ час} = 21600$ секунд). Далее по верхней огибающей графика на рисунке 3.3 определяются минимальные значения параметров $(g\bar{h}/V_w^2)$ и $(g\bar{\lambda}_d/V_w^2)$ для каждой пары параметров gL/V_w^2 и gt/V_w . Определение периода волны \bar{T} (в секундах) и средней длины волны $\bar{\lambda}_d$ (в метрах) выполняется по формулам, приведенным в соответствующих строках "Расчет" таблицы приложения П4.

Затем выполняется **проверка глубоководности водоема**. При этом если условие (3.5) выполняется

$$0,5 \bar{\lambda}_d \leq H_1 \quad (3.5)$$

где H_1 – глубина водоема, м (при НПУ: $H_1 = \nabla \text{НПУ} - \nabla \text{дна}$, при ФПУ: $H_1 = \nabla \text{ФПУ} - \nabla \text{дна}$, при УМО $H_1 = \nabla \text{УМО} - \nabla \text{дна}$), то водоем считается глубоководным и использование верхней огибающей графика рис. 3.3 является корректным. После проверки глубоководности водоема определяется средняя высота волны \bar{h} по формуле (3.6).

$$\bar{h} = (g\bar{h}/V_w^2) \cdot V_w^2 / g, \text{ м} \quad (3.6)$$

и высота волны обеспеченностью 1 % по формуле (3.7):

$$h_{1\%} = K_{1\%} \times \bar{h}, \text{ м.} \quad (3.7)$$

Величина коэффициента $K_{1\%}$ может быть принята для небольших водохранилищ, являющихся предметом проектирования в курсовом проекте, равной 2,06...2,08.

Для определения $h_{1\%}$ и $\bar{\lambda}_d$ волны для *глубоководной зоны* ($H_1 \geq 0,5 \bar{\lambda}_d$) может быть использован простой и достаточно достоверный расчёт по формулам Н. А. Лабзовского

$$h_{1\%} = 0,073 \cdot k \cdot V_w \cdot \sqrt{L \cdot h / \lambda}, \quad (3.8)$$

$$\bar{\lambda}_d = 0,073 \cdot k \cdot V_w \cdot \sqrt{L \cdot \lambda / h}, \quad (3.9)$$

где k – коэффициент, учитывающий интенсивность нарастания волны вдоль линии разгона, определяемый по зависимости

$$k = 1 + e^{-0,4L/V_w}, \quad (3.10)$$

h/λ – крутизна волны, устанавливаемая по зависимости

$$h/\lambda = \frac{1}{9 + 19e^{-14/V_w}}, \quad (3.11)$$

В формулах (3.8) – (3.11) длина разгона ветровой волны подставляется в километрах.

Для определения $h_{1\%}$ и $\bar{\lambda}_d$ волны для глубоководной зоны могут быть также использованы формулы В. Г. Андреенова

$$h_{1\%} = h = 0,0208 \cdot V_w^{\frac{5}{4}} \cdot L^{\frac{1}{3}}, \quad (3.12)$$

$$\bar{\lambda}_d = \lambda = 0,304 \cdot V_w \cdot L^{\frac{1}{2}}. \quad (3.13)$$

Формулы (3.12) и (3.13) целесообразно применять для водоёмов при скоростях ветра 12...20 м/с, $\lambda < H_l$ и $3 < L < 30$ км. Эти формулы могут также использоваться при других пределах применимости, так как при скоростях ветра более 12 м/с и длинах разгона до 3 км они дают результаты, более близкие к аналогичным величинам, определенным по СП [3, 4] (с их превышением до 10%).

Если в результате расчета окажется, что $H_l < 0,5\bar{\lambda}_d$, то есть будет иметь место *мелководная зона*, тогда элементы волн должны определяться при известных значениях \bar{h} , $\bar{\lambda}_d$ и \bar{T} в глубоководной зоне в зависимости от уклона дна (при этом различают два расчётных случая: $i \geq 0,002$ и $i \leq 0,001$), используя кривые 2 на рисунке 3.4 [10]. Для предварительной корректировки параметров волн в мелководной зоне можно воспользоваться графиками на рисунке 3.5, на котором приведены значения коэффициентов α и β .

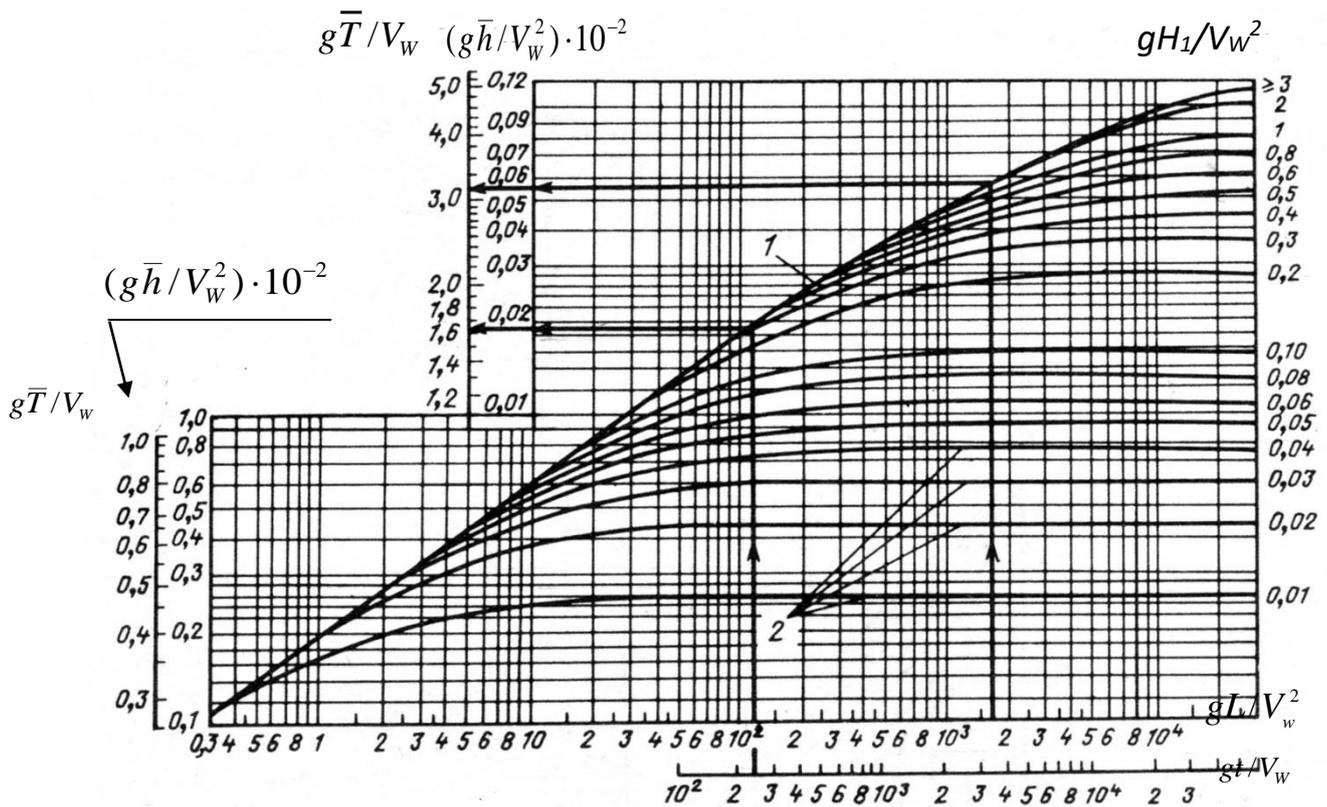


Рис. 3.4. Графики для определения элементов волн: 1 – огибающая для глубоководной зоны; 2 – графики для мелководной зоны. Ход определения безразмерных параметров $g\bar{T}/V_w$ и $(g\bar{h}/V_w^2) \cdot 10^{-2}$ показан стрелками (из двух пар значений этих параметров для дальнейшего расчета принимают меньшие)

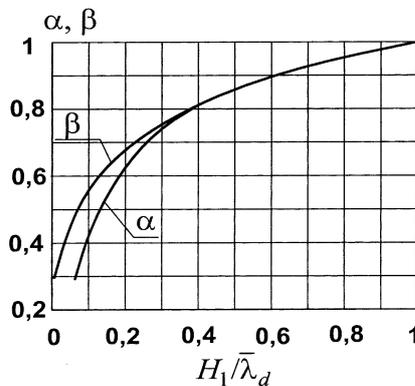


Рис. 3.5. Графики для определения коэффициентов α и β для расчета параметров волн в мелководной зоне

Тогда:

$$\bar{h}_{\text{мел}} = \beta \bar{h}, \quad (3.14)$$

$$\bar{\lambda}_{\text{мел}} = \alpha \bar{\lambda}_d. \quad (3.15)$$

Более точный расчёт параметров волн в пределах мелководной зоны должен производиться с учётом трансформации и рефракции волн на мелководье с

глубиной, постепенно изменяющейся вдоль фронтов и лучей волн. Этот расчет изложен в специальной литературе [6]. Коэффициент β , учитывающий влияние мелководья на высоту волн глубоководной зоны, можно определить и по таблице 3.6.

Таблица 3.6

Значение коэффициента β

H_l $/\bar{\lambda}_d$	0,01	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,0
β	0,25	0,43	0,56	0,70	0,83	0,96	1,0

Максимальная высота наката волны $h_{run1\%}$ на откос может быть найдена по упрощённой зависимости, рекомендуемой ранее СН 92-60 для предварительных расчётов, справедливой при $5 \geq m_h \geq 1,5$:

$$h_{run1\%} \approx h_{run} = \frac{2k_{ш}}{m_h} \cdot h_{1\%} \cdot \sqrt[3]{\frac{\bar{\lambda}_d}{h_{1\%}}}, \quad (3.16)$$

где $k_{ш}$ – коэффициент, принимаемый в зависимости от типа крепления откоса по таблице 3.7.

Таблица 3.7

Значение коэффициента $k_{ш}$ при определении наката волны

Тип крепления (покрытия) откоса	$k_{ш}$
Сплошное непроницаемое гладкое (асфальтобетон)	1,0
Бетонное	0,9
Мостовая (каменная кладка)	0,75...0,80
Наброска: из округлых камней (булыжник)	0,60...0,80
из рваного камня	0,55...0,65
из массивов	0,50...0,55

Из двух полученных отметок гребня плотины, подсчитанных соответственно для ФПУ и НПУ, окончательно принимается наибольшая с округлением в большую сторону до 0,1 м.

3.2. Определение отметки гребня плотины или дамбы над расчетным уровнем воды в верхнем бьефе

Поскольку глухие земляные плотины не допускают перелива воды через гребень, то он должен иметь гарантированный запас над расчетным статистическим уровнем воды (∇PY) (рис. 3.6) Отметку гребня плотины ($\nabla \text{Гр}$) и соответственно превышение гребня плотины над расчетным статическим уровнем воды в водоёме h_s определяют по формулам [4, 6, 16]:

$$\nabla \text{Гр} = \nabla \text{PY} + h_s. \quad (3.17)$$

$$h_s = \Delta h_{set} + h_{run\ 1\%} + a, \quad (3.18)$$

где Δh_{set} – высота ветрового нагона воды, м; $h_{run\ 1\%}$ – высота наката ветровых волн обеспеченностью 1%, м; a – конструктивный запас гребня, назначаемый в среднем не менее 0,5 м в зависимости от класса опасности ГТС (табл. 3.8) и учёта $h_{1\%}$ – высоты волны 1% обеспеченности (принимая как большую из сопоставляемых величин и $0,1h_{1\%}$), $\nabla \text{Гр}$ – отметка гребня плотины/дамбы, м.

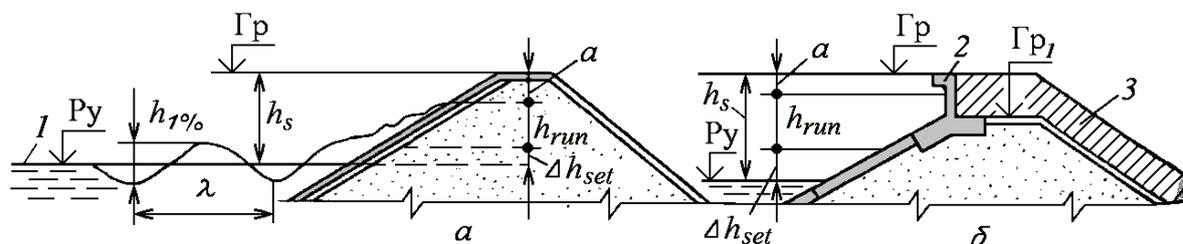


Рис. 3.6. Схема определения отметки гребня земляной плотины/дамбы: а – без парапета; б – с парапетом; 1 – расчетный уровень при НПУ и ФПУ; 2 – парапет; 3 – объем экономии грунта при установке парапета

Таблица 3.8

Учёт условий эксплуатации при назначении конструктивного запаса

a , м [6]

Условия эксплуатации	Класс сооружения			
	I	II	III	IV
Нормальные	1,0	0,7	0,5	0,4
Чрезвычайные	0,7	0,5	0,4	0,3

Конструктивный запас гребня плотины над верхней точкой наката волны на откос принимается как большее из значений: 0,5 м (если разрушение плотины может вызвать значительный ущерб) и $0,1h_{1\%}$, где $h_{1\%}$ – высота волны 1%-ой вероятности превышения. При высоте волн менее 5 м конструктивный запас $a = 0,5$ м.

Величину h_s определяют по формуле (3.18) для каждого из двух уровней водохранилища – НПУ и ФПУ. Для обоих значений h_s находят отметку гребня плотины и большую из них принимают в конструкции поперечного профиля. Для IV класса минимальный запас по отношению к НПУ составляет не менее 1...1,3 м. Обычно для небольших земляных плотин, проектируемых для малых ГЭС, это превышение составляет 2...2,5 м. В сейсмических районах к прибавляют высоту гравитационной волны $h_d = (0,4...0,76)(J - 6)$, м, где J – интенсивность землетрясения $J = 6...9$ баллов. В этом случае минимальное возвышение над уровнем воды в водохранилище обычно составляет около 5 м. Для крупных плотин в проекте может предусматриваться возвышение гребня и на 10 м.

Параметры ветровых волн, а также величины Δh_{set} и $h_{run 1\%}$ определяются в соответствии со СП 38.13330.2012 [6]. Исходные данные для расчета, параметры волн, проверка глубоководности водоема, расчеты высоты ветрового нагона и высоты наката волн приводятся в таблице П4.1. Определяющим параметром при вычислении превышения гребня над расчетным статическим уровнем воды является скорость ветра, для которой расчетная обеспеченность принимается: при НПУ для плотин I и II-го классов не менее 1%, при НПУ для плотин III и IV классов не менее 3%; при ФПУ для плотин всех классов равна среднемноголетней, наблюдаемой в сроки форсирования уровней. Следует отметить, что при малой разности двух уровней в ВБ, решающим будет расчет при НПУ, в то время как при значительной разности, возможен расчетный случай при ФПУ. Для земляных плотин, преимущественно низких, когда величины ветровой волны и нагона в

сумме дают меньше 0,5 м, превышение гребня плотины независимо от класса сооружения принимается не менее 0,5 м.

Снижение отметки гребня плотины и, как следствие этого, уменьшение объема насыпи можно получить, устраивая водонепроницаемый парапет, располагая его на бровке гребня плотины с верховой стороны (рис. 4.5а). В этом случае превышение h_s , определяемое из формулы (3.18), исчисляется от расчётного статического уровня до верха парапета. Отметка гребня плотины должна быть более чем на 0,3 м выше НПУ, но не ниже ФПУ. При этом высота парапета принимается в пределах 1,2...1,5 м [32].

Определение отметки гребня дамб производится, как и для земляных плотин по формулам (3.17, 3.18) [35 - 37]. При нахождении отметки гребня дамбы учитывают возможное повышение расчётных уровней воды за счёт стеснения водотока, определяемого для дамб высокого класса путём физического и математического моделирования. Превышение максимального уровня воды в водоеме или водотоке над расчётным уровнем следует принимать: для незатопляемых дамб — в зависимости от класса сооружений в соответствии с требованиями СП 58.13330, а для переливных дамб — по СП 100.13330. Таким образом для *незатопляемых* дамб за расчётную отметку уровня воды принимается отметка максимального паводкового уровня с учётом влияния обвалования (рис. 3.7). Расчётная обеспеченность уровней (расходов) в водоприёмнике польдерной системы принимается в зависимости от класса опасности ГТС по таблице 3.9. Конструктивный запас для дамб незатопляемых польдеров принимается 0,5 м. Строительные отметки гребней дамб назначаются выше расчётных на величину осадки их тела и основания.

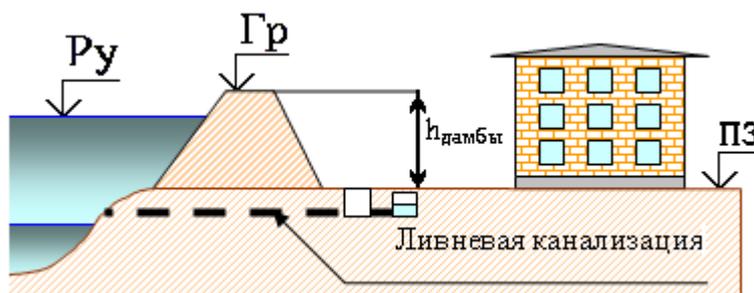


Рис. 3.7. Схема для определения параметров дамбы [38]

Для дамб *затапливаемых (летних)* полей, предназначенных для защиты территорий от затопления летними паводками, при использовании территории под сенокосы и пастбища за расчётную принимается 10% обеспеченность, при использовании под яровые культуры – 5%-ная. В более многоводные паводки, чем паводки расчётной обеспеченности, защищаемая территория затапливается, и поток воды обтекает обвалование поверх гребней, поэтому в формулу (3.17) подставляются данные, соответствующие горизонтам воды паводков расчётной обеспеченности, а конструктивный запас для гребня принимается равным 0,3 м.

Таблица 3.9

Ежегодная вероятность превышения расчётных максимальных уровней (расходов) водных объектов, %

Расчётные случаи	Расчётная обеспеченность (P%) для класса опасности сооружений			
	I	II	III	IV
Основной	0,1	1,0	3,0	5,0
Поверочный	0,01	0,1	0,5	1,0

Дамбы обвалования *затапливаемых* полей с регулируемой длительностью затопления (*весенние*) предназначены для достижения 2-х целей: сокращения длительности весеннего затопления и защиты от затопления летне-осенними паводками расчётной обеспеченности. Их проектируют так, чтобы сократить длительность затопления, поскольку чем выше гребни дамб, тем раньше на спаде половодья они выйдут из-под воды, и раньше появится возможность начать её откачку. Требуемое сокращение длительности весеннего затопления территории можно достичь различным сочетанием высоты ограждающих дамб и производительности насосной станции [35]. Оптимальным будет вариант, который потребует наименьшие приведённые затраты. За расчётную отметку гребня дамбы принимается большая из полученных по двум расчётам, используя для второго случая ту же формулу, что и для летних полей.

4. ДЕТАЛИ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН И ДАМБ

В основном тип земляных дамб, грунтов для их тела, ПФУ и конструкций креплений выбирают аналогично земляным плотинам.

4.1. Гребень

Гребень земляных плотин и дамб, как элемент насыпи, необходимый для придания поперечному профилю устойчивой трапецеидальной формы, одновременно может быть использован для устройства дороги. При разработке проектов инженерной защиты необходимо также предусматривать возможность использования гребня дамб обвалования для прокладки автомобильных и железных дорог. В этом случае ширину дамбы по гребню и радиус его кривизны следует принимать в соответствии с требованиями СП 34.13330 и СП 119.13330. Во всех других случаях ширину гребня дамбы следует назначать минимальной исходя из условий устойчивости дамбы, производства работ и удобств ее эксплуатации. Эксплуатационные дороги для сохранения продольного профиля дамб обвалования рекомендуется устраивать у их основания или на бермах внутри польдеров.

Если проезда по гребню нет, то ширину гребня принимают: не менее 4,5 м для плотин; 3 м для незатапливаемых дамб; 3...4,5 м для затапливаемых дамб. Если же по плотине/дамбе предусматривается проезд автотранспорта, ширину гребня принимают, исходя из проектируемой категории дороги. В соответствии с нормами автомобильные дороги в России делятся на пять технических категорий, в зависимости от хозяйственного значения дорог и размера среднесуточной интенсивности движения по ним (табл. 4.1 и 4.2) [25].

Таблица 4.1

**Соответствие функционального класса автомобильных дорог
классам и категориям автомобильных дорог, допустимые уровни
удобства движения автомобильных дорог [25]**

Функциональный класс	Класс автомобильной дороги	Категория автомобильной дороги
Основные магистральные автомобильные дороги	Автомагистраль	IA
	Обычная дорога	II, III
Второстепенные магистральные автомобильные дороги	Скоростная дорога	IB
	Обычная дорога	IV, II, III
Основные распределительные автомобильные дороги	Скоростная дорога	IB
	Обычная дорога	IV, II, III
Распределительные автомобильные дороги регионального значения	Обычная дорога	II, III, IV, IVA-р, IVБ-р
Местные автомобильные дороги, подъезды	Обычная дорога	III, IV, IVA-п, IVБ-п, VA, VB
Категорию IV на второстепенных магистральных и основных распределительных автомобильных дорогах допускается назначать на трудных участках горной местности, при капитальном ремонте и реконструкции.		

Таблица 4.2

Технические характеристики дорог [25]

Категория автодороги		Расчётная интенсивность движения (приведённых ед./сут.)
Автомагистраль	IA	Свыше 14000
Скоростная дорога	IB	Более 14000
Обычные дороги (нескоростные)	IV	Более 14000
	II	6001...14000
	III	От 2000 до 6000
	IV	От 400 до 2000
	V	Менее 200...400

Дороги для перевозок сельскохозяйственной продукции, для связи между населенными пунктами и административными центрами часто прокладывают через земляные плотины, устраиваемые на балках, небольших водотоках. В этих случаях ширина гребня плотины/дамбы назначается исходя из устройства дорог IV и V категорий. Для каждой категории дороги нормами установлена ширина земляного полотна, включающая в себя ширину проезжей части и ширину обочин (рис. 4.1).

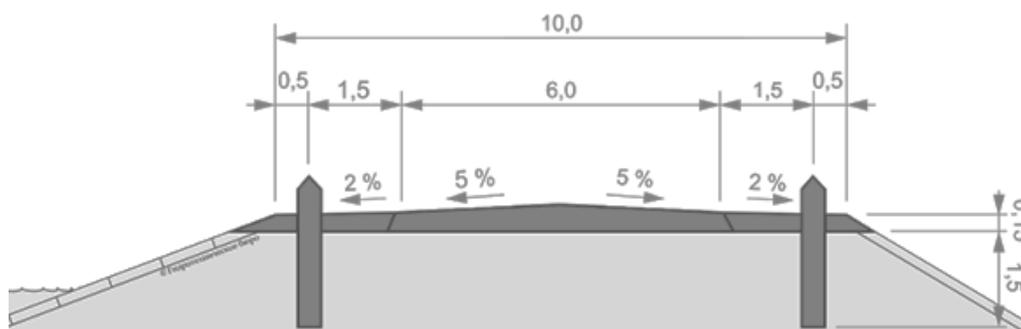


Рис. 4.1. Элементы поперечного профиля дороги IV категории

Основные параметры земляного полотна и проезжей части автомобильных дорог в соответствии с действующими нормативными документами даны в таблице 4.3 [10, 25].

Таблица 4.3

Параметры дорог [25]

Наименование	Единица измерения	Категория дорог				
		I	II	III	IV	V
Число полос движения	Шт.	4 и более	4 или 2	2	2	1
Ширина полосы движения	м	3,75	3,5...3,75	3,3,25...3,5	3...3,25	3,5...4,5
Ширина проезжей части	м	более 15	7,5	7,0	6	4,5
Ширина обочины	м	3,75	2...3	2...2,5	1,5...2	1...1,75
Ширина разделительной полосы	м	5	-	-	-	-

При техническом обосновании ширина гребня плотины может быть уменьшена за счет обочин: наименьшую ширину одной обочины в этом случае принимают для дорог I и II категорий — 2,0 м и для дорог остальных категорий - 1 м. При устройстве на гребне однопутной железной дороги — от 13 м, двухпутной железной дороги — от 15,5 м. Проезжая часть дороги укрепляется одеждой, в состав которой входят покрытие и основание.

Дорожная одежда на гребне плотины/дамбы должна соответствовать общим требованиям, предъявляемым к проезжей части дороги как транспортному сооружению [25]. Дорожные одежды могут состоять из одного или нескольких слоев (табл. 4.4).

Основные виды покрытий дорожных одежд [25]

Типы дорожных одежд	Основные виды покрытий	Область применения
Усовершенствованные покрытия		
Капитальные	Цементобетонные монолитные	На дорогах категорий IА, IБ, IВ, II, III
	Железобетонные, монолитные и сборные или из предварительно напряженного железобетона, армобетонные сборные и монолитные	
	Из асфальтобетонных смесей, в том числе щебеночно-мастичных	
Облегчённые	Из асфальтобетонных смесей	На дорогах категории IV
	Из органоминеральных смесей	
	Из щебеночных (гравийных) материалов, обработанных органическим вяжущим	
Переходные покрытия		
Переходные	Из щебеночно-гравийно-песчаных смесей	На дорогах категории IV
	Из грунтов и малопрочных каменных материалов, укрепленных вяжущими	
	Из грунтов, укрепленных различными вяжущими и местными материалами	
	Из булыжного и колотого камня (мостовые)	
Низшие	Из грунтов, армированных геосинтетическим материалом, укрепленных или улучшенных добавками	На дорогах V категории

Дорожные одежды могут состоять из одного или нескольких слоев (табл. 4.4). При наличии нескольких слоев дорожные одежды состоят из покрытия, основания и дополнительных слоев основания. По сопротивлению нагрузкам от автотранспортных средств и по реакции на климатические воздействия дорожные одежды подразделяют на одежды с жесткими покрытиями или слоями основания и нежесткие дорожные одежды.

При выборе вида покрытия следует учитывать, что дороги V категории с покрытиями низшего типа в большинстве случаев ограничивают проезд автомобилей весной, осенью и в период интенсивных дождей. Дорожные одежды и толщины отдельных слоев должны обеспечивать безопасность дорожного движения, прочность, надежность, долговечность и

морозоустойчивость всей конструкции. К жестким дорожным одеждам относятся одежды, имеющие: цементобетонные монолитные покрытия; асфальтобетонные покрытия на основаниях из цементобетона; сборные покрытия из железобетонных или предварительно напряженных железобетонных и армобетонных плит (рис. 4.2). Они работают как плита конечных размеров на упругом основании. Толщину бетонных покрытий назначают с учетом вида оснований, но не менее 18...22 см, соответственно для дорог IV...I категории [25]. Под сборные покрытия, укладываемые на песчаное основание, целесообразно устраивать сплошную прослойку из полотен геотекстиля по ГОСТ Р 56419 на всю ширину покрытия с запасом по 0,5 м с каждой стороны и выпусками шириной 0,75 м от поперечных швов покрытия на откосы. При ширине плит более 1,5 м допускается устройство прослоек из полос геотекстиля шириной не менее 0,75 м под швами и кромками покрытия. Песчаное основание дороги следует армировать объемными геоячейками, щебеночное (гравийное) и щебеночно/гравийно/песчаное — геоячейками и георешетками с гексагональными и прямоугольными ячейками по ГОСТ Р 56338.

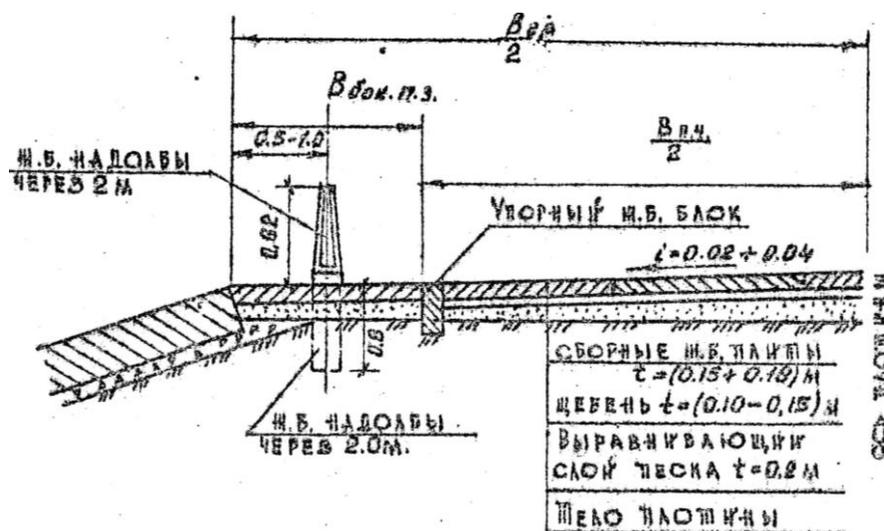


Рис. 4.2. Гребень плотины с покрытием из железобетонных плит

Нежесткая дорожная одежда работает как слоистая система бесконечных в плане размеров со сплошным покрытием на упругом основании. К нежестким одеждам относят покрытия: из смеси каменных материалов с органическими

вяжущими (асфальтобетон); с комплексным вяжущим из органических и минеральных веществ (битумные эмульсии, цемент); из каменных материалов (щебня, гравия, песка, шлака), обработанных и необработанных вяжущими веществами. Толщины конструктивных слоев в уплотненном состоянии следует принимать не менее 2-кратного размера наиболее крупной фракции применяемого минерального материала и не менее приведенных в таблице 4.5.

Таблица 4.5

Минимальные толщины конструктивных слоев дорожных одежд [25]

Материал покрытий и других слоев дорожных одежд	Минимальная толщина слоя, см
Асфальтобетон и щебеночно-мастичный асфальтобетон (с номинально максимальным размером зерен не более 11,2 мм)	4
Асфальтобетон и щебеночно-мастичный асфальтобетон (с номинально максимальным размером зерен более 11,2 мм)	Не менее 2,5-кратного номинального максимального размера зерен минерального материала
Щебеночные (гравийные) материалы, обработанные органическим вяжущим	8
Щебеночные (гравийные) материалы, обработанные неорганическим вяжущим	8
Щебеночные (гравийные) материалы, обработанные комплексным вяжущим	8
Щебень, обработанный органическим вяжущим по способу пропитки	8
Щебеночные и гравийные материалы, не обработанные вяжущим на песчаном основании	15
Щебеночные и гравийные материалы, не обработанные вяжущим на прочном основании (каменном или из укрепленного грунта)	8
Грунты, обработанные органическими или неорганическими вяжущими	10
Песок	20
Примечание - Минимальную толщину слоев из асфальтобетона рекомендуется округлять до 0,5 см в большую сторону	

Основание в одеждах наряду с передачей нагрузок на грунт тела плотины выполняет также роль выравнивающего, морозозащитного и дренирующего слоя. Материалом для основания служит крупный песок или гравий, имеющие большой коэффициент фильтрации. Воду из дренирующего слоя корытного и

полукорытного профиля отводят через дренажные воронки на откосы. Воронки располагают по обеим сторонам корыта в шахматном порядке, на расстоянии 4...6 м друг от друга. Сверху воронки покрывают дерном (травой вниз) для защиты от засорения дренирующего материала. В выходной части воронок на низовом откосе укладывают обратный фильтр, предупреждающий суффозионный вынос частиц грунта. В ВБ концевая часть воронки примыкает к обратному фильтру откосного покрытия.

В случае укладки каменных материалов на пылеватые связные грунты тела насыпи предусматривают прослойку из геосинтетических материалов (тканые и нетканые геотекстили, геокомпозиты по ГОСТ Р 56419 или прослойку толщиной не менее 10 см из песка (рис. 4.3), высевок, укрепленного грунта или других водоустойчивых материалов. Поперечные уклоны проезжей части принимают в зависимости от климатических условий по таблице 4.6. На гравийных и щебеночных покрытиях поперечный уклон принимают 25...30‰, а на покрытиях из грунтов, укрепленных местными материалами, и на мостовых из колотого и булыжного камня – 25...35‰. Для стока поверхностных вод проезжей части и обочинам дороги, проложенным по гребню плотины, придают двухскатный поперечный уклон.

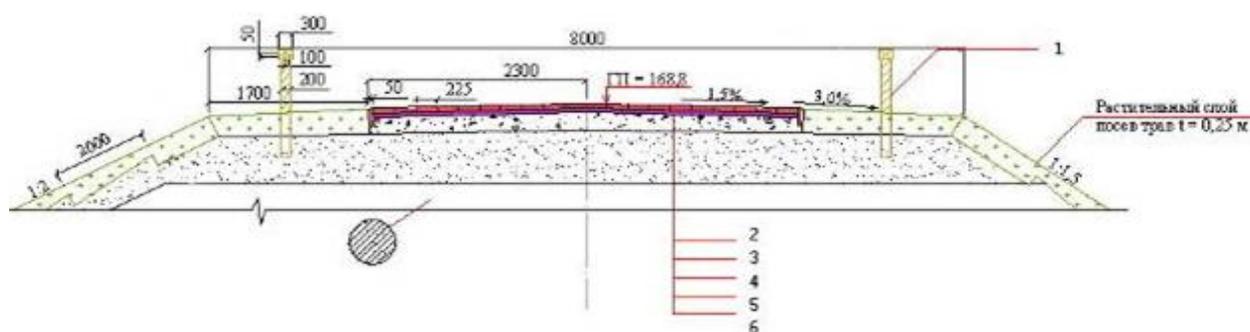


Рис. 4.3. Вариант конструкции гребня плотины на ООПТ: 1 – перильное ограждение; 2 – брусчатка бетонная 0,05 м; 3 – сухая цементно-песчаная смесь 0,05 м; 4 – подготовка из щебня 0,2 м; 5 – подготовка из песка 0,6 м; 6 – тело плотины – суглинок

Поперечные уклоны проезжей части гребня [25]

Категория дороги	Поперечный профиль проезжей части	Полоса движения	Поперечный уклон в различных дорожно-климатических зонах, ‰			
			I	I и III	IV	V
I	Односкатный на каждом направлении движения	Первая и вторая от разделительной полосы	15	20	20	15
		Третья и последующие от разделительной полосы	20	25	25	20
	Двускатный на каждом направлении движения	Первая и вторая от оси проезжей части	15	20	20	15
		Третья и последующие от оси проезжей части	20	25	25	20
II - IV	Двускатный	Каждая	15	20	20	15

Поперечные уклоны обочин при двускатном поперечном профиле следует принимать на 10...30‰ больше поперечных уклонов проезжей части. В зависимости от климатических условий и типа укрепления обочин предусматривают следующие значения поперечных уклонов: 30...40‰ — при укреплении с применением вяжущих; 40...60‰ — при укреплении гравием, щебнем, шлаком или замощении каменными материалами и бетонными плитами; 50...60‰ — при укреплении дернованием или засевом трав. Для районов с небольшой продолжительностью снегового покрова и отсутствием гололеда для обочин, укрепленных дернованием, может быть установлен поперечный уклон 50...80‰. При устройстве земляного полотна из крупно- и среднезернистых песков, а также из тяжелых суглинистых грунтов и глин уклон обочин, укрепленных засевом трав, допускается принимать равным 40‰.

У плотин и дамб высотой до 10 м при отсутствии дороги гребень можно покрывать дерном или другим местным материалом. Пример оформления гребня плотины исторических водных объектов (при реконструкции старинных

приусадебных прудов, плотин и дамб на ООПТ, музейных прудов и пр.) дорожным покрытием из булыжной мостовой с ограждающими деревянными столбами приведен на рисунке 4.4.

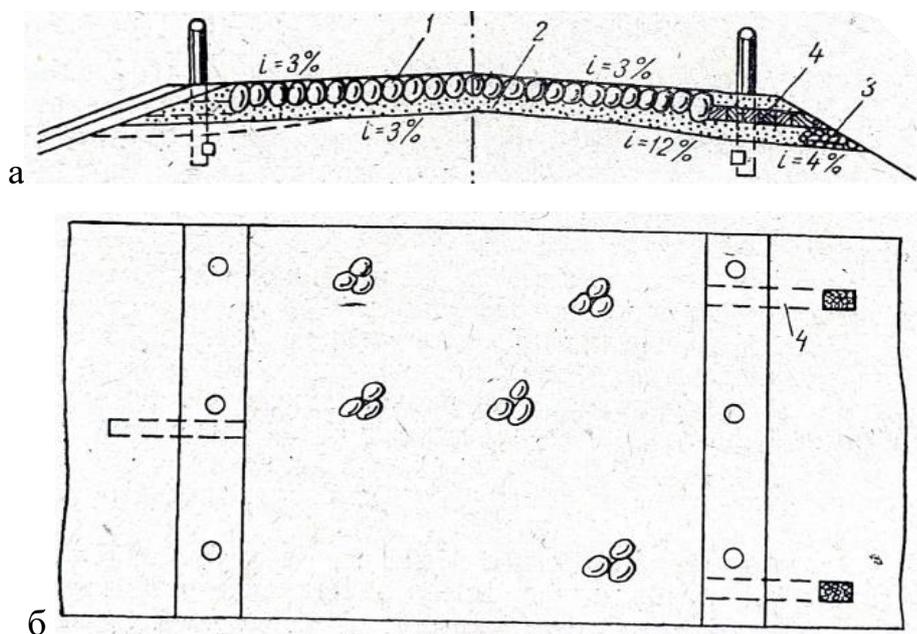


Рис. 4.4. Булыжная мостовая по гребню исторического подпорного ГТС [9]: а – гребень реставрируемой плотины; б – план восстанавливаемого участка; 1 – одиночная мостовая; 2 – слой крупного песка толщиной 25 см; 3 – обратный фильтр из щебня; 4 – дренажная воронка

Если плотина сложена из глинистых пучинистых грунтов, гребень следует защитить слоем из песчаного или гравийного грунта. Толщину защитного слоя, включая толщину покрытия, назначают в зависимости от глубины промерзания. Противопучинные мероприятия обычно не требуются: в районах с глубиной промерзания менее 0,6 м; при земляном полотне, рабочий слой которого при максимальной плотности и стандартном уплотнении по ГОСТ 22733 имеет коэффициент фильтрации не менее 0,5 м/сут; когда необходимая по условиям прочности толщина дорожной одежды превышает $\frac{2}{3}$ глубины промерзания [25]. Для устройства прослоек различного назначения в слоях современных дорожных одежд по СП необходимо применять геосинтетические материалы.

Вдоль гребня плотины/дамбы с обеих сторон устанавливают столбы, тумбы или другие ограждающие устройства из дерева, железобетона, камня, металла либо леерные ограждения. При устройстве водонепроницаемого

парапета или волноотбойной стенки (рис. 4.5) необходимо, чтобы гребень плотины был выше ФПУ и в то же время не менее чем на 0,3 м выше НПУ.

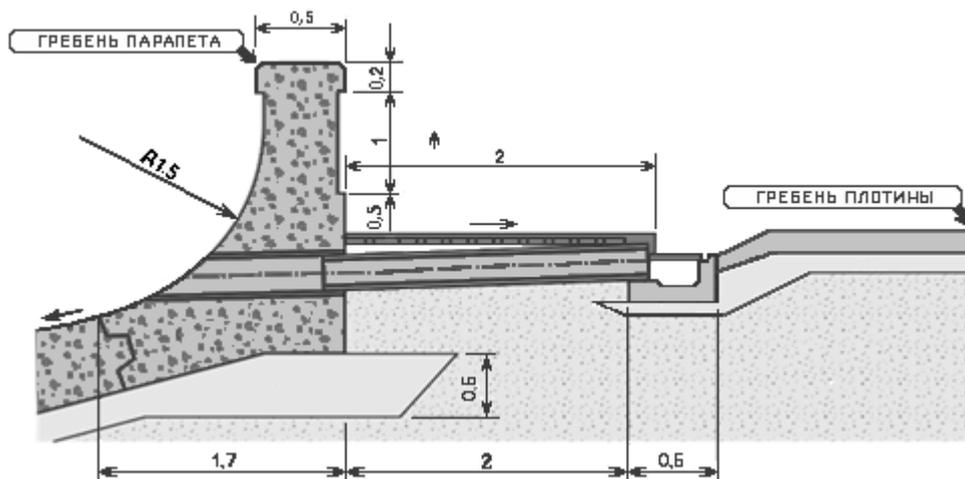


Рис. 4.5. Земляная плотина с парапетом на гребне [2]: 1 – парапет; 2 – тело плотины; 3 – сокращённый объём насыпи при устройстве парапета

Сокращение объема работ насыпи при варианте с парапетом особенно заметно для плотин сравнительно небольшой высоты. Сопоставляя затраты на устройство парапета и экономию от сокращения земляных работ, можно установить предельное значение высоты плотины, при которой с точки зрения капитальных затрат выгодно устраивать парапет. Конструктивное решение парапета может быть самым разнообразным. Наиболее пригодным материалом для него являются бетон, железобетон, бутовый камень, кирпич, а в некоторых случаях гранитные плиты (рис. 4.6). Исходя из применяемых материалов, парапет выполняют в монолитном или сборном варианте. Форма парапета также может быть самой различной: в простейшем случае это стенка прямолинейного очертания с возвышением над гребнем плотины 0,8...1,2 м. Заглубление парапета в грунт определяется его устойчивостью. Более совершенная форма парапета - криволинейная в плоскости, обращенной к водохранилищу. При такой форме всплески ветровой волны будут направлены от гребня плотины и эксплуатационные условия для проезжей части дороги будут более благоприятными.

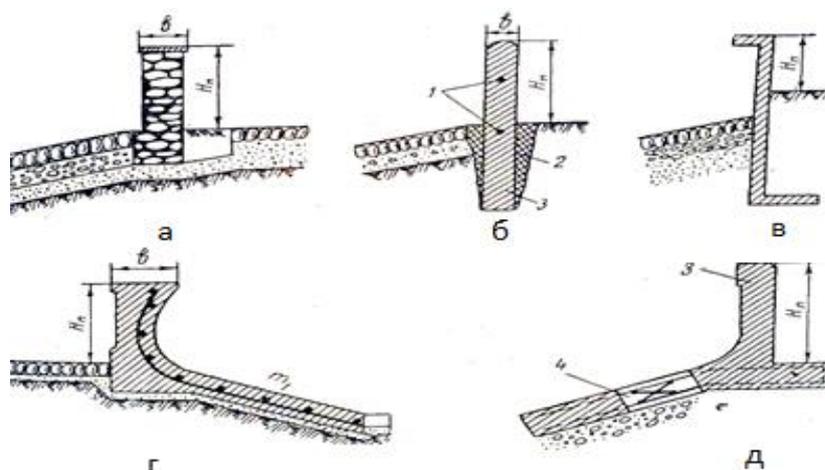


Рис. 4.6. Возможные конструкция парапетов: а – из бутовой кладки; б – из бетонных сборных плит; в – из сборных железобетонных плит; г – из монолитных армированных бетонных плит с криволинейной поверхностью; д – из сборных армированных бетонных плит; 1 – пироны; 2 – бетон; 3 –плита парапета; 4 – стык плиты и парапета

4.2. Откосы и бермы

Очертание профиля земляной плотины и дамбы зависит от грунтов, из которых возводится насыпь, её типа и высоты, характера грунтов основания и условий строительства. Исходя из гидростатического распределения давления грунта в земляной насыпи, следует, что чем она выше, тем более пологим должен быть откос. Проектное заложение откосов должно обеспечить устойчивость плотины или дамбы в течение всего эксплуатационного периода. Чтобы убедиться в устойчивости откосов, выполняют статические расчеты, в которых определяют коэффициент запаса. Во всех случаях, когда фактический коэффициент запаса оказывается равен или больше нормативного, ГТС считается устойчивым. В существующей методике расчета поперечный профиль плотины/дамбы должен быть известен, поэтому нужно предварительно задаваться заложением откоса, а затем расчетом подтвердить правильность принятого очертания плотины/дамбы и ее устойчивость. Для этого пользуются данными, полученными на основе опыта гидротехнического строительства. Ориентировочные значения коэффициента заложения откосов m

(рис. 4.7) в зависимости от высоты и вида грунта тела плотины/дамбы можно назначать по таблице 4.7.

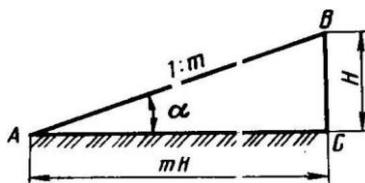


Рис. 4.7. К определению коэффициента заложения откоса $m = ctg\alpha$

Таблица 4.7

Коэффициенты заложения откосов плотин из грунтовых материалов (m_h и m_t) при различных грунтах и высоте плотины

Грунт тела плотины	Откосы при высоте плотины, м					
	4		7		10	
	верховой	низовой	верховой	низовой	верховой	низовой
Суглинок тяжелый	2	1,5	2,5	1,75	3	2,25
Суглинок пылевидный	2,5	2	3	2,25	3,25	2,75
Лесс	2,75	2,25	3,25	2,75	3,75	3
Супесь	2,75	2,25	3	2,5	2,25	2,75
Песок мелкозернистый	3	2,5	3,25	2,75	3,5	3
Песок разнозернистый	2,75	2,25	2,75	2,25	3	2,5
Песок крупнозернистый	2,5	2	2,5	2	2,75	2,25

Для высоких плотин такие рекомендации дать трудно, поэтому приходится в каждом отдельном случае учитывать возможное неблагоприятное сочетание факторов, от которых зависит устойчивость откоса, задаваться различными значениями коэффициентов откоса и решать задачу методом постепенных приближений. В ответственных сооружениях при назначении откосов используют данные лабораторных исследований или проводят натурные испытания. Откосы земляных плотин/дамб могут быть с постоянным (для низких), переменным (для средних и высоких) заложением (рис. 4.8). В плотинах с переменным заложением откосов объем насыпи значительно сокращается (на рис. 4.8б заштрихованная часть показывает излишний объем)

по сравнению с откосами постоянного заложения. Изменение коэффициента заложения откосов не должно быть резким: до 0,5 на каждом переломе.

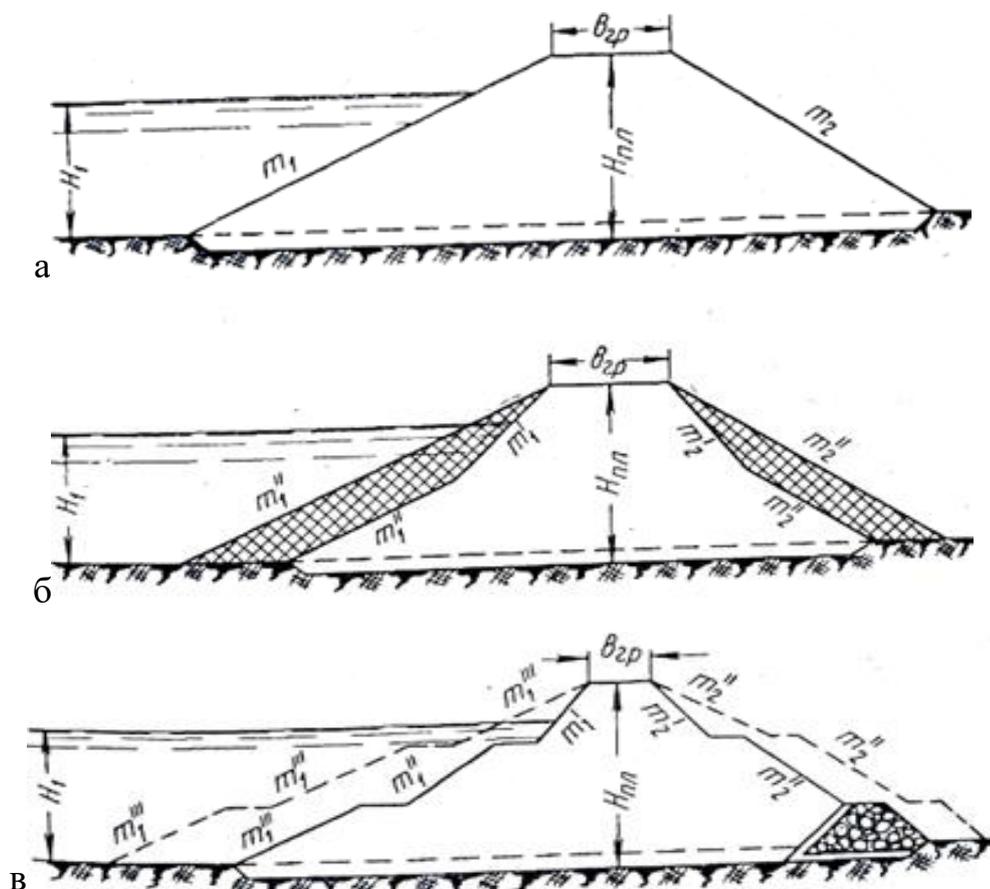


Рис. 4.8. Заложение откосов плотин/дамб [9]: а – постоянное; б – переменное без берм; в – переменное с бермами; в соответствии с действующим СП заложения откосов обозначаются – верхового $m_1 = m_n$ и низового $m_2 = m_t$ [4]

Верховые откосы плотин всегда более пологи, чем низовые (табл. 4.7), поскольку устойчивость откоса зависит от угла внутреннего трения, который для грунтов, насыщенных водой, меньше, чем для сухих. Применяя вместо переменного постоянное заложение откоса по всей высоте плотины, коэффициент откоса следует брать по наиболее пологому участку, т.е. участку, расположенному у основания плотины. Переломы откосов по высоте плотины делают через 10...15 м, при этом изменение заложения может быть осуществлено без берм (рис. 4.8б) или с бермами (рис. 4.8в). Последний вариант лучше, что следует из основных задач, выполняемых бермами.

Бермы устраивают как на низовом, так и верховом откосах. Они служат для: облегчения производства работ по покрытию откосов; создания более

устойчивого упора для крепления откоса; включения в тело плотины строительных перемычек; осуществления перехода от одного заложения откоса к другому; перехвата и отвода дождевых и талых вод, стекающих с вышерасположенной части откоса; надзора и ремонта откоса в процессе эксплуатации; прокладки дороги; сопряжения откоса плотины с дренажем, выполненным в виде дренажной призмы. Первые четыре пункта из перечисленных можно отнести к верховому откосу, а остальные - к низовому.

Поскольку бермы верхового откоса необходимы главным образом для производственных условий, размеры их и местоположение принимают, исходя из принятой организации работ. Так, при креплении откосов сборными плитами ширина бермы зависит от базы подъемных кранов, а расстояние между бермами по высоте - от вылета стрелы (рис. 4.9).

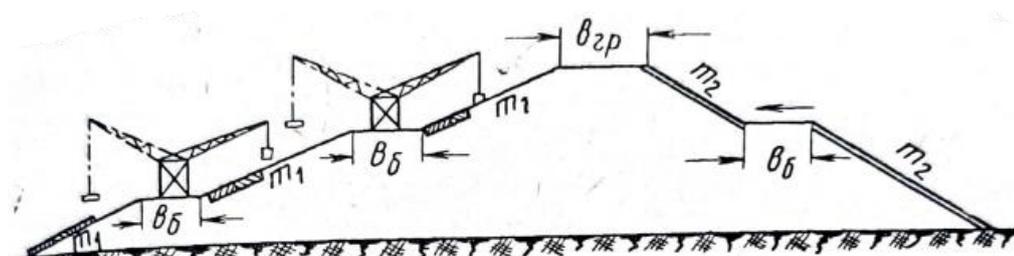


Рис. 4.9. Размещения берм на верховом откосе плотины при укладке плит кранами: в соответствии с действующим СП заложения откосов обозначаются – верхового $m_1 = m_n$ и низового $m_2 = m_i$ [4]

В случае, когда бермы предназначены только для создания упора, ширина их равна примерно 1,5...2,0 м. Если по условиям производства работ бермы не требуются, а упоры крепления устраивают непосредственно на откосе, верховые откосы могут быть без берм. Низовые откосы плотин средней высоты и тем более высоких, как правило, имеют бермы. В низких плотинах бермы обычно отсутствуют, но не исключена возможность и для них устройства одной бермы. При интенсивных осадках (ливнях) наблюдаются значительные деформации откосов. Стекающая вода после дождей, образуя ручейки, постепенно размывает грунт откоса. Для предупреждения размыва требуется усиленное крепление, так как обычное крепление не в состоянии противостоять большим скоростям потока воды. Бермы на откосе сокращают путь струек,

уменьшают их интенсивность и скорости, тем самым, исключая применение усиленного крепления. На низовом откосе берам придают односторонний поперечный уклон в пределах 2...4% с направлением в сторону ВБ. Ширину берам назначают в пределах 1,5...2,0 м, если по каким-либо причинам не требуется ее увеличения, например, при устройстве проезда. Ширина берам в этом случае должна отвечать габаритам транспортных средств. Для сбора дождевой воды, стекающей по откосу, на берам устраивают кюветы-канавки, располагая их на внутренней стороне. Собранная вода стекает по лоткам, проложенным по откосу, под углом 45° к бровке. Конец лотка примыкает к канавке, идущей у подошвы откоса, сопрягаемого с поверхностью земли. По этой канавке в нижний бьеф стекает вода, просочившаяся через тело плотины, и дождевая вода, поступающая из лотков. Схема размещения кюветов, лотков и сборных канавок приведена на рисунке 4.10.

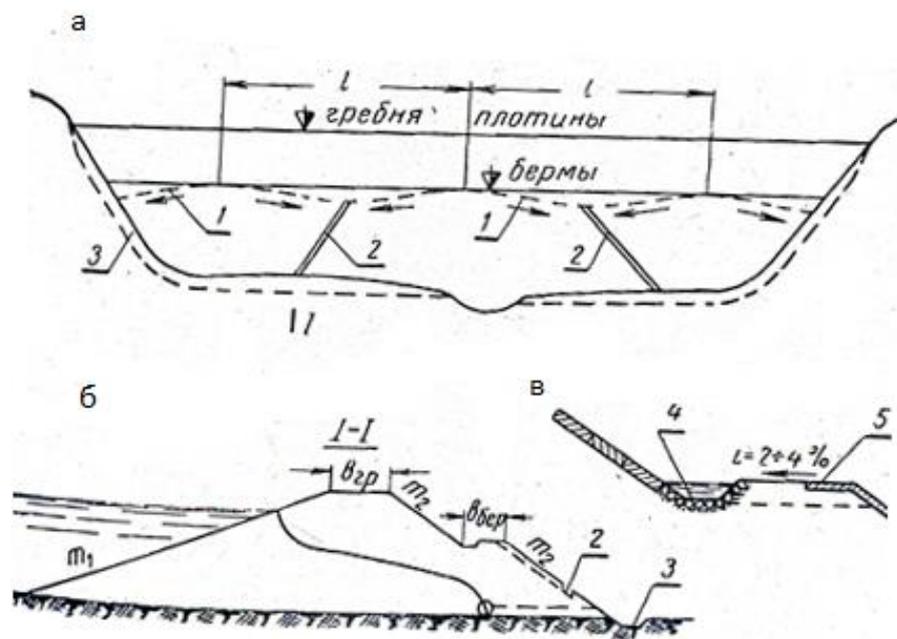


Рис. 4.10. Размещения кюветов, сбросных лотков и сбросных каналов

на низовом откосе: а - вид на плотину со стороны НБ; б – поперечный разрез плотины; в – деталь берам; 1 – кювет вдоль берам; 2 – лотки для спуска дождевой воды; 3 – канавка для сбора фильтрационной воды; 4 – кювет с одеждой; 5 – укрепленная бровка; в соответствии с действующим СП заложения откосов обозначаются – верхового $m_1 = m_h$ и низового $m_2 = m_l$

При высоте дамб более 5 м следует на половине ее высоты предусмотреть берму шириной не менее 1,5 м с целью повышения устойчивости откоса или выполнить расчет устойчивости откоса по методу круглоцилиндрических плоскостей с учетом физико-механических характеристик укладываемого в дамбу послойно уплотненного грунта. Вдоль нижней бровки низового откоса дамб следует выполнить линейный горизонтальный трубчатый дренаж с системой наблюдательных колодцев. Отвод дренажных вод должен в основном осуществляться самотеком или при достаточном обосновании путем принудительной откачки.

Выход фильтрационного потока на поверхность низового откоса дамбы не допускается, и его следует квалифицировать как нештатную ситуацию, требующую безотлагательного выполнения таких защитных мероприятий, как: проверка работоспособности дренажа; рыхление в месте выхода воды песчаного материала, из которого сложена дамба; устройство в месте выхода воды наклонного дренажа путем отсыпки слоя песчано-гравийного материала, сопрягая его с песчано-гравийной призмой горизонтального дренажа, проложенного в основании дамбы [17, 32].

4.3. Крепление откосов земляных плотин

Неукрепленные откосы плотин вследствие силовых воздействий деформируются и разрушаются, в результате чего может потерять устойчивость и сама плотина. Для предупреждения разрушений откосы укрепляют тем или иным покрытием.

Основные силовые воздействия, воспринимаемые верховым (мокрым) откосом, следующие [3, 6]:

- продольные течения воды вдоль откоса;
- движение воды по откосу плотины, вызванное накатом и скатом ветровой волны;

- движение воды в швах и зазорах между элементами покрытия и течение воды по стыку покрытия с грунтом, являющееся результатом вкатывания волны на откос;

- удары волн при их разрушении на откосе во время ветрового или судоходного волнобоя;

- противодействие на водонепроницаемое покрытие, направленное нормально к его тыловой поверхности, и взвешивающая сила при погружении покрытия в воду;

- удары плавающих тел и льда об откос при ветровом нагоне;

- статическое давление льда на откос в период ледостава в связи с изменением температуры воздуха, а также вырывающее действие льда при его примерзании к покрытию в момент изменения уровня воды в пруду.

Рассматривая действующие силы на откос плотины, из числа их можно выделить те, которые являются определяющими; принять их за расчетные, и по ним найти размеры покрытия. Такими силами при расчетах покрытий верхового откоса являются удар ветровых волн и противодействие вследствие наката волны после разрушения на откосе. Другие воздействия, как, например, продольные течения воды вдоль откоса, ударное воздействие льда, не являются расчетными, так как они всегда меньше основных. Воздействия, проявляющиеся в результате движения воды в швах и зазорах покрытия, а также течение воды по стыку грунта с покрытием, воспринимаются фильтровой подготовкой и не оказывают решающего влияния на размеры покрытия. В сплошном железобетонном покрытии с закрытыми швами этой причины и совсем нет. Сила статического давления льда, достаточно большая по величине, может быть сведена на нет, если в период ледостава у плотины поддерживается незамерзающая майна.

Долговечность работы земляных откосных сооружений прежде всего зависит от соответствия типа покрытия оказываемым на него силовым воздействиям. Опыт эксплуатации земляных плотин с покрытиями откосов показывает, что там, где эти условия выдержаны, покрытие долго сохраняется

без ремонта. В противном случае оно быстро разрушается. Исправление покрытия при повторении той же конструкции снова приводит к деформации откоса. Устойчивость земляных откосных сооружений обеспечивается при покрытиях, размеры которых соответствуют расчетным условиям. Кроме того, должна соблюдаться правильная технология производства работ, соответствующая типу покрытия. Необходимо, чтобы конструкция крепления откосов была простой и экономичной и вместе с тем допускала максимальную механизацию работ при ее выполнении.

В земляных плотинах крепится как верховой, так и низовой откос, однако степень силовых воздействий для них различна, в соответствии с чем и характер крепления разный. Если в НБ земляной плотины есть вода, крепление низового откоса в пределах возможных колебаний уровня делают таким же, как и на верховом откосе, так как характер силовых воздействий в этом случае одинаков для обоих откосов. Верхнюю (сухую) часть верхового откоса в низовой откос обычно засевают травами.

Верховой откос подвержен многочисленным воздействиям, которые могут проявляться каждый в отдельности или в различных сочетаниях. Практика гидротехнического строительства выработала значительное количество типов и конструкций креплений верховых откосов. Применение того или иного вида покрытия зависит прежде всего от интенсивности волнового воздействия, как основного фактора устойчивости самой плотины. Для покрытия откосов земляных плотин пригодны любые строительные материалы, достаточно прочные и не деформируемые под расчетными силовыми воздействиями. Учитывая, что затраты на покрытие откосов составляют значительную долю общих затрат, следует использовать более дешевые местные материалы. Для небольших неотчетственных плотин находит применение биологическое крепление (тростник, камыш и пр. ВВР), а в некоторых случаях как временная мера — хворостяное крепление. При сильных волнобоях откос плотины со стороны господствующих ветров дополнительно защищают специальными

креплениями. Для крепления верховых откосов наибольшее распространение получили:

- каменные (насыпные – каменнобросные, одиночная или двойная мостовая, мощение в клетках) (при $m_h > 2,5 \dots 3$);
- бетонные монолитные, железобетонные монолитные (при $h_{I\%}$ до 2 и более метров) или сборные (при $h_{I\%} < 2,5 \dots 3$ м) с обычной или предварительно напряженной арматурой;
- асфальтобетонные (однослойные, двухслойные) (при $h_{I\%} < 3$ м);
- биологические (посадки черенков или хлыстов ивняка, лозы и пр.) (при $H_{пл} < 7$ м, $h_{I\%} < 0,7$ м);
- грунтоцементные (при $h_{I\%} < 1,5 \dots 3$ м);
- габионные;
- комбинированные;
- пологие откосы без крепления или крепленные слоем крупнообломочного грунта (при $h_{I\%} < 2,5$ м, $H_{пл} < 10$ м, $m_h > 7 \dots 12$ до пляжных – 16...50).

4.3.1. Крепление из каменных материалов

Плюсы данного крепления перекрывают все незначительные минусы: возможность вести работы круглый год независимо от температуры воздуха; легкость восстановительных работ и быстрота их выполнения, при частичном разрушении покрытия; гибкость покрытия, а, следовательно, приспособление его к возможным деформациям откоса при неравномерной осадке или частичном разрыве; возможности устройства крепления ниже уровня воды в виде каменной наброски. К минусам можно отнести: трудность механизации работ; необходимость использовать квалифицированную рабочую силу при применении покрытия по типу мостовой; потребность в большом количестве транспорта для доставки камня к месту укладки, а также трудность механизации погрузочно-разгрузочных процессов; при мощных покрытиях требуется крупный камень, операции с которым в процессе укладки и перемещения затруднительны.

Для каменного крепления применяют камень изверженных метаморфических и осадочных пород (некристаллический известняк с плотным тонкозернистым изломом, а также однородные и крепкие песчаники). Физико-механические характеристики камня должны удовлетворять условиям прочности, морозостойкости, водостойкости. В покрытие откосов допускается укладывать колотый, рваный и булыжный камень. Размеры камня или вес его определяют расчетом, исходя из максимально действующих на крепление сил. В креплениях с подбором камней рекомендуется колотый камень, форма которого близка к многогранной призме или усеченной пирамиде.

По способу укладки камня в покрытие различают: каменная наброска; каменная наброска в плетневых клетках; одиночная и двойная мостовая; мостовая в плетневых клетках; мостовая в бетонных клетках.

Каменная наброска. Покрытие этого типа выполняется из сортированного и несортированного камня, уложенного на откос в несколько слоев без подбора. В каменной наброске используют, как правило, только несортированный камень (рис. 4.11).

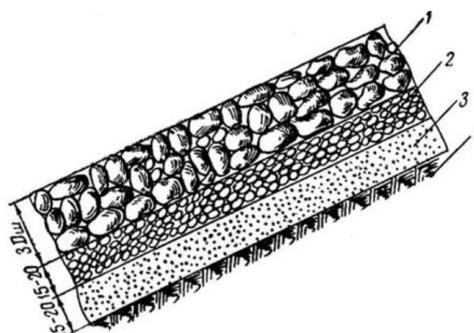


Рис. 4.11. – Укрепление откоса каменной наброской: 1- камень; 2, 3 – слои подготовки, 4 – грунт тела плотины

Он может быть различных размеров, однако необходимо, чтобы камней расчетного размера и больше было 50% (по весу), камней меньшего размера (в четыре раза меньше расчетного) – 25%, остальная часть – любого размера. Укладывается каменная наброска на однослойную или многослойную подготовку, причем в последнем случае соблюдается расположение слоев по типу обратного фильтра. Толщина однослойной подготовки должна быть не

менее 0,2 м, а при многослойной подготовке толщина каждого слоя 0,10 ... 0,15 м.

Разновидность крепления верхового откоса по типу каменной наброски – наброска в плетневые клетки. В этом случае по поверхности укрепляемого откоса вначале выполняют клетки из ивового плетня. Внутреннюю часть клеток заполняют камнем заподлицо с верхом плетня. Каменная наброска в плетневых клетках пригодна для плотин небольшой высоты и сравнительно маломощного покрытия.

Расчет каменной наброски по ряду известных формул (П.А. Шанкина, Б.А. Пышкина, М.Н. Гольдштейна, С. Бодвена, Иррибарена и Ногалеса, М.И. Lupинского, СН 92-60 и др.) сводится к определению веса отдельных камней, занимающих устойчивое положение в покрытии (рис. 4.12) [7 - 11, 13, 21, 26].
Переход от веса камней к их линейным размерам выполняется в предположении, что камень имеет форму куба или шара.

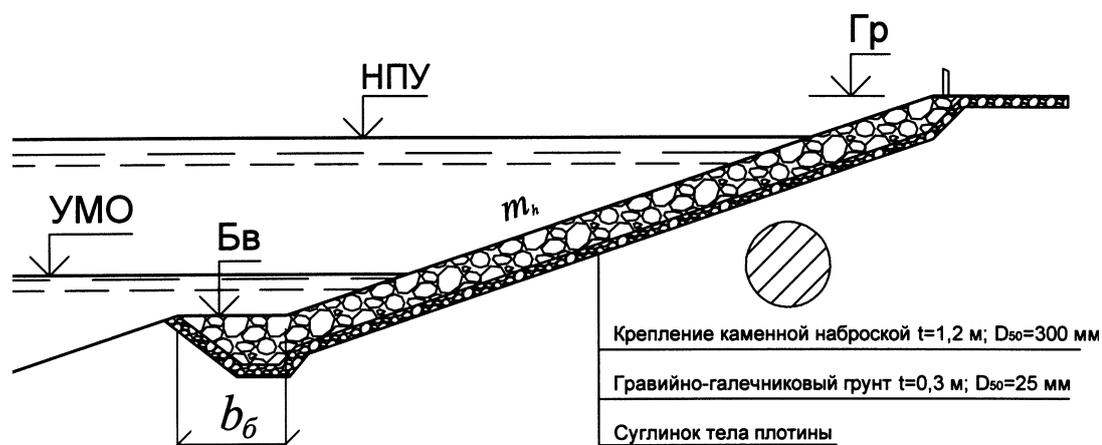


Рис. 4.12. Крепление верхового откоса земляной плотины/дамбы каменной наброской

По последним нормативным указаниям рекомендуется брать толщину покрытия, исходя из диаметра приведенного шара, и принимать при укладке несортированных камней не менее $3D_{ш}$ или $3d_{85}$ (d_{85} – диаметр камня, определяемый по кривой гранулометрического состава при $P = 85\%$), а для сортированных не менее $2,5D_{ш}$ [14]. При этом средний диаметр приведенного шара $D_{cp} = d_{50} = D_{ш}$ вычисляют по формуле:

$$D_{cp} = \sqrt[3]{\frac{m}{0,524\rho_s}} \quad (4.1)$$

где m - масса отдельного элемента, подсчитанная по формуле (4.2):

$$m = \frac{3,16k_{fr}\rho_s h^3}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_\omega} - 1\right)^3 \sqrt{1 + \frac{m^3}{h^3}}} \sqrt{\frac{\bar{\lambda}_d}{h}} \quad (4.2)$$

где h – расчетная высота волны, м, принимаемая равной $h_{1\%}$, рассчитанной при НПУ; $\bar{\lambda}_d$ – средняя длина волны, м; k_{fr} – коэффициент, принимаемый по таблице 4.8; ρ_s – плотность камня, т/м³; ρ_ω – плотность воды ($\rho_\omega = 1$ т /м³); m_h – коэффициент заложения верхового откоса ГТС. D_{cp} устанавливается по имеющейся для карьерного грунта кривой гранулометрического состава. Если требуемый размер камня превышает его параметры в карьере, то для дальнейшего проектирования обычно принимается крепление верхового откоса, выполненное из бетонных или железобетонных плит [10, 14].

Таблица 4.8

Значения коэффициента k_{fr} для различных креплений

Элементы крепления	Коэффициент k_{fr}	
	при наброске	при укладке
Камень	0,025	-
Обыкновенные бетонные блоки	0,021	-
Тетраподы и другие фигурные блоки	0,008	0,006

Крепление по типу мостовой. При покрытии откосов по этому типу камни укладывают с подбором вплотную друг к другу с минимальными зазорами в углах. Благодаря расклинивающему действию камней устойчивость покрытия повышается, и расчетная толщина их по сравнению с каменной наброской уменьшается [7 - 11]. При расчетной толщине камней не более 0,35 м применяют одиночную мостовую, при увеличении размера камней переходят на двойную мостовую.

Одиночная мостовая выполняется из булыжного или колотого камня, размер которого определяют расчетом. Учитывая трудность получения камня строго расчетного размера, допускается употреблять камни меньшего размера (до 25%) при условии равномерного распределения их по всей площади покрытия [14]. Для покрытия откосов по типу мостовой берут камень с соотношением сторон примерно 1:2 и укладывают, располагая большую сторону камня перпендикулярно образующей откоса, благодаря чему повышается устойчивость покрытия. Подготовка под мостовую может быть однослойной или многослойной. Пример покрытия изображен на рисунке 4.13.

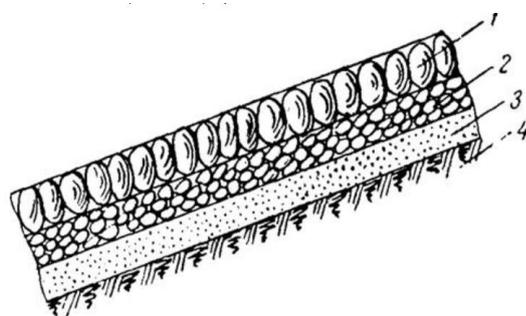


Рис. 4.13. Одиночная мостовая: 1 - камень; 2, 3 - слои подготовки; 4 - грунт тела плотины

Практика и исследования показали, что крепление по типу мостовой при соблюдении расчетных размеров, камня, надлежащей подготовке и правильной технологии производства работ вполне надежно от волновых воздействий. Существенным недостатком мостовых является большая трудоемкость их выполнения с применением квалифицированного ручного труда. Кроме того, при случайном выпадении одного - двух камней происходит прогрессирующее разрушение покрытия, распространяющееся на большую площадь. Этот недостаток может быть устранен при укладке **мостовой в клетках**. Случайные деформации в этом случае будут ограничены пределами только одной клетки, не затрагивая целостности остальной части покрытия. Форма клеток бывает в виде прямоугольника, квадрата или ромба с размерами сторон от 0,8 до 1,5 м. Стенки, образующие клетки, располагают обычно под углом 45° к бровке откоса. Клетки могут быть из камней повышенной крупности, из плетней или из бетонных и железобетонных элементов.

Плетневые клетки (рис. 4.14) делают так: в откос плотины по углам предполагаемых клеток забивают сваи диаметром 6...8 см на глубину 40...50 см. В промежутках между угловыми сваями, через 25...30 см, забивают промежуточные колья меньшего диаметра. Выступающие над поверхностью откоса колья оплетают ивовыми прутьями по типу корзиночного плетения. В образовавшиеся клетки вначале насыпают подготовку, а по ней укладывают камни мостовой. Применение свежесрубленных кольев и прутьев ивовых пород способствует их прорастанию, что дополнительно укрепляет откос за счет корневой системы.

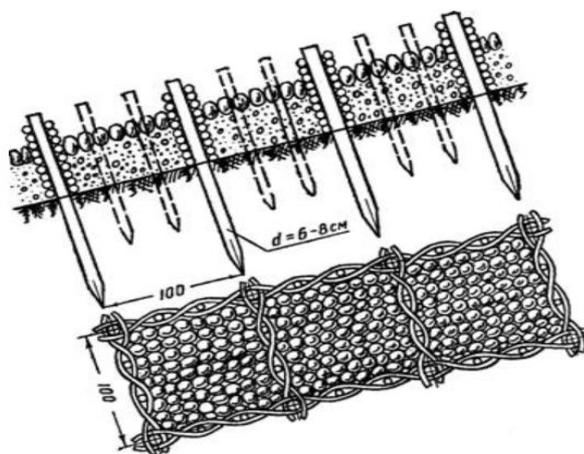


Рис. 4.14. **Одиночная мостовая в плетневых клетках**

Для устройства клеток можно также использовать **бетонные или железобетонные элементы**, устанавливая их так же, как бортовые камни на тротуарах дорог (рис. 4.15).

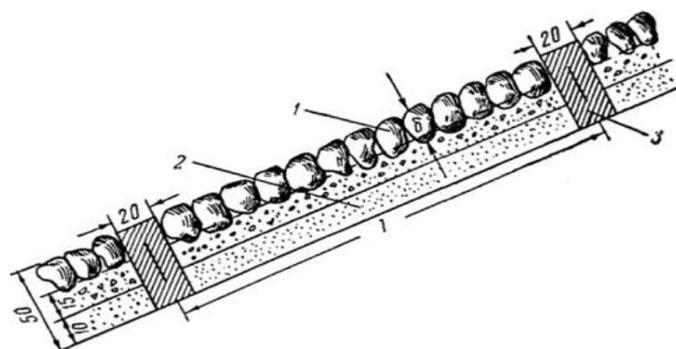


Рис. 4.15. **Одиночная мостовая в бетонных клетках:** 1 - камень; 2 - подготовка; 3 - армированные бетонные балки

Такие клетки наиболее устойчивы, и мостовая, уложенная в них, имеет повышенную прочность. Стоимость такого крепления выше, но зато

увеличивается срок службы и сокращаются эксплуатационные расходы. Применение сборных железобетонных элементов для устройства клеток ускоряет работы по покрытию откосов, но в то же время требует повышенной точности разбивки клеток (в плане и по высоте), в противном случае примыкание и замоноличивание в узлах сборных элементов вызывает затруднения.

В тяжелых условиях волнового воздействия на откосы плотин, когда по расчетным условиям применение одиночной мостовой недостаточно, применяют **двойную мостовую** (рис. 4.16). При двойной мостовой на спланированный откос заданного заложения вначале укладывают однослойную или многослойную подготовку. По ней укладывают первый (нижний) слой мостовой.

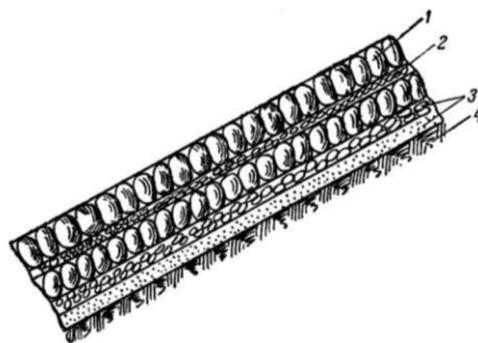


Рис. 4.16. **Двойная мостовая:** 1 - камень; 2 - гравий; 3 - два слоя фильтра; 4 - грунт тела плотины

Для него применяют более мелкие камни размером, 15...20 см. Этот слой мостовой покрывают мелким щебнем толщиной до 5 см. На выровненную поверхность укладывают второй слой из более крупных камней (размером 20...30 см). Промежуточный щебеночный слой между двумя слоями мостовой улучшает их соединение и может рассматриваться как дополнительный слой обратного фильтра. Поверхность верхнего слоя мостовой укладывают по шнуру, в соответствии с принятым заложением откоса. Отдельные местные углубления по поверхности допустимы, но они не должны быть более 5 см. Двойная мостовая, аналогично одиночной мостовой, может быть выполнена в плетневых клетках, однако следует иметь в виду, что при значительной

толщине покрытия устройство клеток будет затруднено и роль их в устойчивости покрытия снизится. При расчете покрытия по типу мостовой определяют линейный размер камня, отвечающий толщине покрытия, измеряемой перпендикулярно откосу.

4.3.2. Крепление железобетонными плитами и асфальтобетоном

Железобетонные плиты для крепления верховых откосов плотин выполняют монолитной или сборной конструкции [10 – 16]. Плиты сборной конструкции, в свою очередь, могут быть с открытыми швами, через которые свободно проходит вода в подготовку под плитами, и с закрытыми замоноличенными швами, в результате чего получают укрупненного размера плиты, называемые картами, между которыми оставляют деформационные швы. Каждый из перечисленных видов покрытия имеет свои достоинства и недостатки, вытекающие из производственных и конструктивных условий.

Монолитные покрытия более надежны в эксплуатации, по стоимости они дешевле сборных, но в то же время более трудоемки и требуют удлиненных сроков выполнения. Плиты, уложенные на месте строительства, очень чувствительны к осадкам основания, поэтому откосы плотин для них должны быть достаточно хорошо уплотнены. Положительная сторона монолитных плит – плотное примыкание бетона к грунтовому основанию, при этом особые требования к планировке откосов здесь не предъявляются. Монолитные плиты целесообразно применять при криволинейных очертаниях откосов, так как в этом случае легко получить непрерывность выпуклых или вогнутых поверхностей при любых радиусах закруглений и плавно перейти к прямолинейным участкам откосов.

Форма и размеры монолитных плит обычно имеют вид квадратов или прямоугольников с размерами сторон 8...20 м (иногда до 45...60 м) [14]. Меньшие размеры принимают в том случае, если возможны значительные осадки откосов. Толщину плит определяют по расчету, её минимальная величина составляет 0,15 м. Укладывают плиты на однослойную или многослойную подготовку, при этом по производственным условиям толщина

слоя подготовки должна быть не меньше 7...10 см. При больших размерах плит подготовку иногда выполняют не по всей площади, а только в пределах швов, устраивая так называемые ленточные фильтры (рис. 4.17). Для уплотнения швов часто применяют деревянные (сосновые) доски, которые одновременно служат опалубкой при укладке бетона в плиты. Долговечность досок обеспечивается антисептированием и пропиткой их битумом (рис. 4.18). Для уплотнения швов применяется также и резиновая лента специального профиля (рис. 4.18б), закладываемая в процессе бетонирования в торцы плит, примерно посередине их высоты.

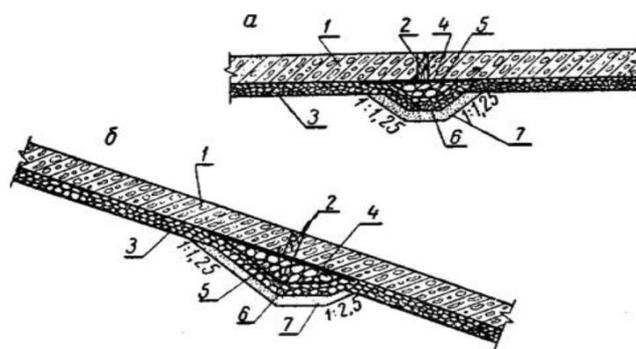


Рис. 4.17. Ленточный фильтр под железобетонными плитами: а - продольный разрез; б - поперечный; 1 - железобетонная плита; 2 - доски толщиной 2 см, пропитанные креозотом; 3 - утрамбованный гравий или щебень толщиной слоя 10 см; 4 - бумажная прокладка (смоченные бумажные мешки из-под цемента); 5 - гравий или щебень крупный; б - то же, мелкий толщиной слоя 15 см; 7 - крупнозернистый песок толщиной слоя 10 см

В угловых пересечениях плит этой конструкции должны быть предусмотрены резиновые фасонные косынки, концы которых склеиваются с профилированной лентой. Пригодны для уплотнения швов и асфальтовые мастики. Битум в чистом виде применять не рекомендуется из-за подвижности при обычных положительных, температурах и растрескивания при отрицательных.

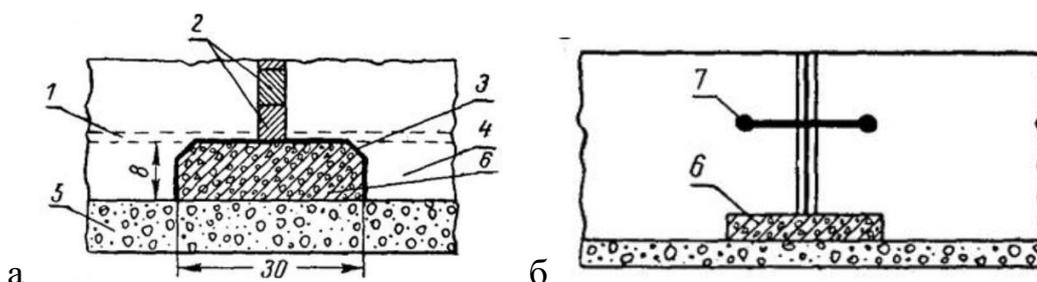


Рис. 4.18. Уплотнение швов в монолитных плитах: а - жесткое

уплотнение; б - гибкое уплотнение; 1 - арматура нижней сетки; 2 - просмоленные доски толщиной 3 см; 3 - битумные маты толщиной 1 см; 4 - железобетонная плита; 5 - бетонная подготовка; 6 - железобетонная балка толщиной 8 см; 7 - резиновое уплотнение

Практика многих лет, когда все чаще стали применять **сборные плиты** в покрытиях откосов земляных сооружений, подтверждает целесообразность отказа от монолитного бетона. Отдельные случаи разрушения покрытий откосов из сборных железобетонных плит говорят не о недостатках этого способа, а о несовершенстве применяемых конструкций, нарушении технологического процесса укладки плит и в некоторых случаях неполного учета факторов, от которых зависит прочность покрытий [12, 17, 21, 22]. Наряду с повышением культуры строительного производства и переходом к поточной системе ведения работ, свойственных всякому сборному строительству, покрытие из железобетона обладает следующими достоинствами: повышенным качеством плит при заводском изготовлении по сравнению с плитами, выполняемыми на месте; созданием условий для полной индустриализации работ, сокращением сроков строительства и доступностью укладки плит на откосы в любое время года; возможностью иметь большие осадки основания, а, следовательно, и начинать работы по покрытиям откосов одновременно с укладкой грунта в тело плотины.

Вместе с тем следует отметить, что при покрытии откосов из сборных железобетонных плит необходимо тщательно выполнять планировку откосов для обеспечения плотного контакта между постелью плиты и основанием; нужно иметь передвижное крановое оборудование и предусматривать для него стоянки на откосах. К недостаткам можно отнести несколько большую

толщину плит, не омоноличенных по контуру, по сравнению с монолитными плитами; выполнение сплошной подготовки под плитами с тщательной планировкой; трудоемкость и продолжительность выполнения работ, связанных с замоноличиванием швов.

Размеры сборных железобетонных плит назначают из условия транспортировки и мощности кранового оборудования, применяемого при укладке плит. Наиболее ходовые размеры сборных плит, учитывая опыт их применения, от 1,5х1,5 до 3х6 м. Если плиты не квадратные, то больший размер располагают перпендикулярно урезу воды [10]. Сборные плиты армируют двумя рядами сеток, располагая их в нижней и в верхней частях плиты. Хорошо показывает эксплуатация сборных плит с шарнирным соединением (рис. 4.19).

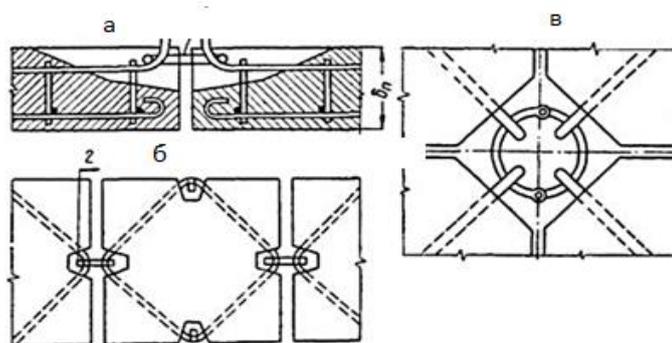


Рис. 4.19. Шарнирное соединение сборных железобетонных плит: а и б - посередине сторон плит; в - по углам плит; 1 - шарнирный хомут; 2 - отверстия, заливаемые асфальтом

Большое признание получило укрепление откосов отдельными сборными плитами, замоноличенными по контуру в карты, размером от 1 х 1,5 до 3 х 6 м в карты из 2...6 плит размером от 8 х 8 до 12 х 24 м. Карты обычно выполняются прямоугольными в плане с соотношением сторон от 1 до 2 с бóльшей стороной вдоль гребня плотины. Между картами устраиваются деформационные швы (часто шарнирные), под которыми располагают ленточные обратные фильтры из грунтовых или геотекстильных материалов.

Швы между плитами, подлежащие замоноличиванию, имеют сравнительно большую ширину, в пределах которой происходит стыкование арматурных выпусков.

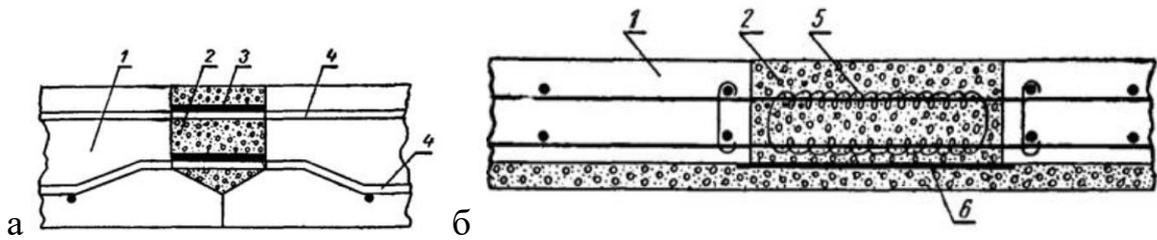


Рис. 4.20. Замоноличенный шов: а – поперечный разрез; б – план; 1 - железобетонная плита; 2 - заполнение бетоном; 3 - сварка; 4 - рабочая арматура; 5 - сварка или обмотка вязальной проволокой; 6 - прокладка из рубероида

Большие замоноличенные сборные плиты наряду с достоинствами имеют тот недостаток, что снятие противодействия в них затруднено. Учитывая это, были разработаны конструкции сквозных плит, в которых есть отверстия той или иной формы. На рисунке 4.21, а, б показаны сквозные плиты, имеющие в одном случае прямоугольные, а во втором - круглые отверстия.

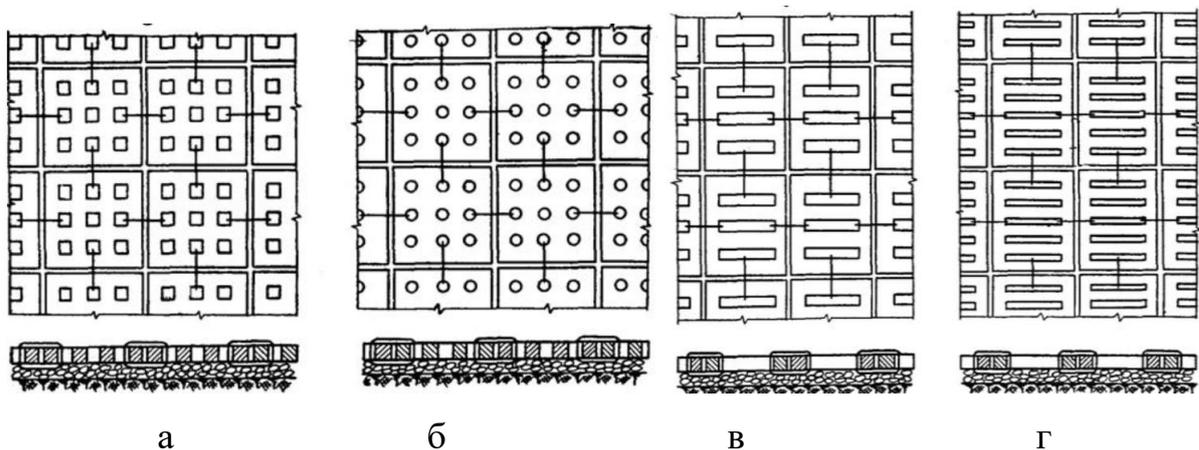


Рис. 4.21. Сборные железобетонные сквозные плиты: а - с прямоугольными отверстиями; б - с круглыми отверстиями; в - с широкими прорезями; г - с узкими прорезями

Швы в этом случае оставляют открытыми, а плиты соединяют хомутами или проволочными скрутками, пропущенными в соседние отверстия по стыку примерно посередине плит. Покрытия со сквозными отверстиями укладывают на сплошном обратном фильтре, фракции которого подбирают из условия недопущения выноса наиболее крупных составляющих через швы и отверстия. Вместо круглых прямоугольных отверстий в сборных плитах можно выполнить широкие или узкие прорези (рис. 4.21в, г). Здесь крупную фракцию фильтровой подготовки уменьшают и подбирают в зависимости от ширины прорези.

Диагональное или наклонное расположение щелей в плитах создает более благоприятные условия для отвода воды из фильтровой подготовки, отсюда уменьшается противодействие, а, следовательно, и толщина плиты. Минимальная толщина применяемых для крепления откосов земляных плотин/дамб сборных плит составляет 0,08...0,1 м [14]. Подготовка под крепление откосов (выравнивающая и фильтровая) обычно устраивается по типу обратного фильтра из естественных и искусственных грунтовых смесей или из искусственных водопроницаемых материалов (стекловолокно, минеральная вата, геотекстиль и др.) [10, 19, 22]. Число слоёв фильтра зависит от вида грунта откоса. При соответствующем обосновании подготовку можно не устраивать, или ограничиться лишь выравнивающей подготовкой из крупного песка, гравия, щебня и их смесей, толщиной не менее 0,06...0,25 м. Фильтровую подготовку укладывают под всей поверхностью каменного крепления, а под плитами она необходима только по швам. Часто она используется и как выравнивающая, тогда её выполняют по всей поверхности, что экономически не оправданно. Под плитами с закрытыми швами, как правило, укладывается однослойный обратный фильтр.

Для расчета плит на устойчивость есть ряд формул, полученных на основе экспериментальных исследований П.А. Шанкина, Е.В. Курловича, М.И. Лупинского, П.К. Божича и др. [10]. Плиты крепления откосов плотин по СП [4, 6, 10, 21] следует проверять на прочность от воздействия давления волн и льда, в том числе с учетом возможного навала льда на гребень плотины при воздействии взвешивающего давления воды при откате волны, и проверяется на прочность при обрушении волны на откос. Толщину плит t бетонного крепления можно корректно определить по формуле (4.3), предварительно приняв их плановые размеры, и по программе, разработанной на её основании на кафедре ГТС (см. в приложении рис. П4).

$$t = \frac{0,07 \cdot \eta \cdot \rho_w \cdot h_{1\%}}{m_h \cdot (\rho_\sigma - \rho_w)} \sqrt[3]{\frac{\lambda_d}{B} \sqrt{m_h^2 + 1}}, \quad (4.3)$$

где: η – коэффициент, принимаемый: для монолитных плит $\eta = 1,0$; для сборных плит $\eta = 1,1$; ρ_b – плотность бетона ($\rho_b = 2,4 \text{ т/м}^3$); B – размер плиты (для сборного омоноличенного в карты крепления – размер карты) между двумя смежными деформационными швами в направлении перпендикулярном линии уреза воды, м.

Для плотин небольшой высоты перспективно использовать **покрытие асфальтобетоном**, которое одновременно может выполнять роль экрана. Компонентами его служит дробленый гравий или щебень, песок, минеральный порошок, а в качестве вяжущего материала – нефтяной дорожный битум. По технологическому признаку асфальтобетон бывает горячий, укладываемый и уплотняемый в горячем состоянии с температурой смеси при выходе $140^0 \dots 170^0$, и холодный, укладываемый и уплотняемый в холодном состоянии при температуре воздуха во время производства работ. Крепление откосов из асфальтобетона может быть выполнено в виде: сплошного однослойного или многослойного покрытия; сборных армированных плит. Изменяя количественное соотношение заполнителей смеси, можно получить плотный асфальтобетон с остаточной пористостью меньше либо больше 5%. Преимущество асфальтобетонных покрытий состоит в том, что они обладают высокой текучестью, вследствие чего легко приспособляются к значительным осадкам грунта откосов, его покрытие может выполняться без швов. Толщину слоя обычно принимают в пределах 8...12 см. Асфальтобетонные плиты армируются металлической стальной сеткой толщиной 5 мм, с ячейками 20X20 см. Их укладывают от подошвы с минимальным количеством швов по щебеночной или гравийной подготовке с перевязкой швов. Швы заполняют холодной асфальтовой мастикой.

4.3.3. Хворостяное и биологическое крепление

Хворостяное крепление применяется как временная мера по защите откосов от силовых воздействий, причем чаще на плотинах, где высота волны не превышает 0,5 м. Срок службы хворостяного крепления при переменной влажности не более 3...4 лет; в сухом состоянии такое крепление опасно в

противопожарном отношении. Хворостяное крепление откосов бывает в виде выстилки или сплошного покрытия фашинами (рис. 4.22). В том и другом случаях пригодны ивовые прутья толщиной в комле 2...4 см и длиной 1,5...2,0 м. При использовании живого хвороста возможно его прорастание, после чего откос приобретает дополнительную прочность.

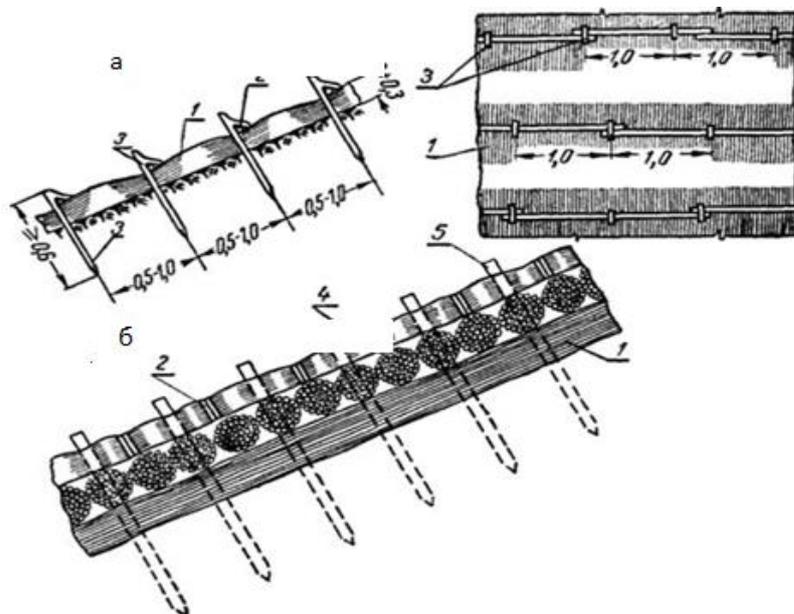


Рис. 4.22. Хворостяное крепление (размеры в м): а - однослойная хворостяная выстилка; б - усиленное фашинно-хворостяное; 1 - хворост; 2 - прутьяные жгуты или жерди; 3 - колья-вилки; 4 - фашины; 5 - колья $d = 5...6$ см

При креплении в виде выстилки по спланированному откосу вначале укладывают подготовку из соломы, мха или камыша толщиной 20 см, а по ней кладут сплошным слоем хворост толщиной 20...30 см. Укладка хвороста ведется полосами снизу в верх, при этом комли прутьев располагают к подошве плотины. Каждая, последующая полоса выстилки перекрывает предыдущую на длину не менее $1/3$ средней длины хворостин. Параллельно урезу воды и перпендикулярно выстилке поверх нее примерно через 0,5...1,0 м укладывают прутьяные канаты диаметром от 10 до 15 см или тонкие жерди, которые прикрепляют к грунту откоса двойными спицами или деревянными кольями - вилками длиной около 1 м и забивают в шахматном порядке через 1 м в каждом ряду (рис. 4.22а).

Крепление откосов плотин с применением фашин более надежно и способно выдерживать воздействие ветровых волн выше 0,5 м. Для этого вида крепления применяют легкие однокомельные и двухкомельные фашины, а при усиленном креплении - тяжелые двухкомельные фашины, разновидностью которых являются карабуры [23]. Легкие двухкомельные фашины укладывают на подготовку, которой может служить солома, мох, камыш, хворостяная россыпь или галька. Укладка фашин ведется горизонтально вплотную друг к другу, пока не получится сплошной ковер. Поверх этого ковра, по направлению откоса, укладывают прутьяные канаты или жерди, прикрепляемые к откосу кольями, забитыми через 1 м в грунт откоса (рис. 4.22б). Длина колеи зависит от толщины фашинного ковра, с учетом подготовки, и глубины забивки в грунт, что должно обеспечить плотное прилегание крепления к откосу и невозможность усилиями гидростатического давления оторвать его от откоса. Обычно длина колеи равна одному метру.

Однокомельные фашины укладывают по откосу, их комли упираются в земляные уступы. Прижимные прутьяные канаты в этом случае располагают параллельно урезу воды. Прикрепление покрытия кольями производят, как и в предыдущем типе. При использовании живых прутьев для прорастания их после укладки фашин места уступов должны быть присыпаны растительным грунтом.

Принцип, положенный в основу **биологического крепления**, состоит в том, что молодая поросль ивовых пород, зарытая в землю, дает побеги; образующаяся затем густая растительность и мощная корневая система скрепляют грунт, повышают устойчивость откоса против разрушающего волнового воздействия, а также предупреждают выдувание мелких частиц грунта из откоса. При биологическом укреплении откосов необходимо соблюдать некоторые условия, одним из которых является затопление откоса, безвредное для развития корневой системы растений. Наиболее выносливы кустарниковые ивовые породы, которые безболезненно могут находиться 80 суток и дольше под водой, не теряя после этого способности к дальнейшему

развитию. Но, применяя ивовые посадки, в каждом случае следует выбирать те, которые наиболее отвечают местным грунтовым и климатическим условиям. При этом нужно следить, чтобы для откосов южной ориентации подбирались светолюбивые растения, а для откосов, обращенных на север, соответственно тенелюбивые. Также надо учитывать, что откосы с биологическим креплением вступают в работу не раньше второго-третьего года, когда молодая поросль и корневая система достаточно хорошо разовьются. А до этого откосы должны быть предохранены от разрушения временным защитным покрытием. Таким временным креплением, не препятствующим развитию основного биологического крепления, может служить хворостяная выстилка, срок службы которой вполне достаточен до вступления в действие биологического крепления. Особенность биологического крепления в том, что с течением времени оно приобретает все большую прочность и, кроме обычного ухода за растениями, не требуется каких-либо затрат на ремонт и восстановление крепления.

Биологическое крепление производится ивовыми черенками и хлыстами. В первом способе растения сажают одиночными черенками или гнездами. Лунки для черенков делают глубиной 45...60 см, с диаметром по дну около 30 см. Ряды лунок располагают в линию под углом 45° к бровке (рис. 4.23). Расстояние между рядами принимают 0,8...1,0 м, а между лунками в ряду – 50...80 см.

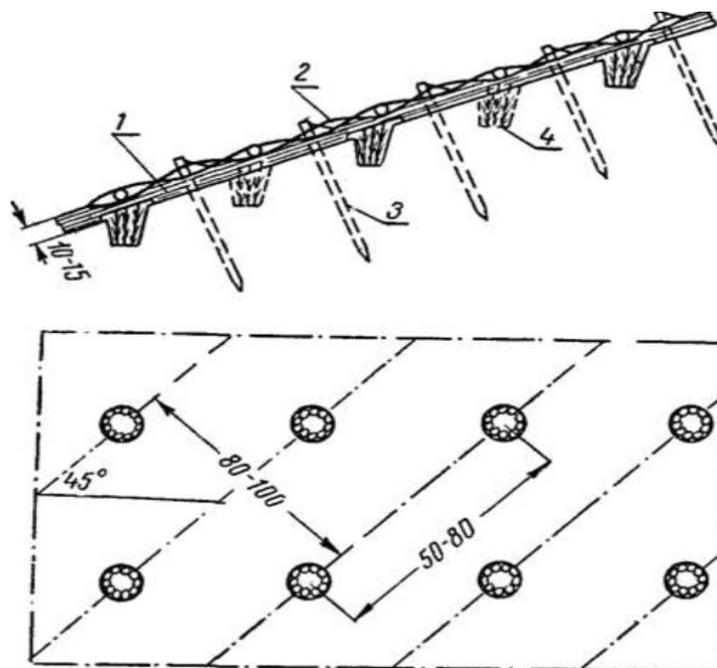


Рис. 4.23. Биологическое крепление откоса посадками ивовых черенков (размеры в см): 1 - солома; 2 - временное хвостяное покрытие; 3 - колья $d = 5...6$ см; 4 - лунки, засыпанные грунтом

При гнездовой посадке в каждую лунку укладывают в вертикальном положении 5...6 штук черенков ивняка, глазками вверх, с расстоянием между соседними черенками 5...7 см. После посадки над поверхностью спланированного откоса оставляют головки черенка высотой 10...20 см, а затем лунки засыпают грунтом с легким трамбованием. Посадка хлыстов осуществляется плашмя, для чего по откосу через 1,5 м делают борозды глубиной 10 см. В эти борозды укладывают ивовые хлысты, очищенные от сучьев и ветвей, а затем засыпают грунтом заподлицо с откосом (рис. 4.24).

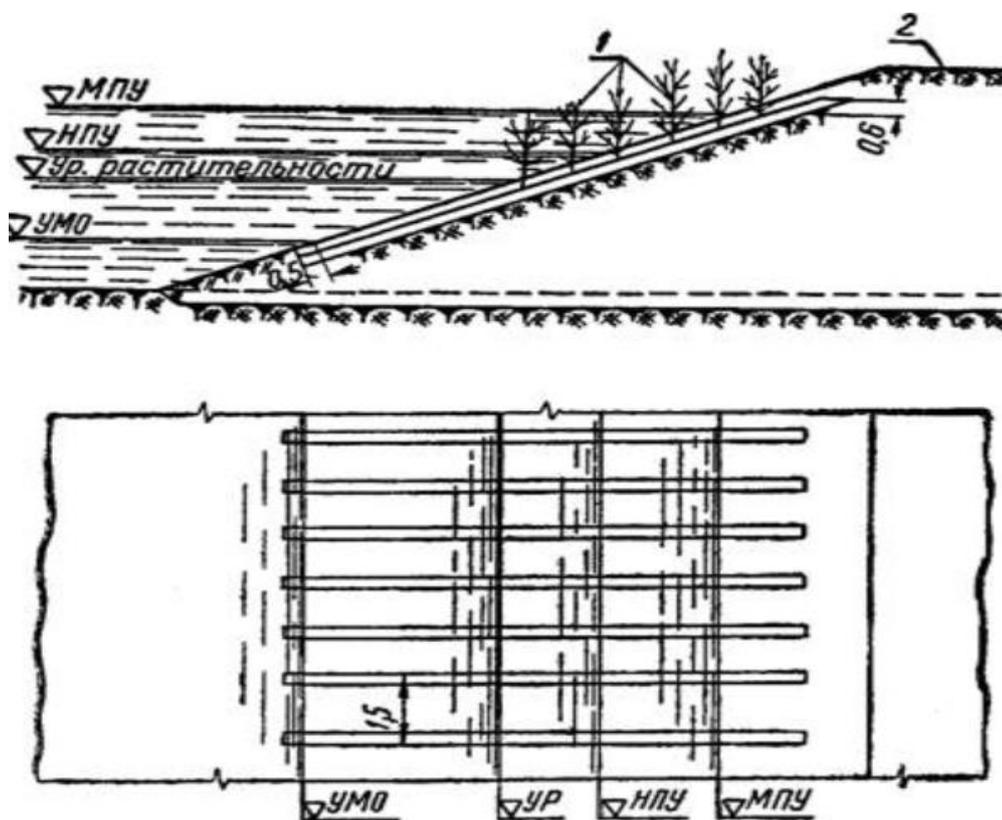


Рис. 4.24. Крепление откоса ивовыми хлыстами (размеры в м): 1 -

поросль от ивовых хлыстов; 2 - гребень плотины

Хлысты укладывают на откосе комлями к урезу воды. Такая посадка способствует развитию мощной корневой системы, которая быстро распространяется по всей высоте откоса. Наземная поросль крепления развивается на верхнем участке хлыста от вершины до уреза некоторого уровня воды - уровня растительности. Корневая система развивается выше и ниже этого уровня и распространяется вдоль всего уложенного хлыста. Приживание хлыстов даже в условиях жарких районов является более благоприятным, чем у черенков, вследствие чего обеспечивается их быстрое развитие. Посадки хорошо приживаются при употреблении свежесрубленного материала. Если производственные условия заставляют заготавливать посадочный материал заранее, лучше всего срезать его поздней осенью, когда опадают листья, или зимой, и хранить в прохладных, сырых и затененных местах. Заготавливать ивовые черенки и хлысты, когда растение покрыто листвой, недопустимо; приживаемость таких посадок будет очень плохой. Не прижившиеся посадки выкапывают и на их место сажают новые. Нормальное развитие посадок, их

корневой системы и наземной поросли может быть обеспечено только при надлежащем уходе: в первые годы развития нужно подрезать побеги, так как это способствует развитию большего количества новых побегов.

4.3.4. Границы и упоры крепления верхового откоса

При креплении откоса устанавливают две границы: верхнюю (надводную), находящуюся выше расчетного уровня воды, а нижнюю (подводную) - под минимальным уровнем сработки водохранилища (рис. 4.25).

Границу верхней (надводной) части крепления определяют по зависимости:

$$a_1 = \Delta h_{set} + h_{run1\%} \quad (4.4)$$

где a_1 - возвышение верхней границы крепления над расчетным статическим уровнем, который может быть как НПУ, так и ФПУ (МУ), в зависимости от того, при каком из этих уровней определена отметка гребня плотины/дамбы; $h_{run1\%}$ - высота наката волны на откос; Δh_{set} - высота нагона волны.

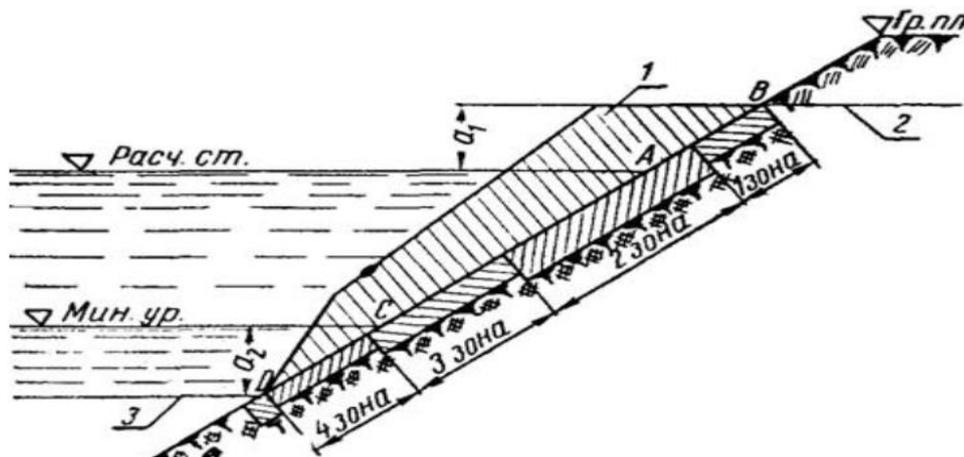


Рис. 4.25. Зональное распределение крепления откоса: 1 - эпюра силовых воздействий; 2 - граница верхнего крепления; 3 - граница нижнего крепления

В водохранилищных плотинах малой и средней высоты и небольшой протяженности верхнюю границу крепления часто доводят от отметки гребня плотины. Для плотин же повышенной высоты и большой протяженности (исчисляемой иногда километрами) целесообразно заканчивать крепление на

расчетной отметке, а выше делать облегченное крепление, назначение которого предохранить откос от случайного разрушения.

Нижняя граница крепления определится допустимой скоростью течения для грунта неукрепленной части откоса. Значение допустимой скорости можно взять с графика, а точку нахождения этой скорости на откосе - по эпюре волновых скоростей. При определении нижней границы крепления принимается минимальный уровень воды в водохранилище. В тех случаях, когда возможны испарение или сработка воды до отметки порога водоразборного сооружения, расположенного ниже УМО, границу подводного крепления понижают на величину дополнительной сработки. В водохранилищах, не имеющих призмы сработки, когда в течение всего эксплуатационного периода поддерживается, НПУ, а форсирование уровня кратковременно и незначительно, границы верхнего и нижнего крепления располагают относительно одного уровня. Такой случай характерен для речных водозаборных узлов, имеющих в составе глухую земляную плотину. Нижнюю границу крепления откоса определяют по зависимости:

$$a_2 = 2h \quad (4.5)$$

где a_2 - вертикальное расстояние от минимального уровня в водохранилище до нижней границы крепления (рис. 4.25); h - высота волны % обеспеченности при минимальном уровне и заданной скорости ветра. Её выбирают наименьшей, исходя из двух условий [11]

$$\nabla_{креп} = \nabla_{УМО} - 2 h_{1\% \text{ при } УМО}; \quad (4.6)$$

$$\nabla_{креп} = \nabla_{УМО} - 1,5 t_{льда}, \quad (4.7)$$

где $h_{1\% \text{ при } УМО} = H_{кр}$ определяется при параметрах водоёма, соответствующих УМО, м; $t_{льда}$ – толщина льда в водоеме, м.

Принятая граница крепления должна находиться ниже подводной кромки льда не менее чем на 0,3 м. Назначая нижнюю границу крепления откоса, следует принять во внимание первоначальный режим наполнения водохранилища. Если при этом режиме возможны волновые воздействия на

неукрепленную часть откоса и, следовательно, его разрушение, нужно предусмотреть облегченное крепление ниже принятой границы крепления. Рассматривая крепление откоса от верхней границы до нижней, можно видеть, что силовые воздействия, определяющие мощность крепления, не остаются постоянными, а изменяются по закону прямой. Крайние значения ординат эпюры волновых воздействий равны нулю, в то время как максимальное значение соответствует только одной точке *A* (рис. 4.26). Исходя из этого, нет необходимости на всей длине укрепляемого откоса принимать постоянную толщину крепления; следует менять ее в соответствии с величиной ординат силовых воздействий.

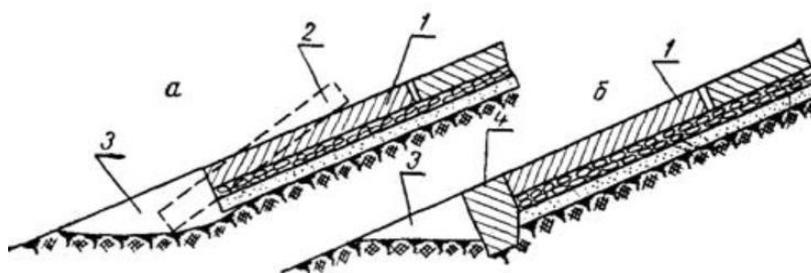


Рис. 4.26. Назначение упоров крепления откосов [9]: а - крепление без упора; б - крепление с упором; 1 - плита в проектном положении; 2 - плита после подмыва откоса; 3 - зона подмыва; 4 - упор

Так как линейное изменение толщины крепления, трудно осуществимо в производственных условиях, целесообразно дать разбивку по высоте на зоны и для каждой зоны принять постоянную толщину крепления. Переход же от большей толщины к меньшей осуществить ступенями. Это позволит разделить все покрытие откоса на участки, применяя в зоне наиболее интенсивных силовых воздействий основное крепление, а на остальной части облегченное.

Упоры, которые размещают в месте сопряжения с неукрепленным грунтом откоса или на бермах, повышают устойчивость крепления откосов, составляя с откосными креплениями одно целое. Упоры препятствуют сползанию откосного крепления и обеспечивают защиту концевой нижней часть его от подмыва. Исходя из этого, определяют размеры упоров при статическом расчете их на устойчивость. Чем круче откос, тем более

массивным должен быть упор. Заглубление же подошвы упора зависит от степени размываемости грунта волнобоем. Упоры креплений могут находиться непосредственно на откосе, когда они являются продолжением крепления, и на бермах с внутренней стороны. Упоры располагают в одну линию, когда они находятся на откосе, и в несколько линий, когда они есть на бермах. Возможна также и комбинация размещения упоров, когда последняя линия размещена на откосе, а остальные - на бермах (рис. 4.27).

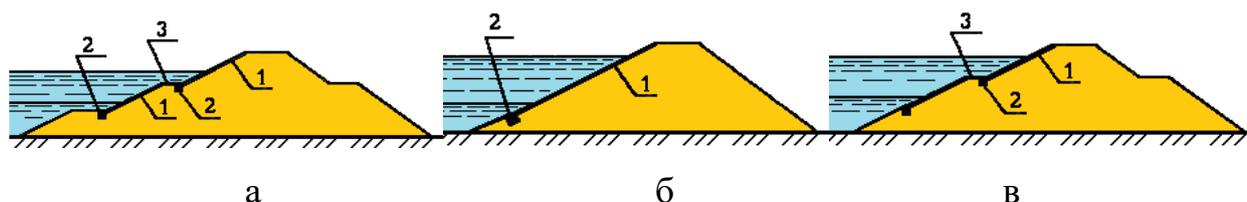


Рис. 4.27. **Размещение упоров на откосе:** *а* - на бермах; *б* - на откосе и на бермах; *в* - на откосе; 1 - крепление откосов; 2 - упоры крепления; 3 - берма

Конструктивное решение упоров для нескольких видов покрытий показано на рисунке 4.28.

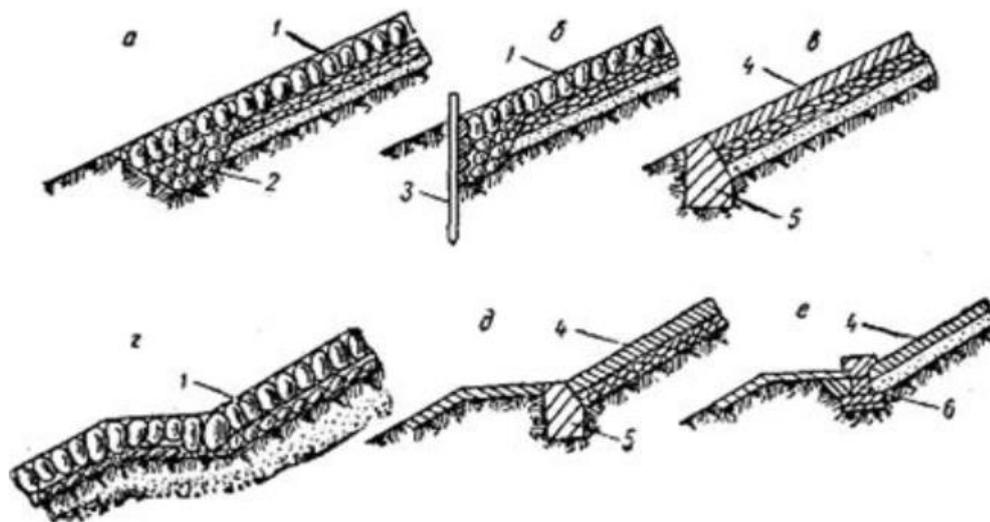


Рис. 4.28. **Конструкции упоров:** *а, б, в* - на откосе; *г, д, е* - на бермах; 1 - мостовая; 2 - каменный упор; 3 - деревянный упор; 4 - железобетонные плиты; 5 - массивный бетонный упор; 6 - сборный железобетонный упор

Обычно упор выполняют из того же материала, что и крепление. Во всех случаях устройства упоров из штучных камней укладку их ведут с перевязкой, чем достигают включения в работу всех камней. В конструкции упора со стенкой применяют деревянные сваи с заборкой из пластин, а также

железобетонные свайки с заборкой из плит. Расстояние между свайками принимают от 1,5 до 2,0 м.

Наличие бERM упрощает устройство упоров и в то же время делает их более надежными. Поэтому плотинам с бERMAми надо отдать предпочтение, а для высоких плотин устройство их считать обязательным. Горизонтальные участки бERM крепят так же, как и откосные части плотины. В концевых бERMAх, когда упор на них соответствует нижней границе крепления, горизонтальный участок может быть оставлен без крепления.

Особое внимание следует уделять бровке бERMA, так как она наиболее подвержена деформациям. Бровку при наличии сборных плит лучше закреплять бетонной монолитной опояской, при помощи которой легко осуществляется переход от горизонтального крепления к наклонному. Бетонные упоры выполняют в виде плит или массивов (рис. 4.28e). Плиты, примыкающие к бетонному упору, должны иметь соприкосновение по всей площади торцевой части плиты, шов при этом выполняют без зазоров. Бетонные упоры применяют монолитной и сборной конструкций, в последнем случае предусматривается их армирование, необходимое из условия монтажных работ. Одна из конструкций сборного железобетонного упора при расположении на бERME дана на рисунке 4.29. Приведенные конструкции упоров не исчерпывают все многообразие, встречающееся на практике, но независимо от их оформления они должны отвечать двум основным условиям, указанным выше.

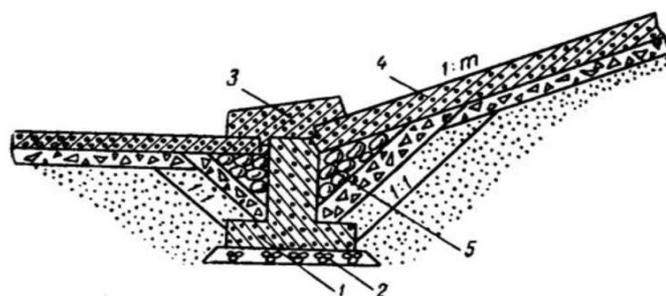


Рис. 4.29. Пример упора для сборных железобетонных покрытий: 1 - сборные железобетонные упорные балки; 2 - подготовка из гравия или щебня; 3 - монолитный бетонный оголовок; 4 - плиты покрытия; 5 - обратный фильтр

4.3.5. Крепление низового откоса земляных плотин и дамб

Низовой откос земляных плотин подвержен воздействию атмосферных осадков и ветра; для ослабления их разрушающего действия предусматривается крепление, из которого наиболее распространены: залужение, дерновое и гравийно-галечниковое покрытия. Самым простым и дешевым способом крепления откосов является **сплошное залужение** или **покрытие из рулонных газонов**, т. е. искусственно созданный дерновый покров за счет посева многолетних трав. В тех случаях, когда грунт откоса мало пригоден для произрастания трав (например, при глинистых или песчаных земляных плотинах), по плоскости откоса предварительно насыпают слой растительной земли, а по нему высевают семена многолетних трав. На крутых откосах, особенно когда они сложены из глинистых грунтов, слой растительной земли может сползать. Чтобы этого не случилось, устраивают углубления - борозды, нарезаемые параллельно бровке откоса (рис. 4.30). Несмотря на простоту и доступность способа крепления низовых откосов сплошным залужением, последнее находит ограниченное применение и может быть рекомендовано только для плотин небольшой высоты. Дело в том, что для получения прочного дернового покрова, способного противостоять разрушающему действию атмосферных факторов, требуется продолжительное время. До появления в рыхлом защитном растительном слое прочной корневой системы, которая собственно и придает прочность покрытию, обильные дожди и ливни, а, следовательно, и ручейки, стекающие по откосу, могут не только смыть слой растительной земли, но и деформировать грунт откоса.

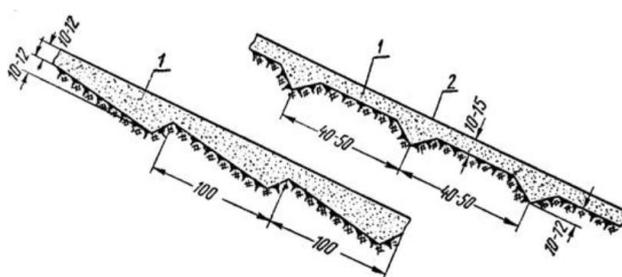


Рис. 4.30. Залужение низового откоса (размеры в см): 1 - слой растительного грунта; 2 - посев трав на откосе плотины

В какой-то степени предотвратить размыв низового откоса дождевыми осадками можно дерновым креплением, например, залужением в дерновых клетках (рис. 4.31г), часто используемым ранее.

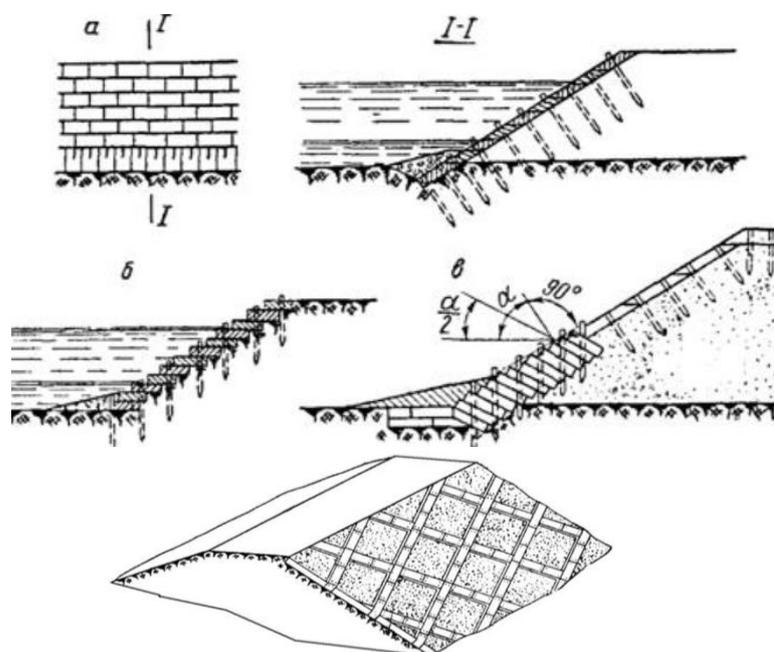


Рис. 4.31. Дерновое крепление откосов: а - плашмя; б - уступами; в - в стенку (кладка); г – одерновка в клетку

Дерновые клетки принимают размером от 0,8х0,8 м до 1,0х1,0 м, а иногда до 1,5х1,5 м. Ленты клеток выполняют из штучных дернин, уложенных непосредственно на спланированный грунт откоса. Ширину дернин принимают до 20 см и толщину – 6...10 см; длина же их определяется условиями заготовки и может быть 30...40 см и больше. При механизированной заготовке получают ленточные дернины до двух метров. Для предупреждения, смещения дернин их крепят к поверхности откоса деревянными спицами длиной 20...30 см, круглого или прямоугольного сечения примерно 2х2 см с заостренным концом. Внутреннюю часть клеток засыпают растительной землей заподлицо с верхом дернин и затем засевают травами.

После образования растительного покрова в клетках низовой откос будет иметь сплошной зеленый покров, способный противостоят разрушающему действию атмосферных влияний. Если нет дерна или некогда ждать его приживания на откосе, для образования клеток применяют камень. Во всех

случаях, когда низовой откос плотины укрепляют залужением, следует применять смеси семян многолетних трав, которые своей хорошо развитой корневой системой создают прочный дерновой покров, а подбирать травосмеси нужно с учетом географических зон.

Чтобы посеянные семена не сдувал ветер, проводят легкое уплотнение поверхностного слоя. Для более равномерного распределения семян при посеве, когда он ведется вручную, к ним добавляют песок, сухую землю или влажные опилки. Полезно в смесь семян, состоящих из луговых трав, добавлять семена покровных злаков - ржи, ячменя или овса, стебли которых хорошо защищают молодые всходы трав от заморозков, осушающего действия ветра и солнечных лучей. Для усиленного крепления откосов применяют дерновку плашмя сплошь и дерновку в стенку (рис. 4.31а - в). В креплении дерновкой плашмя сплошь (рис. 4.31а) штучные дернины укладывают вплотную друг к другу без зазоров и прикрепляют к откосу деревянными спицами, забиваемыми по углам каждой дернины. После укладки дернового ковра его нужно систематически поливать, если, конечно, в это время нет дождей. Поливают до тех пор, пока дерн не приживется, иначе он высохнет и покрытие не будет отвечать своему назначению.

Иногда **из штучных дернин в стенку** укладывают горизонтальными рядами с уступами (рис. 4.31б) и с прикреплением к откосу деревянными спицами. Этот способ усиленного крепления более прочный. Третий способ сплошного крепления состоит в укладке дернин одинакового размера перпендикулярно откосу, а для более пологих откосов - наклонно по направлению биссектрисы угла, образуемого поверхностью откоса с бровкой его (рис. 4.31в). При залужении (сплошном и в клетках) по стыку горизонтальных и наклонных участков укладывают сплошной дерновой пояс (рис. 4.32).

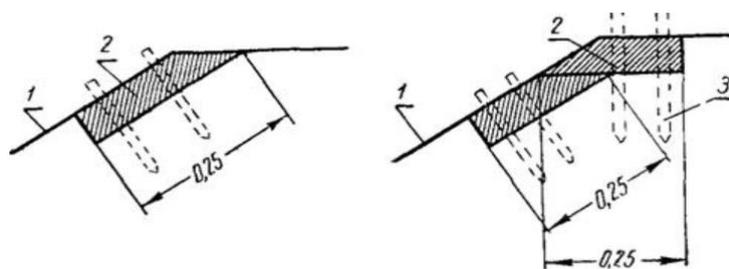


Рис. 4.32. Крепление бровки дерновым поясом (размеры в м): 1 - откос; 2 - дерн; 3 - спицы длиной 0,25...0,30 м и сечением 0,025 x 0,025 м

В отдельных случаях бровка может быть укреплена бетонными поясками или железобетонными бордюрными балками. Дерновое крепление и залужение целесообразно применять там, где есть условия для произрастания трав. В современном строительстве для укрепления откосов плотин и дамб, склонов берегов водных объектов широко используются рулонные газоны (рис. 4.33).

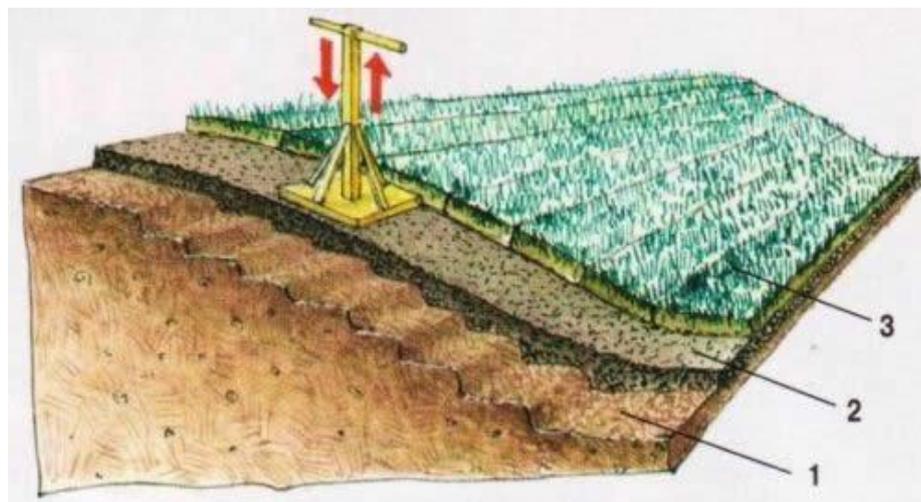


Рис. 4.33. Схема укладки рулонного газона: 1 — подготовка основания бороздами или ступенями; 2 — трамбовка плодородного грунта; 3 — дернина (рулонный газон)

В районах с жарким климатом, а также там, где по местным условиям заготовка дерна сопряжена с трудностями и большими затратами или требует транспортировки на большое расстояние, применяют крепление в виде сплошного покрытия гравелисто-галечниковой смесью или щебнем. Толщину такого покрытия принимают от 5 до 10 см.

4.4. Дренажи земляных плотин и дамб

Дренажи земляных плотин служат для понижения кривой депрессии, предотвращения выхода фильтрационного потока на низовой откос и отвода профильтровавшейся воды через тело плотины в нижний бьеф. Дренаж является хорошим средством для повышения устойчивости низового откоса, так как при более глубоком расположении его в теле плотины снижается фильтрационная сила и увеличивается устойчивость откоса. При устройстве плотин без дренажа необходимо учитывать режим работы водохранилища, от которого собственно и зависит возможность устройства бездренажных плотин. Дренаж должен:

- обладать достаточной неизменной во времени пропускной способностью, обеспечивающей полный отвод поступающей к нему воды;
- не допускать выноса частиц грунта из тела и основания плотины;
- быть по возможности легко доступным для контроля и наблюдения за его работой;
- обеспечивать положение кривой депрессии от поверхности низового откоса ниже глубины промерзания;
- иметь рабочую часть выше расчетного уровня воды в НБ.

Земляные плотины без дренажей допускаются возводить высотой до 5 м, если устойчивость низового откоса не вызывает сомнения. Плотины большей высоты могут быть выполнены без дренажей в следующих случаях:

- при проницаемом основании и низком стоянии уровня грунтовых вод, когда кривая депрессии проходит в теле плотины и обеспечена глубина промерзания от плоскости низового откоса до кривой депрессии;
- в плотинах из разнородных грунтов, у которых низовой клин выполнен из материала с большим коэффициентом фильтрации по сравнению с грунтом тела плотины, так как в этом случае низовой клин выполняет роль дренажа;
- имеются противофильтрационные преграды, за которыми кривая депрессии расположена близко к поверхности земли;

- когда грунтовый поток выходит на низовой откос, но отсутствуют фильтрационные деформации и в то же время обеспечена общая статическая устойчивость низового откоса, несмотря на повышенное значение фильтрационной силы.

Дренаж в земляных плотинах устраивают обычно в низовом клине и в основании плотины. Он состоит из двух основных частей: 1 - *приемной* в виде того или иного устройства, обеспечивающего поступление грунтового потока, и предупреждающего фильтрационные деформации; 2 - *отводящей*, которая транспортирует профильтрованную воду в НБ. По конструкции и расположению в теле плотины дренажи делятся на *наружные, внутренние и комбинированные*. Местоположение внутреннего дренажа зависит от расстояния кривой депрессии до поверхности низового откоса с учетом глубины промерзания. Чем больше дренаж вдвинут в тело плотины, тем благоприятнее условия для фильтрационного потока в зимний период. Однако вместе с тем появляются градиенты в зоне дренажа и увеличивается фильтрационный расход. Глубоко вдвинутые дренажи повлияют на устойчивость низового откоса за счет уменьшения фильтрационных сил, но эксплуатационные условия ухудшаются ввиду затруднительности ремонтных работ.

Гидротехническая практика выработала значительное количество конструкций дренажей, применение той или иной конструкции обуславливается типом плотины, грунтами ее тела и основания и зависит от наличия материалов для дренажей. При прочих равных условиях тип дренажа должен отвечать условиям экономической целесообразности, простоте выполнения и механизации всех процессов при его устройстве. Опыт показывает, что стоимость дренажей составляет до 30% стоимости плотины, поэтому выбору рационального типа дренажа придается большое значение.

Основные типы дренажей, которые зарекомендовали себя в плотиностроении, следующие: дренажная призма; плоский горизонтальный дренаж; ленточный дренаж; комбинированный, представляющий собой

сочетание первых двух типов дренажей; внутренний каменный; трубчатый горизонтальный и вертикальный; наклонный и прочие. Каждый из перечисленных типов дренажей имеет свои достоинства и недостатки, оценить которые лучше всего при рассмотрении дренажа в конкретных условиях. Дренажи должны нормально работать как в летний, так и в зимний период. В районах с продолжительными морозными периодами устья отводящей части дренажа следует утеплять, защищая от обмерзания. Закупорка выходного сечения дренажа ледяными пробками неизбежно повлечет к повышению кривой депрессии с вытекающими из этого последствиями. У подошвы низового откоса для отвода выходящей из дренажа воды устраивают сборные канавки с уклоном в сторону пониженных мест, чаще в направлении к водотоку.

Дренажная призма - весьма распространенный тип дренажа, оправдавший себя на практике и имеющий много положительных сторон: доступность выполнения простыми средствами; повышение устойчивости низового откоса (своего рода упор для плотины); защита низового откоса от волновых воздействий; дренирование не только плотины, но и ее основания; дренирование тела плотины при подъеме уровня воды в НБ. Недостаток дренажной призмы состоит в том, что поперечное сечение ее во много раз превышает требуемые размеры, необходимые для приема и отвода профильтрованной воды, отсюда требуется очень большой объем камня и материалов для обратного фильтра. Кроме того, устройство призмы трудоемко и требует применения ручного труда.

В поперечном сечении дренажная призма имеет форму трапеции с заложением откоса со стороны плотины не менее 1,0...1,25, а со стороны НБ не менее 1,5. Изменение заложения откосов дренажа в большую сторону не ограничивается, если это вызывается снижением кривой депрессии или дренированием грунтов основания. Ширину дренажной призмы поверху назначают по конструктивным соображениям или из условия производства работ. Какое-либо хозяйственное или строительное использование гребня

призмы, например, проложенной по ней дороги, ранее считалось недопустимым. Ширина дренажной призмы поверху обычно бывает от 1/4 до 1/3 ее высоты, но не менее 1 м. Ориентировочно считают, что оптимальная высота дренажной призмы составляет 0,15...0,20 от высоты плотины. При принятой высоте призмы, исходя из обеспечения заданного расстояния от плоскости низового откоса до кривой депрессии, можно определить ширину дренажной призмы по основанию.

В тех случаях, когда в НБ есть вода, гребень дренажной призмы располагают выше максимального уровня с запасом на накат волны. При кратковременном подъеме уровня воды НБ выше гребня дренажа, что бывает в водохранилищных плотинах в период пропуска паводковых расходов, допускается выполнять дренаж пониженной высоты, а низовой откос выше гребня для предупреждения размыва от волновых воздействий укреплять (рис. 4.34).

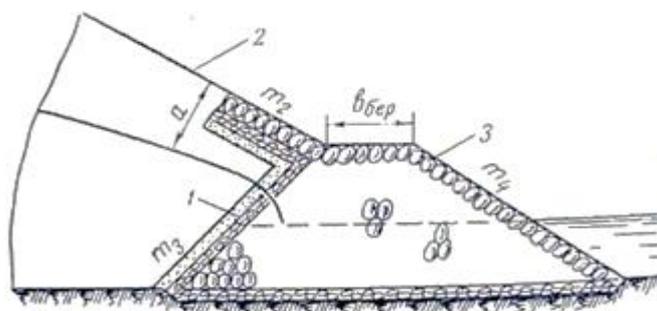


Рис. 4.34. Дренажная призма: 1 – обратный фильтр; 2 – откос плотины; 3 – отмостка; a – не менее глубины промерзания; в соответствии с действующим СП заложения откосов обозначаются – верхового $m_1 = m_h$ и низового $m_2 = m_t$ [4]

Обратный фильтр в дренажных призмах укладывают по двум плоскостям со стороны примыкания к плотине (по внутреннему откосу банкета) и по основанию. Заложение внутреннего откоса $m' = m_3$ банкета следует принимать равным углу естественного откоса материала, образующего обратный фильтр. Если грунты тела плотины и основания одинаковы, обратный фильтр также будет одинаковым по обеим плоскостям. При разных грунтах тела плотины и основания в многослойных обратных фильтрах количество слоев по

плоскостям может быть разное, соответственно диаметры фракций по слоям могут не совпадать.

Плоский горизонтальный дренаж состоит из одного или нескольких слоев песчано-гравийных материалов, подобранных и уложенных по типу обратного фильтра (рис. 4.35). Такой дренаж имеет значительное преимущество перед дренажной призмой как в отношении уменьшения объема дорогостоящего каменного материала, так и в отношении простоты и механизации всех процессов по устройству дренажа. Работы по дренажу можно вести одновременно с возведением тела земляной плотины. Наполнение водохранилища можно начинать раньше окончания всех работ по плотине, так как дренаж к этому времени уже готов. Достоинство плоского дренажа - способность дренировать основание плотины, что особенно важно для глинистых грунтов, когда в них появляется поровое давление.

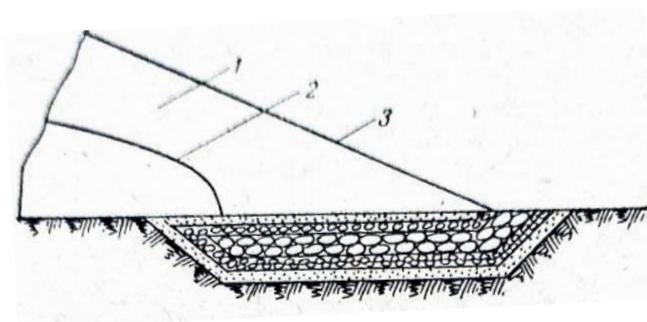


Рис. 4.35. **Плоский горизонтальный дренаж:** 1 – тело плотины; 2 – кривая депрессии; 3 - откос

Применять плоский дренаж особенно целесообразно в плотинах, когда в НБ нет воды. Кратковременный подъем воды не отражается на работе дренажа, так как за это время значительного изменения в положении кривой депрессии не произойдет. Продолжительное стояние воды в НБ приводит к выключению дренажа из работы, плотина фактически становится бездренажной. В результате этого кривая депрессии повысится и грунтовый поток появится на низовом откосе, а устойчивость откоса снизится и, если он на этот случай не был рассчитан, произойдет разрушение его. Толщину плоского дренажа определяют как сумму толщин слоев обратного фильтра. Учитывая укладку и

разравнивание грунта фильтра механизмами, толщину каждого слоя следует принимать не меньше 0,2 м.

Разновидностью плоского горизонтального дренажа является **ленточный дренаж**, в котором вместо широкой постели дается сравнительно неширокая лента (рис. 4.36). Предварительная длина такого дренажа назначается в пределах 0,4...0,6 длины горизонтальной проекции низового клина плотины. Толщина наиболее крупнозернистой выводной, средней по высоте части, ленты плоского дренажа принимается 0,3...0,5 м. Общая толщина зависит от числа слоев обратного фильтра со стороны тела и основания плотины. Для отвода воды из ленточного дренажа перпендикулярно к нему, с разрывами до 50 м, выполняются отводящие полосы, выходящие к подошве низового откоса. Фракционный состав таких поперечных выпусков принимается такой же, как и продольных лент. Для отвода профильтровавшейся воды ленточной части дренажа, как и отводящей, придают уклон.

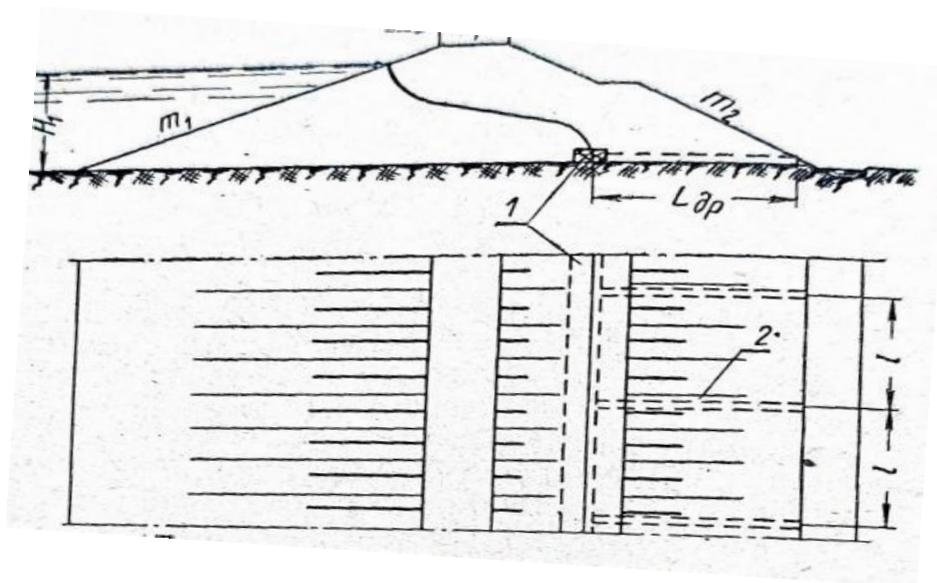


Рис. 4.36. **Ленточный дренаж**: 1 – приёмная часть дренажа – лента; 2 – отводящая часть дренажа; в соответствии с действующим СП заложения откосов обозначаются – верхового $m_1 = m_h$ и низового $m_2 = m_i$ [4]

Применяя сочетание плоского горизонтального дренажа с призмой, можно получить **комбинированный дренаж**, соединяющий в себе положительные свойства того и другого (рис. 4.37). Даже глубокое расположение начала дренажа в теле плотины, которое иногда требуется из условия повышения

устойчивости низового откоса, не влечет за собой чрезмерного увеличения объема каменных материалов, что неизбежно бывает при дренажной призме.

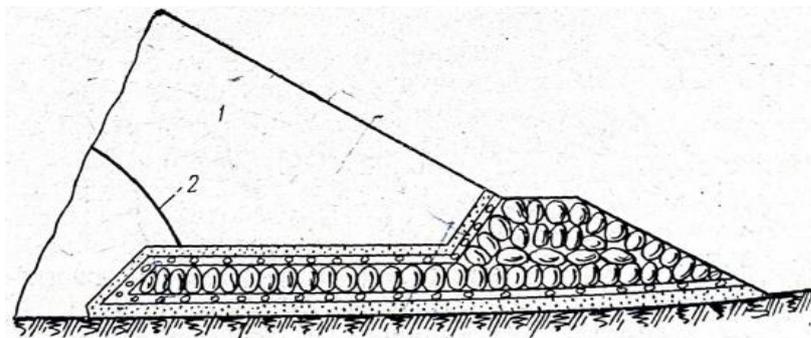


Рис. 4.37. Комбинированный дренаж: 1 – тело плотины; 2 – кривая депрессии

Сопряжение с низовым откосом в комбинированном дренаже сохраняет все положительные свойства, присущие дренажной призме. Повышение уровня воды НБ не влечет за собой прекращение работы дренажа, так как после подтопления плоской части вступает в работу призма. Для недопущения фильтрационных деформаций по внутреннему откосу дренажной призмы, контактируемому с грунтом тела плотины, укладывается обратный фильтр.

Горизонтальный трубчатый дренаж имеет приёмную часть – трубу, обложенную по периметру обратным фильтром. Такой дренаж располагается параллельно подошве низового откоса на расстоянии, при котором обеспечивается заданный размер от кривой депрессии до плоскости низового откоса, примерно равным $0,4...0,6$ длины горизонтальной проекции низового клина плотины. Более глубокое расположение трубчатого дренажа применяют для повышения статической устойчивости плотины, получающейся в результате уменьшения фильтрационной силы. Фильтрационный поток в продольные дрены поступает через отверстия или прорези в трубе, а при коротких звеньях труб через торцовые зазоры, выход воды из продольных дрен происходит через поперечные дрены выпуски, располагаемые не чаще чем через 50 м (рис. 4.38).

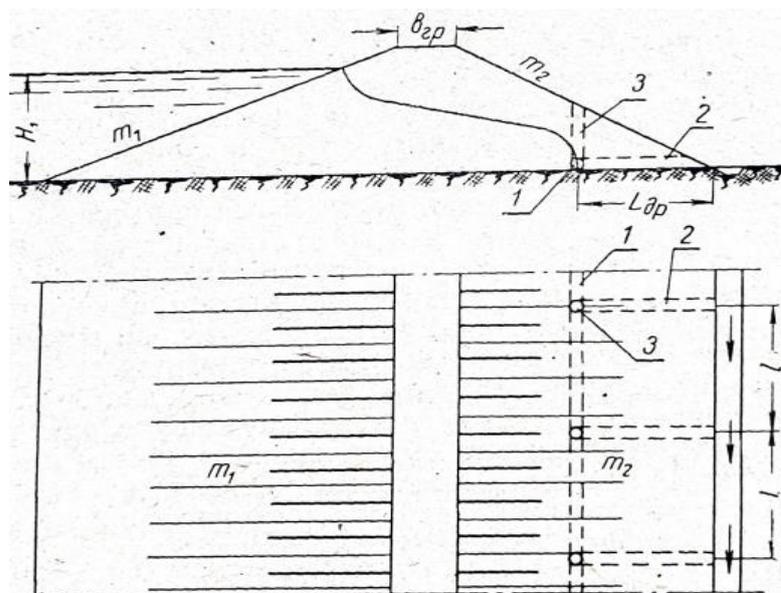


Рис. 4.38. **Внутренний дренаж:** 1 – продольные дрены; 2 – поперечные дрены; 3 – смотровые колодцы; в соответствии с действующим СП заложения откосов обозначаются – верхового $m_1 = m_n$ и низового $m_2 = m_i$ [4]

Для горизонтального трубчатого дренажа применяют гончарные, бетонные, железобетонные, асбестоцементные, пластиковые и деревянные трубы. На конструкцию дренажа материал труб существенного влияния не оказывает, разница бывает только в деталях сопряжений. Широко распространены в горизонтальных дренажах асбестоцементные трубы: их легко резать, сверлить, они дешево стоят, коррозионно устойчивы, однако плохо сопротивляются ударным нагрузкам. В дренажах асбестоцементными трубами отверстия (диаметром до 1 см) для приема профильтрованной воды просверливают электродрелью. Располагают их в шахматном порядке в нижней части трубы. Количество отверстий на 1 пог. м трубы зависит от диаметра (60 штук и больше). Звенья труб соединяют муфтами.

Продольные дрены укладывают с необходимым уклоном для слива воды от одного выпуска до другого. Скорость воды в дренажных трубах должна быть не более 3 м/сек, а наполнение, учитывая безнапорное движение, не должно превосходить $0,8d$. При большой длине плотины и напоре, превосходящем 10 м, на дренажной линии иногда устраивают линейные смотровые колодцы (по типу водопроводно-канализационных с внутренним диаметром от 90 до 100 см)

и в этом случае поперечные дрены-выпуски приурочивают к ним. Смотровые колодцы ставят в местах изменения диаметра или уклона продольных дрен. При прямолинейном расположении трубчатого дренажа смотровые колодцы располагают на расстоянии 50...100 м друг от друга. В безколодезном варианте сопряжение продольной и поперечной дрен показано на рисунке 4.39.

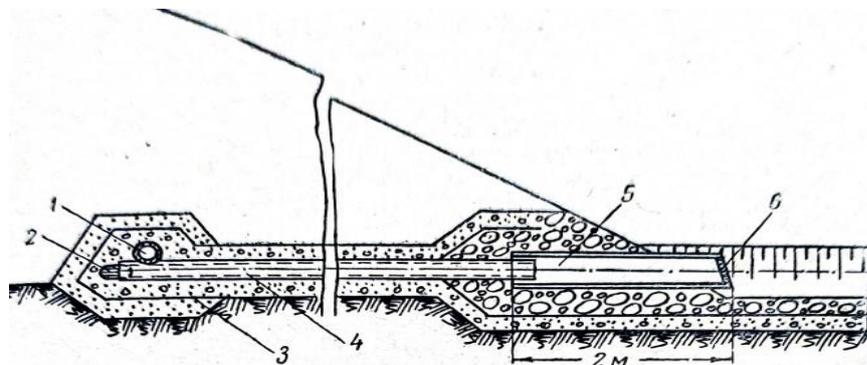


Рис. 4.39. **Внутренний трубчатый дренаж** (размеры в м): 1 – приёмная труба; 2 – заглушка; 3 – обратный фильтр; 4 – отводящая труба; 5 – деревянный короб или металлическая (железобетонная) труба; 6 – металлическая сетка

Снизу кладут трубу выпуска, а сверху на нее продольную дрену. В месте стыка на обеих трубах делают вырезы, через которые вода поступает из продольной дрены в поперечную, в торцовое отверстие трубы поперечной дрены у стыка с продольной закладывают камень на глинистом растворе. Учитывая хрупкость асбестоцементных труб в концевой части выпуска, выходящего на низовой откос, ставят двухметровый отрезок металлической или железобетонной трубы большего диаметра, чем асбестоцементная труба. Кольцевой зазор между трубами заделывают по типу сальника.

В место металлических или железобетонных труб иногда применяют деревянные короба прямоугольного сечения, однако дерево в условиях переменной влажности недолговечно, требуются периодические ремонтные работы. Выходной торец трубы выпуска покрывают сеткой. Диаметр труб в продольных дренах определяют, исходя из гидравлических расчетов, при безнапорном пропуске максимального фильтрационного расхода. Так как поток воды по дренажной трубе протекает с переменным расходом, максимальное значение его будет в сечении у смотрового колодца или в месте расположения

поперечной дрены. Отводящие устройства внутренних дренажей, выполняемые в виде труб или лент должны иметь уклон в сторону НБ в пределах 0,04...0,05. Из производственных условий применять трубы диаметром меньше 0,2 м не рекомендуется. Разновидностью горизонтального трубчатого дренажа является **внутренний каменный дренаж**, в котором трубу заменяет каменная призма (рис. 4.40).

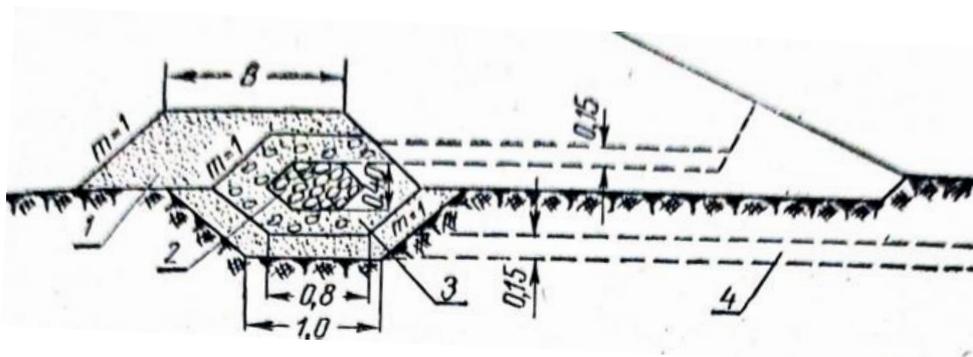


Рис. 4.40. **Внутренний каменный дренаж** (размеры в м): 1 – песок; 2 – камень или галька; 3 – гравий; 4 – к водоотводной канаве

Для предупреждения фильтрационных деформаций по периметру призмы укладывают обратный фильтр, чаще многослойный. Профильтрованная вода отводится по поперечным дренажам-выпускам, примыкающим в одной плоскости к продольным дренажам. Внутренний горизонтальный дренаж экономичен, но для выполнения его необходим ручной труд. Конструкции по типу горизонтального внутреннего дренажа целесообразно применять в плотинах с пониженным положением кривой депрессии, небольшим фильтрационным расходом и при отсутствии воды в НБ. Неизбежным следствием появления воды за плотиной будет подтопление дренажа и выключение его из работы. Если уровень воды в НБ постоянный, такой дренаж располагают выше этого уровня, с расчетом, чтобы выходное сечение поперечной дрены не было подтоплено.

Наслонный дренаж в виде укрепления многослойным фильтром низового откоса применяют в бездренажных плотинах для предотвращения выноса частиц грунта из тела плотины фильтрационным потоком. Сверху фильтра укладывают защитное покрытие на случай волнового воздействия на откос (рис. 4.41). Наслонный дренаж не оказывает влияния на понижение кривой

депрессии, а выполняет лишь роль защиты откоса от фильтрационных деформаций и от волнового воздействия, когда в НБ есть вода.

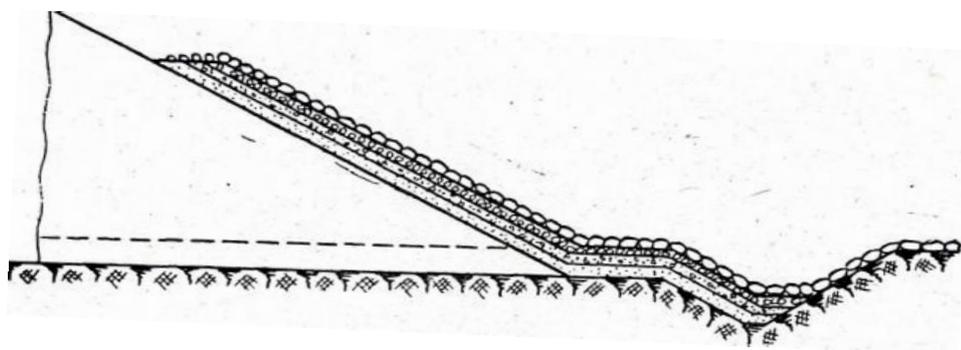


Рис. 4.41. **Наслонный дренаж:** пунктиром показан снятый растительный слой

Как мера предупреждения деформаций откоса, наслонный дренаж имеет ряд положительных сторон: он доступен для наблюдения, осмотра и ремонта в процессе эксплуатации; чрезвычайно прост по исполнению; допускает производство работ по очередям и устройство в процессе эксплуатации: требует сравнительно небольшого количества материала. Отрицательная сторона наслонного дренажа - перерыв в работе зимой из-за промерзания откоса. Отметка верха наслонного дренажа должна, как минимум, превышать максимальный уровень НБ на величину $h_s = 0,5...1,0$ м. Толщина последнего слоя наслонного дренажа должна быть не менее $3D_{85\%}$ применяемого каменного материала.

Современные типы дренажных устройств, наиболее часто используемые в мелиоративной гидротехнике приведены на рисунке 4.42 и в приложении ПЗ.

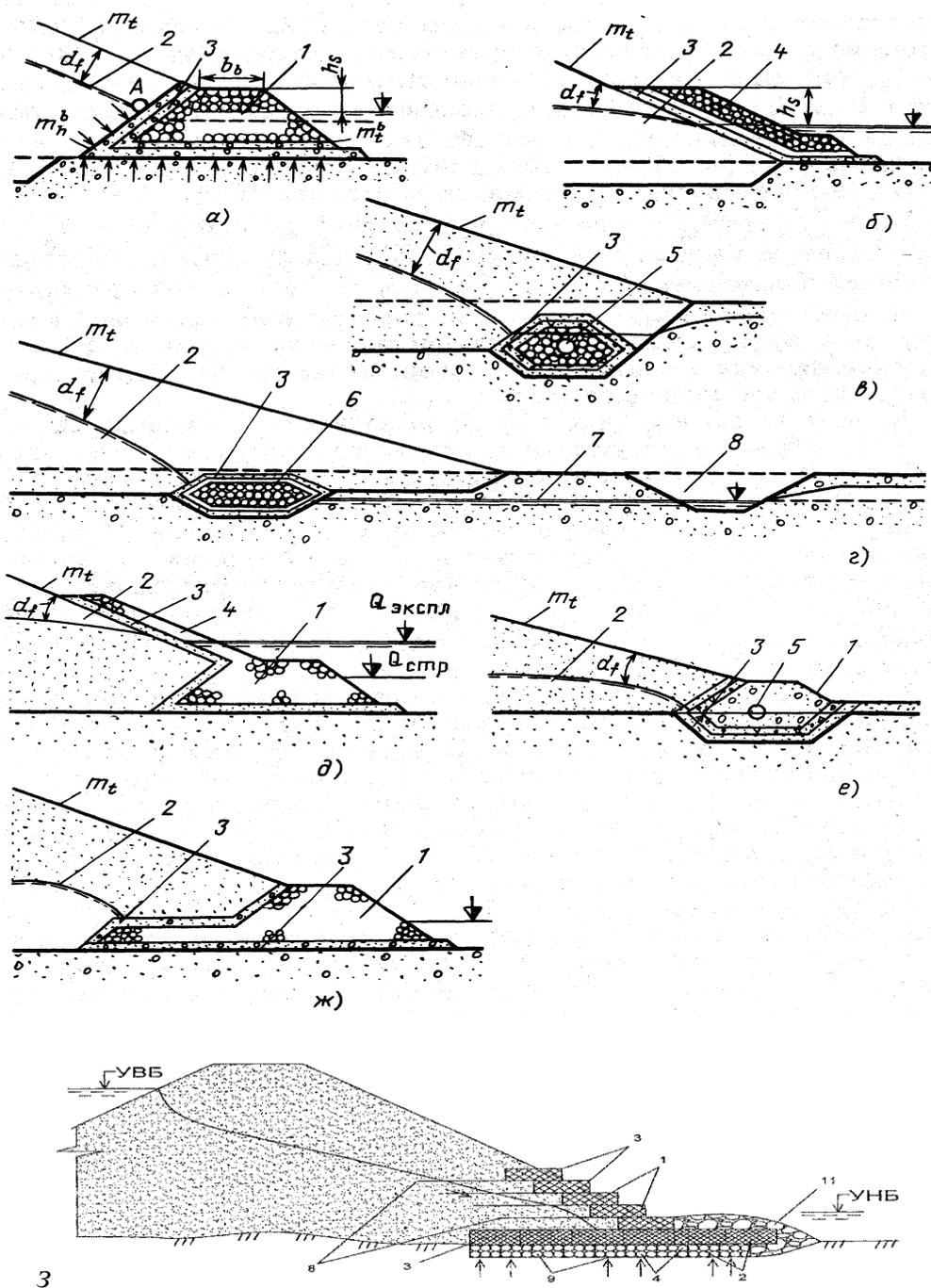


Рис. 4.42. Основные элементы современного дренажа низового клина

ПЛОТИНЫ: а - дренажный банкет; б - наклонный дренаж; в - трубчатый дренаж; г - горизонтальный дренаж; д-ж - комбинированные дренажи; 1 - дренажный банкет; 2 - поверхность депрессии; 3 - обратный фильтр; 4 - наклонный дренаж; 5 - труба; 6 - дренажная лента; 7 - отводящая труба; 8 - отводящая канава; d_f - максимальная глубина промерзания; b_b - ширина банкета поверху; 9 - из габионных структур

Несмотря на то, что выбор типа дренажа - технико-экономическая задача, при её решении надо учитывать и расположение участка плотины,

соответственно в **береговой, пойменной** или **русловой** части створа. Например: при наличии достаточного количества каменного материала предпочтение для *русловых* и *пойменных* дренажей следует отдавать *дренажной призме* (рис. 4.34, 4.42а, ПЗ); в однородных плотинах наклонный дренаж должен применяться комбинированно – в сочетании с другими видами дренажей (плоским, ленточным или трубчатым дренажом, обеспечивающих необходимое заглубление кривой депрессии), при этом ось приемной части этих дренажей должна быть выше минимального уровня НБ в период эксплуатации, т.е. выше отметки НБ, соответствующей расходу полезных попусков; дренажи незатопляемых *береговых* участков плотины выполняются менее материалоемкими - наиболее простым в производстве работ и хорошо дренирующим тело и основание плотины является *плоский горизонтальный дренаж* (рис. 4.35, 4.42г, ПЗ): на тех участках плотины, где в период ее эксплуатации вода в НБ отсутствует или присутствует кратковременно, следует применять *трубчатый дренаж* (рис. 4.39, 4.42в, ПЗ).

Дренажи *береговых* участков грунтовых плотин устраивают, начиная с сечения, в котором напор на плотине при НПУ составляет ≥ 2 м. В последнее время получили распространение конструкции ярусных дренажей в виде горизонтальных, наклонных или вертикальных лент, заглубленных в тело плотины. Их выполняют для: обеспечения устойчивости верхового откоса плотины из маловодопроницаемых грунтов при быстрой сработке водохранилища; для уменьшения порового давления и ускорения процесса консолидации в глинистых грунтах.

Отвод воды, профильтровавшейся через тело дамб обеспечивают с помощью приоткосного дренажа, иногда его функцию выполняет придамбовый канал.

Обратные фильтры. В зоне подхода грунтового потока к дренажу градиенты напора возрастают, тем самым создаются условия для фильтрационных деформаций грунта основания и тела плотины. Для

предупреждения деформаций приемную часть дренажа защищают обратными фильтрами. Для устройства обратных фильтров дренажей применяются несвязные естественные грунты или грунты, получаемые дроблением (см. П1), а также искусственные пористые, минеральные волокнистые материалы или геотекстиль. Их подбор осуществляется по методикам ВНИИГ им Б.Е. Веденеева, ВНИИ "ВОДГЕО", изложенным в специальной литературе [10, 14, 26, 33]. В классическом представлении обратные фильтры представляют собой ряд последовательно уложенных слоев из песчано-гравелистых и щебенистых грунтов с увеличивающейся крупностью частиц при переходе от одного слоя к другому в направлении фильтрационного потока. Фракционный состав зерновых (грунтовых) фильтров подбирают таким образом, чтобы через них свободно протекала вода, но не выносились частицы защищаемого грунта, и обеспечивалась непроницаемость материала фильтра из одного слоя в другой. Оценка пригодности грунтов для обратных фильтров и переходных зон или подбор зернового состава обратных фильтров в дренажах грунтовых плотин в курсовом проекте может быть осуществлена в соответствии с [4, 9] по методу с применением графиков В.С. Истоминой или по методу К. Терцаги. При этом следует отметить, что обратные фильтры, подобранные с применением метода К. Терцаги, получаются более мелкозернистыми и, как следствие, возможно получение фильтра с бóльшим количеством слоев.

Обратные фильтры, применяемые в дренажах, в зависимости от условий подхода фильтрационного потока делятся на три типа: контакт грунта с фильтром горизонтальный или наклонный, фильтрационный поток поступает сверху вниз, обратный фильтр расположен под защищаемым слоем (рис. 4.43, I тип); контакт грунта с фильтром горизонтальный или наклонный, фильтрационный поток поступает в основном вверх снизу, обратный фильтр расположен над защищаемым слоем (рис. 4.43, II тип); контакт грунта с фильтром горизонтальный или наклонный, фильтрационный поток содержит больше слов обратного фильтра (рис. 4.43, III тип).

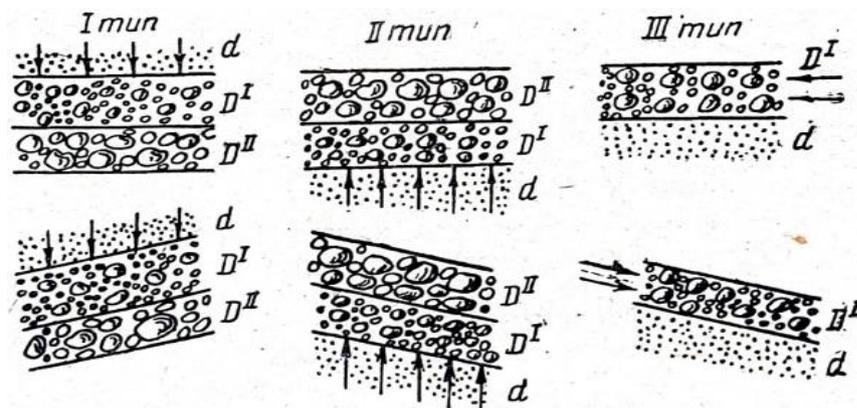


Рис. 4.43. Типы зерновых обратных фильтров дренажей: стрелками показано направление фильтрационного потока

Помимо грунтовых обратных фильтров в нормативных документах разрешается при соответствующем обосновании использовать обратные фильтры из пористого бетона и других пористых и полимерных материалов [10]. В последние десятилетия в качестве фильтров дренажных устройств и фильтровых подготовок часто используют геотекстиль (рис. 4.44) [10]. Опыт эксплуатации показал высокую надёжность геотекстиля, достаточную долговечность и неизменность основных свойств.

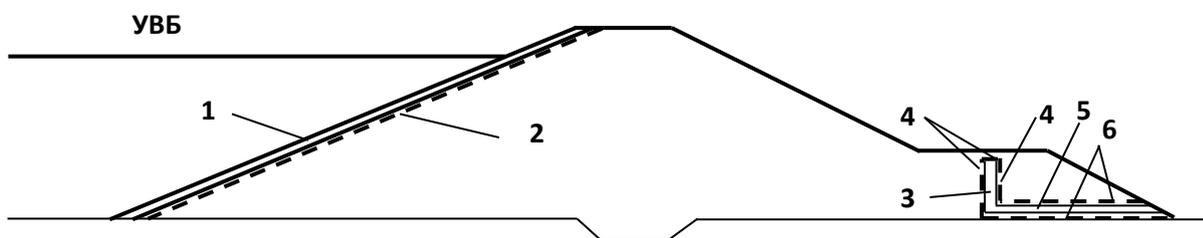


Рис. 4.44. Применение геотекстиля в качестве обратного фильтра в грунтовой плотине Samira, Нигерия, высота 18 м, 2001 г.: 1 – каменная наброска; 2 – геотекстиль с эффективным размером пор $O_w = 0,08$ мм; 3 – дренаж в виде заполненной дренирующим грунтом вертикальной траншеи, пройденной в насыпи тела плотины из глинистого грунта; 4 – геотекстиль с $O_w = 0,1$ мм; 5 – горизонтальный дренаж, защищенный сверху и снизу геотекстилем 6 с $O_w = 0,1$ мм

Основные требования к геотекстильным материалам при их использовании вместо обратных фильтров: некольматируемость (или ограниченная степень кольматации при её учёте в расчётах устойчивости откосов) геотекстиля

частицами защищаемого грунта; достаточный коэффициент фильтрации в поперечном (к плоскости полотна) направлении.

Подбор марки геотекстильных материалов из многообразия их типов, выпускаемых различными фирмами в мировой строительной практике (Дорнит, Terram, Турар, Geolon, Enkadrain и т.д.) производится в соответствии с Европейскими нормами 640 552 в зависимости от типа и характеристик фракций защищаемых грунтов тела и основания плотины по минимальному и максимальному значению эффективного размера пор геотекстильного материала и коэффициенту фильтрации геотекстиля в поперечном направлении (см. примеры подбора в [10]). При этом из ряда отобранных марок при окончательном выборе геотекстиля учитывают и дополнительные критерии: стоимость, размеры рулона, вес и т.п.

Материал для зерновых фильтров дренажных устройств должен быть морозостойкий и не растворимый фильтрационной водой, причем лучше применять камни изверженных пород. Песчаные грунты и их смеси с гравелистыми и щебенистыми материалами не должны содержать частиц диаметром $d < 0,1$ мм более 3...5% по весу. Подбор слоев обратного фильтра наиболее просто решается, когда грунт однородного механического состава (коэффициент неоднородности равен единице). При этом достаточно, чтобы частицы защищаемого грунта не проходили через поры первого слоя фильтра, а те, в свою очередь, не проходили через поры второго слоя и т. д.

В естественных условиях однородный грунт встречается очень редко, тем более требуемого диаметра. Фракционировать грунт для получения заданного размера частиц практически невозможно. Поэтому для обратных фильтров дренажей применяют грунтовую смесь, состоящую из частиц различного диаметра. Такие разнотернистые смеси встречаются в естественных залежах, а в необходимых случаях могут быть получены искусственным путем. Для подбора слоев многослойного обратного фильтра существует несколько способов, разница между ними заключается в методическом подходе к оценке явления непроницаемости мелких частиц грунта через поры крупных. Оценка

пригодности грунтов для обратных фильтров и переходных зон, подбор количества слоёв или подбор зернового состава обратных фильтров в дренажах грунтовых плотин из карьерных материалов дан в учебных пособиях [10, 14]. Пользуясь им по методу К. Терцаги можно сделать расчёты для выполнения курсовых работ и проектов, а в выпускных квалификационных работах – используя метод В.С. Истоминой. При этом следует отметить, что обратные фильтры, подобранные с применением метода К. Терцаги, получаются более мелкозернистыми и, как следствие, возможно получение фильтра с бóльшим количеством слоёв.

Метод, разработанный В.С. Истоминой, наиболее прост и доступен. В нём использованы графики (рис. 4.45), имеющие однотипное строение для различных случаев их применения.

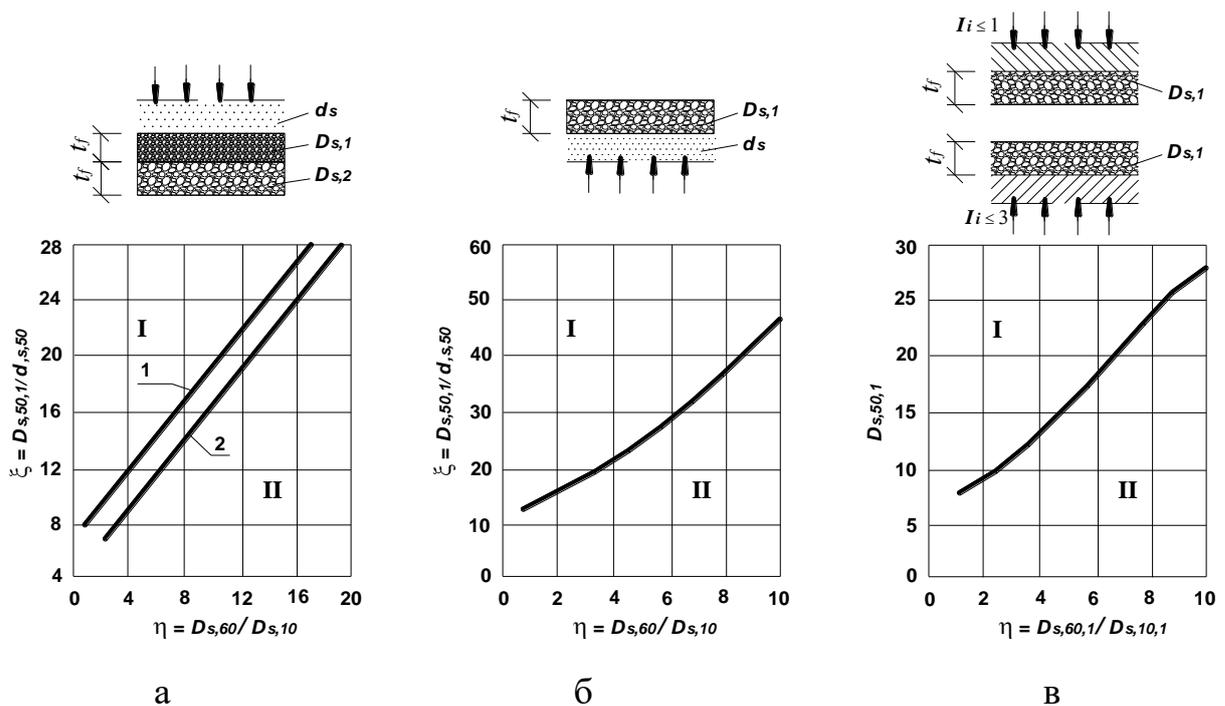


Рис. 4.45. Графики В.С. Истоминой для подбора слоев обратного фильтра, при толщине слоя $t_f = 20$ см: а, б – для фильтров, защищающих несвязные грунты, соответственно, при нисходящем (тип I) и восходящем (тип II) фильтративном потоке; в – для первого слоя фильтра, защищающего связные грунты. I, II – соответственно, область недопустимых и допустимых характеристик грунтов обратных фильтров; 1 – для фильтра из щебня; 2 – для песчано-гравийно-галечникового грунта фильтра

Поле каждого графика с прямоугольными осями, по которым отложены параметры грунтов, разделено кривой на две области: допустимых и недопустимых характеристик. Для защищаемого грунта фильтра по кривой механического состава вычисляют параметры, неодинаковые для различных графиков. Если координаты этих параметров располагаются в области допустимых характеристик, рассматриваемый грунт считается пригодным для использования в фильтре, деформации в этом случае не будет. Если же координаты параметров попадут в область недопустимых характеристик, рассматриваемый грунт для фильтра применять нельзя.

Пользуясь графиками В.С. Истоминой, можно решить две задачи: если материал задан (предполагается, например, использовать грунт карьера), решается вопрос о возможности его применения для фильтра дренажей; если готовится искусственная или обогащается естественная смесь, решается вопрос о пропорциях фракционного состава. Для подбора слоев обратного фильтра в дренажах по методу В.С. Истоминой исходными данными служат кривые механического состава защищаемого грунта и отдельных слоев фильтра. Параметры этих кривых: $\eta = D_{60}/D_{10}$ – коэффициент неоднородности, представляющий собой отношение контролирующего диаметра частиц грунта к действующему диаметру рассматриваемого слоя фильтра или защищаемого грунта; $\zeta = D_{50}/d_{50}$ – межслойный коэффициент, представляющий отношение среднего диаметра частиц D_{50} первого слоя фильтра к диаметру частиц защищаемого грунта d_{50} или отношение среднего диаметра частиц грунта второго слоя к диаметру частиц первого слоя и т. д.

Следует учесть, что во всех дальнейших расчетах по подбору фильтров дренажей символ d будет относиться к диаметру частиц защищаемого грунта, D^I – к диаметру частиц первого слоя фильтра, D^{II} – к диаметру частиц второго слоя фильтра и т. д. Аналогичные обозначения будут применяться и к коэффициентам неоднородности. Для обратных фильтров, дренажей и переходных зон допускаемый коэффициент неоднородности должен удовлетворять условиям [11]:

- если защищаемый грунт является несвязным несупфозионным грунтом, то при выполнении фильтра из щебнистых грунтов $\eta = 25$, при выполнении фильтра из песчаных и гравийных грунтов с окатанными частицами $\eta = 20$;
- если защищаемый грунт супфозионный, то $\eta = 15$;
- если защищаемый грунт связный с числом пластичности $I_p \geq 0,07$ (при надлежащем обосновании при $I_p > 0,05$), то $\eta = 50$,
- для фильтров, выполняемых отсыпкой в воду, во избежание расслоения грунта $\eta = 10$.

В том случае, если имеющиеся грунты не удовлетворяют вышеперечисленным требованиям по коэффициенту η , необходима их дополнительная переработка – отсев (отмыв) части частиц или обогащение [14].

Подбор фильтров дренажей по методу В.С. Истоминой производится в зависимости от типа фильтра, состава защищаемого грунта и толщины слоев фильтра. Согласно рекомендациям К. Терцаги, толщина слоев обратного фильтра не должна быть менее $50D_{15}$, а проверка отсутствия фильтрационных деформаций защищаемого грунта или проверка пригодности грунта обратного фильтра проводится по условию

$$D_{15} / d_{85} \leq 4 \dots 5, \quad (4.8)$$

где D_{15} и d_{85} – диаметры частиц, соответственно, защищающего и защищаемого грунтов, содержащихся в грунтах по массе вместе с более мелкими частицами 15 и 85%. Кроме того, необходимо выполнение условия

$$D_{15} / d_{15} \geq 4 \dots 5. \quad (4.9)$$

Приведенные графики для подбора обратных фильтров (рис. 4.45 и 4.46) даны для толщины 0,2 м. Нормами предписано применять для фильтров, выполняемых насухо, разнозернистые грунты с коэффициентом неоднородности $\eta < 10$. Для песчаных грунтов, типа I, решающим видом деформаций будет проникновение мелкозернистого грунта через поры смежного, более крупнозернистого. С учетом этих деформаций даются два

графика: один для окатанных частиц фильтра, а другой для угловатых частиц (рис. 4.45а). На этих графиках по оси абсцисс отложены коэффициенты неоднородности рассматриваемого слоя фильтра, а по оси ординат межслойный коэффициент контактируемых грунтов. Пользование графиком сводится к нахождению координат этих двух величин; если координаты их на графике попадут в область допустимых характеристик, материал считают пригодным для фильтра. Пользуясь приведенными графиками, решают вопрос о применимости заданного разнородного грунта для первого слоя фильтра, контактируемого с защищаемым слоем, а также для последующих слоев. В каждом случае значение η берут для рассматриваемого слоя фильтра, ζ - для двух смежных слоев.

Для песчаных грунтов, при фильтре тип II, основной вид деформаций - контактный выпор мелкозернистого грунта в крупнозернистый. Подбор состава фильтров для недопущения этого вида деформаций выполняется по графику, приведенному на рисунке 4.45б. По оси абсцисс отложены коэффициенты неоднородности η , а по оси ординат - межслойные коэффициенты ζ . Для рассматриваемого грунта вычисляют значения η , ζ и, если координаты их попадают в область допустимых характеристик, материал считают пригодным для фильтра. Графиком (рис. 4.45б) можно пользоваться при условии, что фактический градиент восходящего фильтрационного потока не превосходит некоторой предельной величины. По рекомендации В.С. Истоминой допускаемый градиент $I_{\text{доп}} < 1,5 \dots 2$.

Фильтры типа III проверяются из условия недопущения контактного размыва мелкозернистого грунта. Для этого используется график, приведённый на рисунке 4.46. По оси абсцисс графика отложены отношения коэффициентов неоднородности крупнозернистого грунта к коэффициенту неоднородности грунта мелкозернистого. По оси ординат отложены межслойные коэффициенты. График применим при градиенте фильтрационного потока, не превосходящем $I < 1,3$. Пользование графиком аналогично предыдущему. Если

координаты значений η_1/η_0 и ζ попадают в область допустимых характеристик, деформаций контактного размыва не будет.

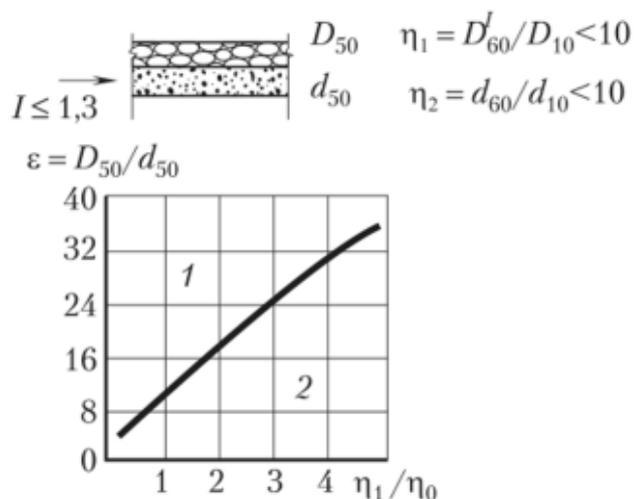


Рис. 4.46. График для проверки фильтров типа III из условий недопущения контактного размыва: 1 – область недопустимых характеристик; 2 – область допустимых характеристик

Для связных грунтов подбор или проверка материала первого слоя фильтра основаны на недопущении деформаций отслаивания глинистого грунта на контакте с первым слоем фильтра. Для этого служит график, приведенный на рисунке 4.45в, в котором по оси абсцисс отложены отношения коэффициентов неоднородности первого слоя фильтра η^I , а по оси ординат D_{50}^I - средний диаметр частиц грунта для этого же слоя. Как и по предыдущему графику, для рассматриваемого грунта первого слоя фильтра с кривой механического состава определяют значения η^I и D_{50}^I . Если координаты этих величин попадают в область допустимых характеристик, деформаций отслаивания частиц глинистого грунта не будет. График (рис. 4.45в) применим для всех трех типов фильтра со следующими ограничениями:

- для первого слоя материала минимальный размер пор должен быть

$$D_{min} < 3 \text{ мм}, \quad (4.10)$$

- для грунта, контактирующего с фильтром, допустимое число пластичности в пределах

$$W_n \geq 7 \dots 10, \quad (4.11)$$

- объемный вес скелета должен быть

$$\gamma_{ск} \geq \gamma / (1 + \varepsilon_T), \quad (4.12)$$

где ε_T - коэффициент пористости при W_T ;

- грунт должен сопротивляться контактному размыву, показателем чего служит степень влажности грунта

$$G \geq 0,95. \quad (4.13)$$

При подборе грунтов для первого слоя обратных фильтров необходимо стремиться использовать наиболее крупнозернистые грунты из имеющихся в карьерах (при условии выполнения приведенных выше условий), что позволяет снизить до минимума число слоев фильтров. Если защищаемый грунт – суглинок или глина, то в первую очередь необходимо проверить возможность использования для обратного фильтра гравелистых или гравелисто-галечниковых грунтов.

Толщина и количество слоев обратного фильтра со стороны тела плотины и основания зависят от вида защищаемого грунта и характеристик материала дренажа. Их количество должно быть минимальным, желательно не более 2-х. Из условий производства работ минимальная толщина одного слоя обратного фильтра при механической укладке составляет: 0,2 м при отсыпке насухо; при отсыпке фильтра в текущую воду для однослойного фильтра - не менее 0,75 м, а для фильтра, состоящего из большего числа слоев, не менее 0,5 м для каждого слоя [9]. Для обратных фильтров, укладываемых вручную насухо и имеющих коэффициент неоднородности $\eta \leq 10$, минимальная толщина должна быть не менее 0,1 м и $5D_{85}$. Толщину переходных зон обычно принимают более 3 м [13].

4.5. Противофильтрационные устройства

Противофильтрационные устройства (ПФУ) – это различного рода препятствия на пути движения фильтрационного потока, выполненные из материалов с незначительным коэффициентом фильтрации и положенные вертикально, наклонно или горизонтально. ПФУ выполняют из пластичных и жестких материалов. В качестве пластичных материалов применяют глину, тяжёлые суглинки, глинобетон, торф, а жесткими материалами могут быть

бетон, железобетон, дерево, металл. Иногда пластичные и жесткие материалы сочетаются. Пластичные материалы дешевле и часто находятся вблизи строительства плотины. Поэтому вначале рассматривается вопрос об устройстве ПФУ из этих материалов (рис. 4.47).

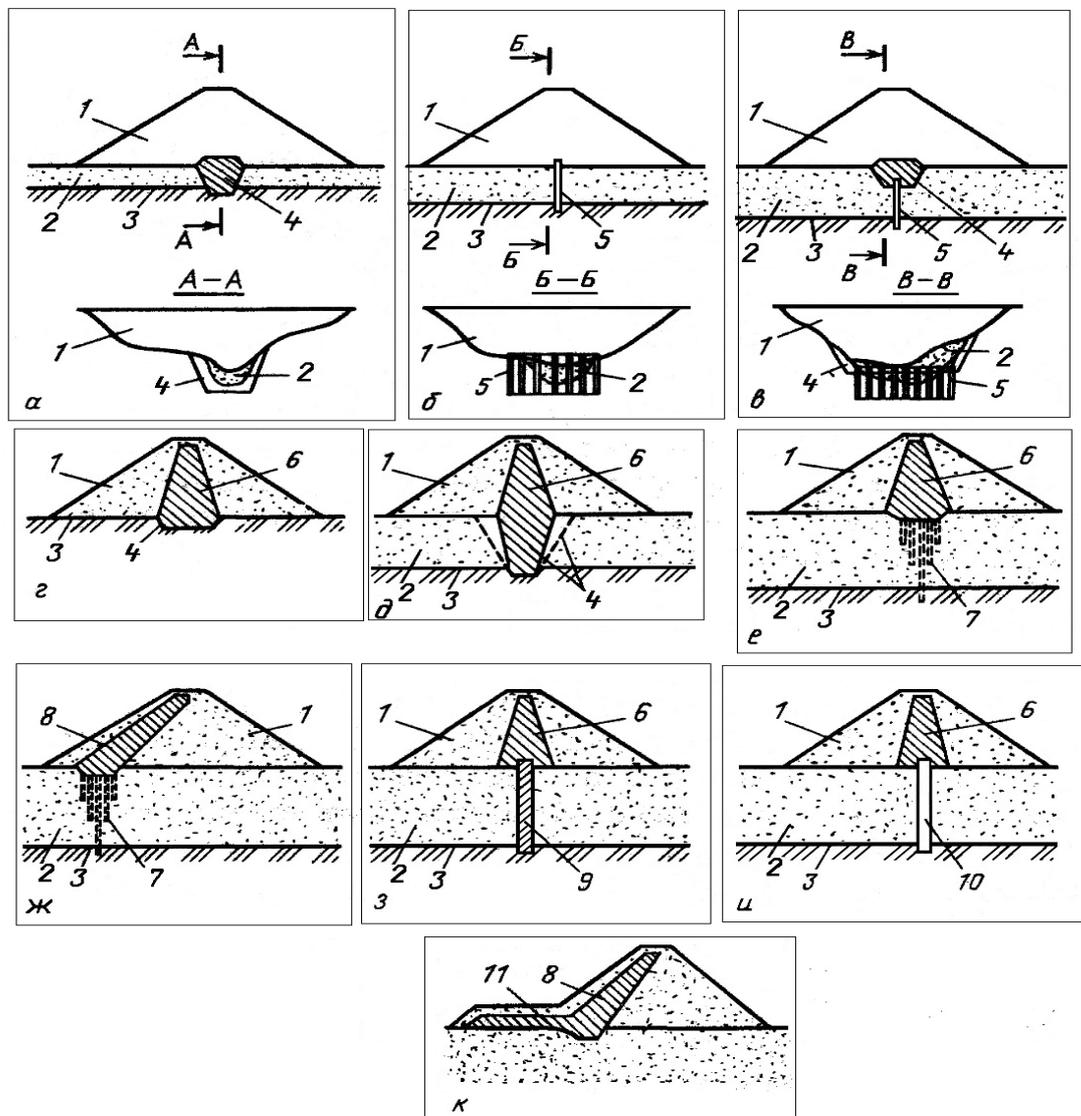


Рис. 4.47. Схемы ПФУ в проницаемых нескальных основаниях: а – зуб; б – шпунт; в – зуб и шпунт; г – ядро с неглубоким зубом; д – ядро и глубокий зуб; е и ж – инъекционная завеса в сочетании с ядром и экраном; з – траншейная стенка; и – буробетонная стенка; к – экран с понуром; 1 – тело плотины; 2 – проницаемое основание; 3 – водоупор; 4 – зуб; 5 – шпунт; 6 – ядро; 7 – инъекционная завеса; 8 – экран; 9 – траншейная стенка; 10 – буробетонная стенка; 11 – понур

И только если их применение технически и экономически нецелесообразно, переходят к жестким материалам. Эффект от применения ПФУ можно ожидать только в том случае, если коэффициент фильтрации его в

50 раз меньше, чем у грунта, в котором размещается ПФУ. В пластичных материалах этого достигают как подбором соответствующих грунтов, так и тщательным их уплотнением при укладке. При жестких материалах (металл или железобетонные изделия заводского изготовления, которые практически считают водонепроницаемыми) особое внимание следует уделять стыкам отдельных элементов, где наиболее вероятно появление сосредоточенных фильтрационных ходов. ПФУ в основании выполняют в виде зуба, шпунтовой стенки, завесы или комбинации из них.

ПФУ обычно размещают по оси плотины или несколько ближе к ВБ, но не слишком близко от подошвы верхового откоса, так как поток грунтовых вод может обойти препятствие сверху, через откос плотины. Глубина водопроницаемого слоя в основании плотин, при котором возможно осуществить ПФУ, зависит от производственных условий, средств механизации и вида препятствия. Зуб из пластических материалов (глины, тяжелого суглинка, глинобетона) выполняют глубиной не более 3...3,5 м. Шпунтовую деревянную стенку можно забить на глубину до 5...6 м. Сочетание пластичного ядра со стенкой принимают при глубине до 10 м. При большем значении глубин переходят к металлическому шпунту, забивать который можно на глубину более 20 м. В скальных основаниях применяют завесы. Ширину зуба понижу задают с учетом применяемых механизмов для рытья траншеи. Откосы траншеи под зуб выполняют так, чтобы они были устойчивы в период производства работ. Заглубление зуба в водоупор принимают не менее 0,5 м (1 м для высоких плотин), а возвышение зуба над подошвой плотины — не менее 0,75 м. Минимальное заглубление шпунта в водоупор 0,5 м. Головки шпунтовых свай располагают выше дна траншеи на 0,5 м для низких плотин и 1...1,5 м для высоких.

Пластичное ядро применяют в тех случаях, когда у грунтов тела плотины повышенная водопроницаемость. Располагают ядра в центральной части плотины, совмещая ось с осью плотины, или смещают в сторону ВБ примерно до вертикали, проходящей через бровку откоса (рис. 4.48). Для устойчивости

низового откоса вторая схема предпочтительнее, но при большом смещении оси в сторону ВБ боковая грань ядра в верхней части приближается к верховому откосу, и поэтому ядро приходится делать ломаного очертания (рис. 4.48, в).

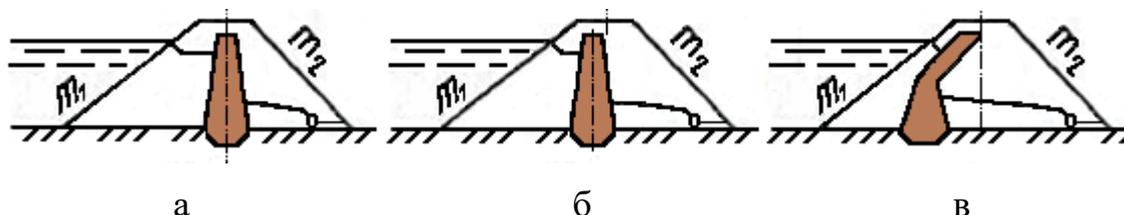


Рис. 4.48. Схемы размещения ядра в теле плотины: а-ось плотины

совмещена с осью ядра; б-ось ядра сдвинута относительно оси плотины; в — ломаное ядро в соответствии с действующим СП заложения откосов обозначаются – верхового $m_1 = m_h$ и низового $m_2 = m_t$ [4]

Размеры ядра чаще всего назначают исходя из производственных условий. Для высоких и средних плотин принятые размеры ядра проверяют на допустимый градиент напора для материала ядра в наиболее опасном сечении (сечение, близко расположенное к отметке депрессионной кривой, у грани ядра со стороны НБ). Размеры ядра корректируют, если решающую роль играет проходящий через тело плотины фильтрационный расход и требуется его ограничение. В поперечном сечении ядру придают трапецеидальную форму с утолщением к основанию. Толщину ядра поверху принимают от 1,0 м для низких плотин и до 1,5 м для высоких плотин. При достаточном количестве грунта для ядра толщину его поверху целесообразно увеличивать, так как минимальные размеры требуют особой тщательности при производстве работ, чтобы не допустить засорения ядра грунтом тела плотины. В засорённом ядре увеличивается коэффициент фильтрации, снижается фильтрационная эффективность. Заложение ядра назначают в пределах 1/6...1/12, обеспечивая толщину в основании не менее 1/6 нормального напора на плотину.

В водоупорное основание ядро врезается зубом на глубину не менее 0,5 м (рис. 4.47г). Если в основании имеется слой водопроницаемого грунта, то всю толщу его прорезают зубом, продолжением которого служит ядро (рис. 4.47д).

В этом случае зуб выполняют так же, как и в однородных плотинах, на проницаемом основании ограниченной мощности. Когда весь водопроницаемый слой в основании плотины не может быть прорезан зубом, применяют комбинацию зуба со шпунтовой стенкой (рис. 4.47в). Верх ядра выполняют выше ФПУ с учетом нагона волны, принимая запас 0,3 м для низких плотин и 0,75 м для высоких. Чтобы не было перелива воды поверх ядра за счет капиллярного поднятия, гребень ядра следует прикрыть защитным слоем из грунта, не обладающего капиллярными свойствами. Расстояние от гребня плотины до верха ядра должно быть больше глубины промерзания, так как в противном случае возможно морозное пучение грунта.

Сопряжение ядра плотины со скальным основанием осуществляется через бетонную подушку по типу зуба. Верх подушки уступами входит в тело ядра. Ширина бетонной подушки по верху равна толщине ядра понизу, а глубина зависит от качества скалы. Слабый слой выветренной скалы прорезают на всю глубину. При трещиноватых скальных основаниях выполняют цементационную завесу, являющуюся продолжением бетонной подушки. Конструктивное решение сопряжения пластичного ядра со скальным основанием при помощи бетонной подушки приведено на рисунке 4.49.

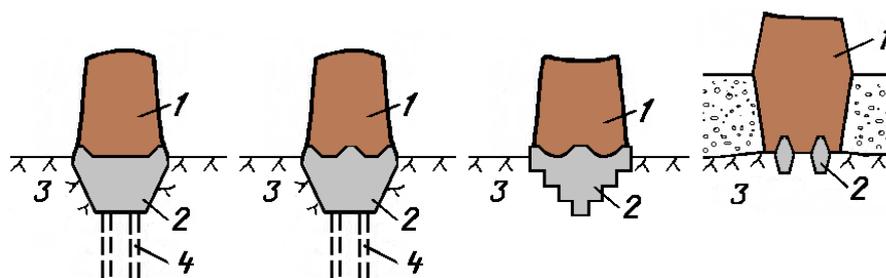


Рис. 4.49. Сопряжение ядра со скальным основанием: 1 – пластичное ядро; 2 – бетонный зуб; 3 – скальное основание; 4 – скважины цементации

Экран в земляной плотине выполняет ту же роль, что и ядро. Располагают экраны со стороны ВБ, благодаря чему обеспечивается осушение большей части тела плотины, а, следовательно, повышается устойчивость верхового и низового откосов. Размеры экрана, как и ядра, назначают, исходя из допустимых градиентов, ограничения фильтрационных расходов и удобства

укладки грунта. Экраны устраивают переменной толщины с постепенным утолщением сверху вниз. Утолщение экрана необходимо потому, что он находится под разностью напоров, увеличивающихся с глубиной воды перед плотиной. Не исключается, конечно, экран постоянного сечения, но в этом случае толщину его принимают по наиболее опасному сечению. Исходя из конструктивных соображений, толщину экрана (считая по нормали к откосу) принимают не менее 1 м вверху и не менее 3 м внизу для плотин высоких и 2 м для низких. При этом принятая толщина должна быть не менее $1/10$ нормального напора. Такое ограничение в известной мере обеспечивает допустимый градиент для материала экрана. В высоких плотинах толщину экрана в наиболее опасном сечении нужно проверять расчетом.

Верх экрана принимается выше ФПУ с учетом нагона волны на откос, но не менее 0,5 м для низких плотин и 1,0 м для высоких. Для защиты от промерзания и механического воздействия экран на всем протяжении прикрывается слоем из песчаных или песчано-гравелистых грунтов. По этому слою затем выполняют защитное покрытие верхового откоса. Этим же грунтом защищают верх (торец) экрана, обеспечивая расстояние от гребня плотины не менее глубины промерзания. Пригрузка экрана может быть постоянной или переменной толщины (тоньше вверху). Наименьший размер пригрузки 1,25...2,50 м, считая по нормали к откосу. Принятые размеры должны обеспечить механизированную укладку и уплотнение грунта пригрузки и быть больше глубины промерзания. Принятое заложение внешнего откоса экрана должно обеспечить устойчивость на скольжение защитного слоя по поверхности экрана, а заложение внутреннего откоса — устойчивость на скольжение защитного слоя вместе с экраном по откосу плотины. Если экран укладывают на крупнозернистые грунты плотины, необходимо устраивать обратные фильтры, предупреждающие появление фильтрационных деформаций в грунте экрана. Если тело плотины выполнено из песчаных, супесчаных и других мелкозернистых грунтов, обратный фильтр не устраивают. Сопряжение экрана с водоупорным нескальным основанием

осуществляется в виде зуба глубиной не менее 0,5 м (рис. 4.50а) или комбинации зуба со шпунтовой стенкой (рис. 4.50б), когда водоупор находится на практически достигаемой глубине. Зуб и экран в этом случае должны быть продолжением друг друга, представляя одно целое. Пластичный экран со скальным основанием сопрягают также при помощи пластичного зуба и бетонной стенки, заходящей одним концом в скалу, а другим в зуб (рис. 4.50в). Глубина зуба зависит от качества скалы. При этом выветренный верхний слой её обязательно прорезают зубом. Бетонную стенку врезают в прочную скалу на глубину не менее 0,5 м и примерно на эту же величину вводят в тело зуба в центре его.

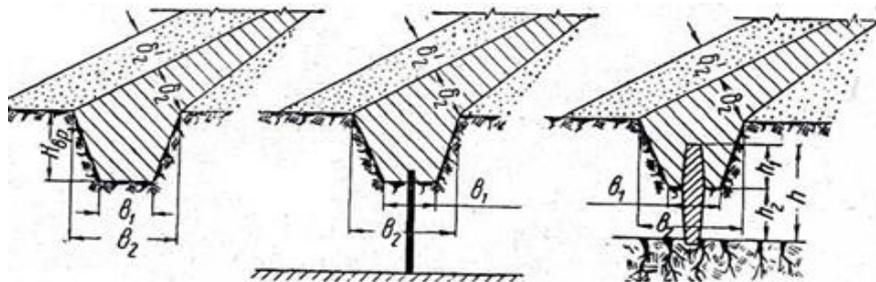


Рис. 4.50. Сопряжение экрана плотины с основанием: а — на водоупоре и с незначительной толщиной водопроницаемого основания; б на водопроницаемом основании; в — на скальном основании

Понур, как элемент ПФУ, применяют в земляных плотинах в сочетании с экраном или ядром в тех случаях, когда в основании залегают водопроницаемые грунты значительной мощности и строительными средствами прорезать этот грунт зубом или шпунтовой стенкой затруднительно или невозможно. Понуры в таких плотинах дают снижение фильтрационного расхода, проходящего в водопроницаемом основании, и кривой депрессии в теле плотины. Конструктивно понуры объединяются с экраном или ядром и вместе с ними образуют непрерывную водонепроницаемую преграду (рис. 4.51). Длину понура принимают в зависимости от напора на плотине H не более $(5...6) H$. Увеличение длины сверх этого предела не даёт пропорционального гашения напора, что отмечено рядом исследователей [9]. Толщину понура обычно назначают по конструктивным соображениям, но не менее 0,5 м для плотин

низких и не более 1,0 м для высоких. Во втором случае конструктивно принятая толщина проверяется расчетом на допускаемый градиент напора для материала понура. В месте сопряжения экрана с понуром, учитывая их неравномерную осадку вследствие различных нагрузок, следует давать утолщение понура. Сверху понур пригружают слоем песчаного или песчано-гравелистого грунта (продолжение пригрузки экрана), толщину которого принимают не менее 1,5...2,5 м, с учетом глубины промерзания. При расположении понура на крупнозернистых грунтах предусматривают обратный фильтр.

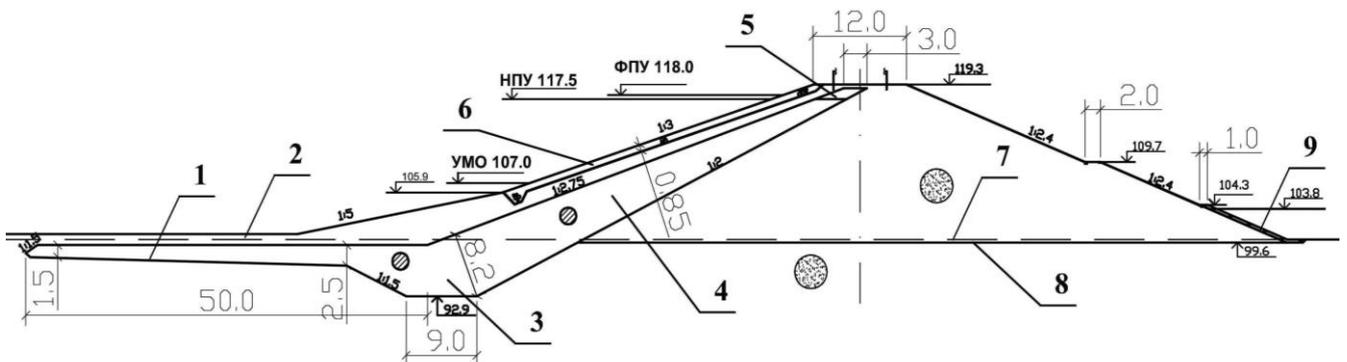


Рис. 4.51. Поперечное сечение земляной неоднородной плотины из песка с экраном и понуром из суглинка на проницаемом основании

большой мощности: 1 - малопроницаемое основание; 2 – проницаемое основание небольшой мощности (до 3...5 м); 3 – боковые призмы плотины из песка (гравия); 4 – ядро из суглинка (глины); 5 – верхняя часть ядра из непучинистого малофильтрующего грунта в зоне потенциального промерзания; 6 – крепление несортированной каменной наброской; 7 – естественная поверхность земли; 8 – подошва плотины; 9 – наклонный дренаж; в соответствии с действующим СП заложения откосов обозначаются – верхового $m_1 = m_n$ и низового $m_2 = m_t$ [4]

$$V = k I, \quad (5.1)$$

где V — скорость фильтрации, равная расходу, деленному на площадь поперечного сечения грунта, в пределах которого движется вода, включая поры и частицы грунта;

I — градиент напора фильтрационного потока, т. е. падение напора на единицу длины;

k — коэффициент фильтрации, представляющий собой скорость грунтового потока при градиента, равном единицу, имеет размерность скорости и является величиной постоянной для данного грунта при неизменной температуре.

Закон Дарси, выраженный через удельный расход, может быть представлен формулой

$$q = V h = k I h, \quad (5.2)$$

где h — глубина потока в рассматриваемом сечении.

Другим выражением закона Дарси служит формула Дюпюи, которая дает связь между расходом фильтрационного потока и глубинами воды в двух смежных сечениях I-I и II-II (рис.5.2).

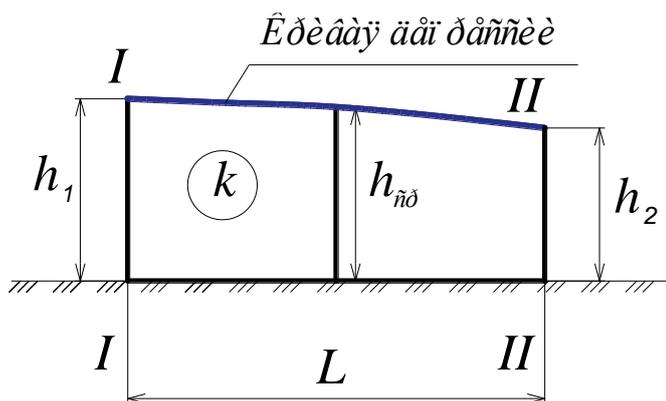


Рис. 5.2. Расчётная схема к формуле Дюпюи

Получим формулу Дюпюи для этих двух сечений, приняв в качестве расчетной глубины сечения среднюю глубину между глубинами h_1 и h_2

$$h_{cp} = (h_1 + h_2)/2 \quad (5.3)$$

Средний градиент напора на длине L между двумя принятыми сечениями составит

$$I_{cp} = ((h_1 + h_2)/L) \quad (5.4)$$

В соответствии с законом Дарси удельный расход для среднего сечения

$$q = k \frac{h_1 + h_2}{2} \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (5.5)$$

Окончательно формула Дюпюи имеет вид

$$\frac{q}{k} = \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L}. \quad (5.6)$$

Закон Дарси, а также формула Дюпюи справедливы только для ламинарного грунтового потока. При переходе к турбулентному движению расчетные фильтрационные зависимости, полученные для земляных плотин, будут недействительны; в этом случае следует переходить к другим формулам. При возведении земляных плотин обычно не применяют грунтов со скоростью фильтрации, при которой образуется турбулентный поток. Таким образом, при фильтрационных расчетах земляных плотин всегда будет ламинарное движение и, следовательно, действителен закон Дарси. Формула Дюпюи нашла широкое применение и положена в основу многих методов расчета [33, 35].

Рассматривая кривую депрессии в плотинах, можно отметить, что градиент напора изменяется неодинаково по длине. Падение напора на единицу длины на входном и выходном участках кривой депрессии происходит значительно больше по сравнению с участками, расположенными в средней части поперечного профиля. Потери напора в средней части плотины — результат тех сопротивлений по длине, которые получаются при трении потока жидкости о частицы грунта. А на входном и выходном участках появляются дополнительные потери за счет сопротивления при входе и выходе, что и приводит к увеличению градиентов на этих участках.

Понятие фильтрации тесно связано с картиной фильтрационного потока в виде линий равного напора и линий тока (рис. 5.3). **Линии равного напора**, которые еще называют эквипотенциали, описываются уравнением $H = \text{const}$. **Линии тока** при установившемся движении представляют собой траектории

движения частиц подземных вод, а касательная в каждой их точке представляет собой вектор скорости фильтрации.

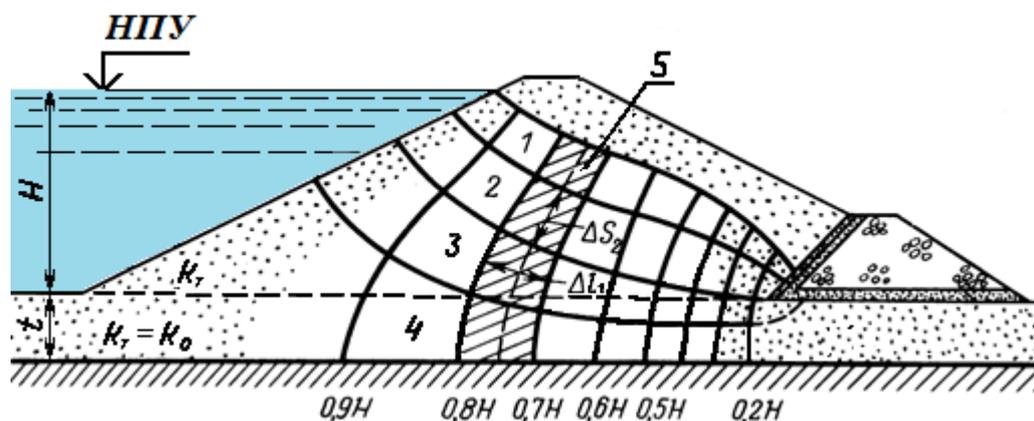


Рис. 5.3. Пример гидродинамической сетки в земляной однородной плотине без дренажа: 1 – линии равного напора; 2 – линии тока

Линии тока и линии равного напора в местах пересечения взаимно перпендикулярны. Первой линией тока является **кривая депрессии**; последней линией тока – **водоупор**. Первой линией равного напора служит поверхность верхового откоса и основание в ВБ, а последней линией равного напора – поверхность дренажа и основание в НБ. Часть зоны фильтрации, заключённая между смежными линиями тока, называется **лентой расходов**, а часть зоны фильтрации между линиями равных напоров – **поясом давления**.

Сетку можно построить графически на основе опыта ее построения или воспользоваться экспериментальным методом ЭГДА (методом электрогидродинамических аналогий). Используя построенную гидродинамическую сетку можно определить градиенты напора, скорость и расход фильтрационного потока [33]. В основу **графического метода** построения гидродинамической сетки положена перпендикулярность (ортогональность), непрерывность и плавность линий тока и равного напора. При графическом построении гидродинамической сетки необходимо соблюдать следующие основные требования:

- **линии токов и линии равных напоров** должны пересекаться под прямыми углами, т.е. касательные, проведенные к линиям тока и линиям равных напоров в точках их пересечения, должны быть перпендикулярны;

- **линии равных напоров** в точках примыкания к контуру сооружения и линии водоупора должны быть перпендикулярны;

- **линии токов** в точках примыкания к линиям дна ВБ и НБ также должны быть перпендикулярны;

- **сетка** движения должна быть образована криволинейными квадратами (одинаковое соотношение средних расстояний по ширине и высоте $\Delta S_1 = \Delta S_2$) или прямоугольниками.

Величина удельного фильтрационного расхода (расход на 1 погонный метр длины плотины) является функцией коэффициента фильтрации, разности уровней воды ВБ и НБ и расчетной схемы. По длине плотины эти параметры могут меняться, что видно из схемы на рисунке 5.4. В плотинах большой протяженности перекрывающих не только русло водотока, но и пойму, могут быть случаи, когда на одних участках в НБ есть вода, а на других ее нет. По сопряжению с основанием в таких плотинах возможны различные расчетные схемы. На одних участках плотина может быть расположена на водоупоре, а на других – на проницаемом основании. Все это заставляет разбивать плотину по длине на характерные участки (рис. 5.4):

участок 1 (длина l_1 , напор H_1) расположен на водонепроницаемом основании, без воды в НБ;

участок 2 (длина l_2 , напор H_2) на водонепроницаемом основании, без воды в нижнем бьефе;

участок 3 (длина l_3 , напор H_3) на водопроницаемом основании, без воды в нижнем бьефе;

участок 4 (длина l_4 , напор H_4) — на водопроницаемом основании, с водой в нижнем бьефе;

участок 5 (длина l_5 , напор H_5) — на водонепроницаемом основании, без воды в нижнем бьефе.

В пределах каждого из них поперечный профиль необходимо привести к одной из расчетных схем и для каждой из них выполнить соответствующий фильтрационный расчет. Это позволит определить полный фильтрационный

расход через всю плотину.

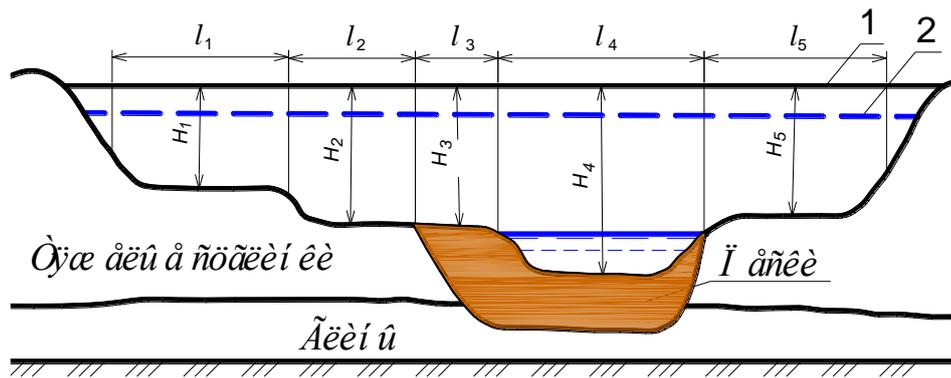


Рис. 5.4. Расчетная схема для определения суммарного

фильтрационного расхода: 1 — гребень плотины; 2 — расчетный уровень верхнего бьефа

В пределах каждого из них поперечный профиль необходимо привести к одной из расчетных схем и для каждой из них выполнить соответствующий фильтрационный расчет. Это позволит определить полный фильтрационный расход через всю плотину. Для каждого из перечисленных участков выбирают расчетную схему, исходя из которой и определяют удельные расходы q_1, q_2, q_3, q_4, q_5 .

Суммарный фильтрационный расход равен

$$Q = q_1 l_1 + q_2 l_2 + q_3 l_3 + q_4 l_4 + q_5 l_5 \quad (5.7)$$

Для проведения фильтрационных расчётов на кафедре ГТС имеются программы на ПК и рабочие тетради, где указаны основные расчётные схемы и соответствующие выводы, которыми рекомендуется пользоваться для экономии времени при выполнении РГР, КР и КП [14, 33, 34]. Расчёты проводятся для следующих условий: в ВБ – отметка НПУ, в нижнем – отметка уровня воды, соответствующая пропуску расхода полезных попусков. При длительных перерывах в работе донного водовыпуска гидроузла расчёты можно проводить при глубине воды в НБ, равной нулю. Задачи неустановившегося движения фильтрационного потока, то есть при изменяющемся во времени уровне ВБ в настоящее время можно решить в современных программных комплексах (см. п. 5.3) [42].

5.2. Методы фильтрационных расчетов

Для решения задач фильтрации через земляные плотины и их основания существует много методов (рис. 5.5).

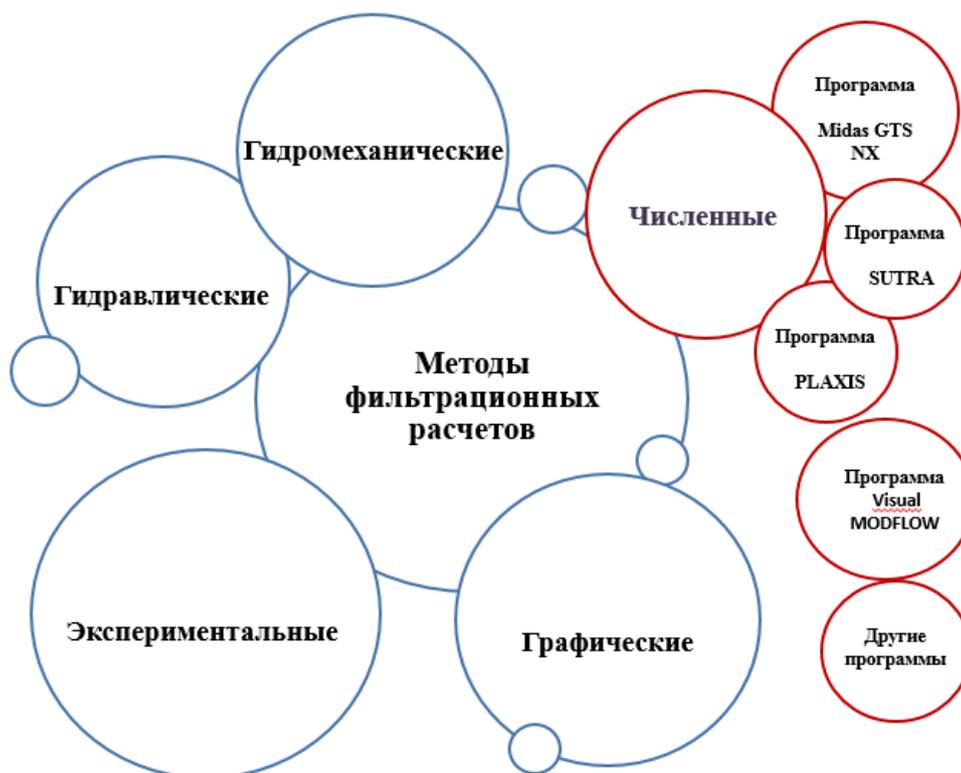


Рис. 5.5. Основные методы фильтрационных расчётов

В основу **гидромеханического метода** положены точные математические зависимости, базирующиеся на законах физики и механики. Эти решения в большинстве случаев сложны по технике вычисления и мало доступны для широкого круга практических работников. Наиболее часто применяются в инженерной практике **гидравлические методы**, они не менее точны (проверялись на физических моделях), однако просты и доступны, к тому же на практике дают вполне удовлетворительные результаты. В существующих гидравлических методах фильтрационных расчетов исходят из основного уравнения движения грунтового потока - законом Дарси, а также формулой Дюпюи. Оценка потерь напора на входном и выходном участках различными авторами производится по-разному, что и приводит к особенностям того или иного метода.

При фильтрационных расчетах земляных плотин ввиду сложности учета'

всех факторов, оказывающих влияние на движение грунтового потока, рассматривается упрощенная модель, в которой приняты следующие допущения:

- фильтрацию рассматривают в одной плоскости (одномерная схема), то есть составляющие скорости, перпендикулярные этой плоскости, принимают равными нулю;

- грунт тела плотины считают однородно-изотропным: значение коэффициента фильтрации во всех направлениях и в любых точках области фильтрации принимается постоянным;

- при наличии водоупора (водоупором принято считать грунт, коэффициент фильтрации которого в 50...100 раз меньше коэффициента фильтрации грунта тела плотины или части основания под плотиной), его принимают теоретически практически водонепроницаемым;

- земляные плотины рассчитывают по упрощенным схемам, к которым приводят реальные профили с различным сочетанием грунтов тела плотины и основания: внешнее очертание профиля плотины состоит из прямых линий, а границы грунтов в основании являются горизонтальными линиями;

- положение депрессионной кривой в однородных плотинах не зависит от качества грунта, а определяется только геометрическими размерами профиля плотины.

Современных способов и программных комплексов, позволяющих решить задачи фильтрации снимая вышеприведенные допущения и позволяющие проводить расчет для любых конфигураций граничных условий, достаточно много (рис. 5.5), некоторые из них будут рассмотрены ниже в п. 5.3. Гидравлические методы фильтрационных расчетов земляных плотин, расчетные схемы и формулы для расчета приведены в [7 - 11, 13, 26], а для использования студентами при курсовом и дипломном проектировании к.т.н. В.И. Волковым разработаны в редакторе электронных таблиц Excel интерактивные обучающие программы (рис. 5.6) [14, 33].

используется для совместной работы и обновляется на важных этапах осуществления проекта и его эксплуатации. Создание цифровой модели строительного объекта позволяет тем, кто взаимодействует с ним, оптимизировать свои действия.

С развитием компьютерных технологий, появилась возможность использования современных цифровых (численных) методов для более точных и быстрых фильтрационных расчётов. Численные методы используют математические алгоритмы для решения уравнений фильтрации. Эти методы могут быть применены как для одномерных, так и для трехмерных моделей фильтрации. Современные цифровые методы для фильтрационных расчетов обладают рядом преимуществ перед гидравлическими методами, применяемыми в практике проектирования ГТС на протяжении долгого времени, таких как возможность учета типа и неоднородности грунта, температуры, наличие дренажей и подземных источников воды, а также различных граничных и гидравлических начальных условий (при нестационарном, изменяющемся во времени процессе фильтрации, например, при изменении уровней воды в бьефах). Обычно наряду с фильтрационными расчетами требуется проводить связанные с ними расчеты проверки устойчивости откосов грунтовой плотины или бетонного подпорного сооружения, определение градиентов напора, порового давления, напряжений и пр.

Современные методы представляют собой численные решения с применением метода конечных элементов при использовании известных и применяемых в гидротехнической практике компьютерных программ и программных комплексов, среди которых можно выделить следующие [40 - 42]:

1. Программные комплексы **FILTR** и **TERMIC** – разработаны в Московском государственном строительном университете (МГСУ);
2. **SUTRA** - разработана Геологической службой США;
3. **GEO 5** - разработана компанией *Fine Software*;

4. **Visual MODFLOW** - разработана Геологической службой США и компанией Schlumberger Waterloo Hydrogeologic, Канада;
5. **FEFLOW** - разработчик DHI-WASTY (Датский гидравлический институт);
6. **PLAXIS** – разработана компанией Bentley Systems;
7. **MIDAS**, модуль **MIDAS GTS NX** - программное обеспечение разработано в Южной Корее компанией MIDAS IT Co., Ltd.;
8. **Geostudio**, модуль **SEEP/W** – разработан компанией Seequent.

Один из цифровых методов - **метод конечных элементов (МКЭ)**. Он основан на разбиении расчётной области на конечные элементы и решении уравнений, описывающих процесс фильтрации воды через грунтовую плотину и основание. Этот метод позволяет учесть все особенности геометрии и гидрогеологические условия на месте строительства, а также провести анализ воздействия различных нагрузок на плотину. МКЭ – численный метод, используемый для решения дифференциальных уравнений, описывающих то или иное явление или процесс. Он широко используется в инженерном проектировании и анализе. Суть метода заключается в разбиении области решения (расчетной схемы) на множество конечных элементов (например, треугольников или квадратов), которые соединяются между собой в конечном числе точек, которые в МКЭ принято называть узлами. Уравнения решаются для каждого элемента, и затем полученные решения складываются для получения результата для всей области. Преимуществами метода конечных элементов являются его универсальность, эффективность, точность и возможность получения решений для широкого круга граничных и начальных условий.

Для дальнейшего расчета устойчивости откосов плотины при различных воздействиях используются также **методы конечных разностей (МКР)** и **метод конечных объёмов (МКО)**. Они также базируются на решении дифференциальных уравнений и позволяют получить детальную картину процесса фильтрации воды через грунт и затем связанную с этим результатом

проверку устойчивости откосов. Эти цифровые методы обладают множеством преимуществ: позволяют проводить расчёты с высокой точностью и эффективностью; находить оптимальные параметры плотин для предотвращения возможных аварийных ситуаций; минимизировать экспериментальные дорогостоящие исследования (или даже заменить их) в процессе проектирования и строительства ГТС. Можно отметить некоторые общие возможности, включенные в эти программные комплексы:

- использование уравнения Дарси для моделирования фильтрационного потока (движения фильтрационного потока в пористой среде);
- программы базируются на методе конечных элементов;
- автоматическая генерация (создание) сетки конечных элементов;
- конвертация данных из САД-систем, ГИС (геоинформационных систем), текстовых редакторов, то есть можно сделать конструктивную (расчетную) схему сооружения и его описание в этих программах и импортировать в программы, где предстоит провести тот или иной расчет (поддержка BIM);
- программные комплексы имеют несколько расчетных взаимосвязанных модулей, данные и результаты которых беспрепятственно передаются друг другу и позволяют комплексно решать вопросы проектирования, получать конечные результаты, нужные для проектирования сооружений. Например, расчет фильтрации и получение положения кривой (поверхности) депрессии (эпюры фильтрационного противодавления в случае напорной фильтрации), величины порового давления передаются в модуль расчета устойчивости сооружения и другие модули.

Некоторые из этих программ имеют демоверсии (или пробные), которые можно использовать при ограниченном количестве размеров сетки конечных элементов и других ограничениях. Далее кратко рассмотрим примеры современных программ (программных комплексов), на основе которых могут решаться задачи фильтрационных расчетов в курсовых и выпускных квалификационных работах, а также в практике проектирования ГТС.

1. Программный комплекс **FILTR** и **TERMIC** [40], созданный в МГСУ (автор Н.А. Анискин), позволяет решать не только задачи фильтрации, но и рассчитать температурный режим системы «плотина-основание» (рис. 5.7). Данный комплекс позволяет выполнять трехмерные (пространственные) задачи фильтрации для различных конструкций грунтовых плотин разных очертаний и свойств слоев грунтов основания, что очень важно для решения реальных практических задач расчёта [40].

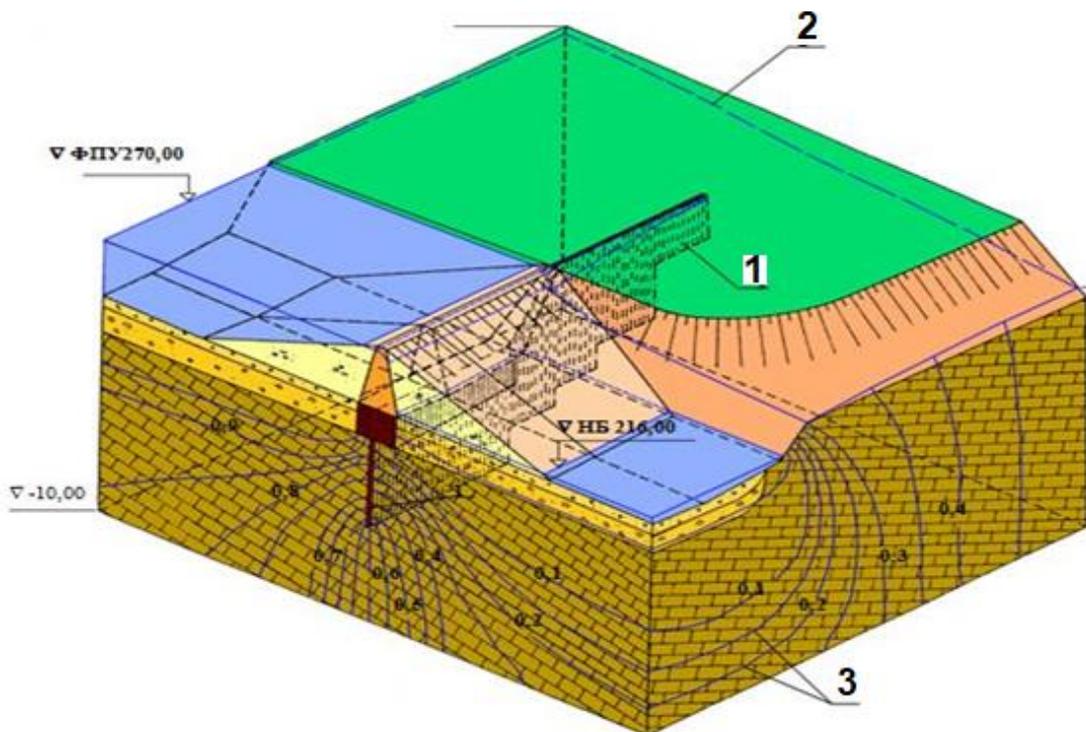


Рис. 5.7 Результаты использования программного комплекса FILTR и TERMIC при определении параметров фильтрационного расчёта грунтовой плотины с ядром: 1 – цементационная завеса; 2 – след депрессионной поверхности; 3 – следы поверхностей постоянного напора

2. Программный комплекс **SUTRA** представляет модель насыщенных - ненасыщенных грунтовых вод переменной плотности с переносом растворенных веществ или энергии и является конечно-разностной моделью. Позволяет решать двухмерные и трехмерные задачи. На примере этой программы рассмотрим порядок моделирования фильтрации через однородную земляную плотину на проницаемом основании:

а) на основании реальной конструкции плотины создается расчетная схема для моделирования, которые представлены на рисунке 5.8.

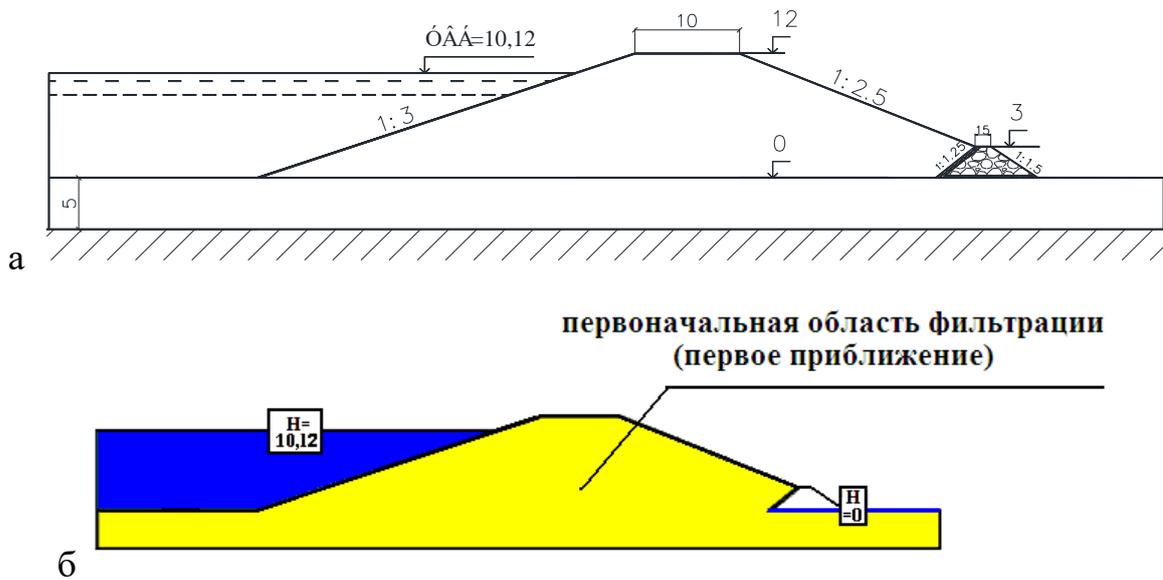


Рис. 5.8. Конструктивная схема грунтовой плотины (а) и расчетная схема (б) для моделирования картины фильтрации с помощью программы SUTRA для случая однородной грунтовой плотины с дренажным банкетом при наличии водопроницаемых грунтов в основании.

б) Область фильтрации программа сама разбивает на конечные элементы (рис. 5.9), величину которых необходимо задать автору моделирования.

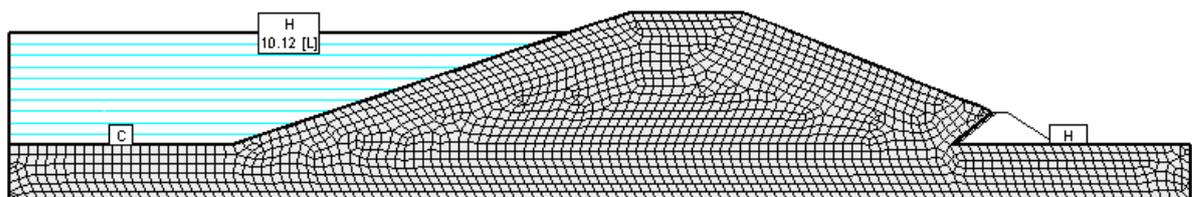


Рис. 5.9. Разбивка первоначальной области фильтрации сеткой конечных элементов

в) Результаты процесса моделирования показаны на рисунке 5.10 - это положение кривой депрессии, линии равного напора (экипотенциали) и распределение векторов скоростей фильтрационного потока. Здесь наглядно видно, что скорости, а, следовательно, градиенты фильтрационного потока значительно возрастают при входе в дренаж плотины, что объясняет наличие обратных фильтров в дренажах, защищающих от фильтрационных деформаций.

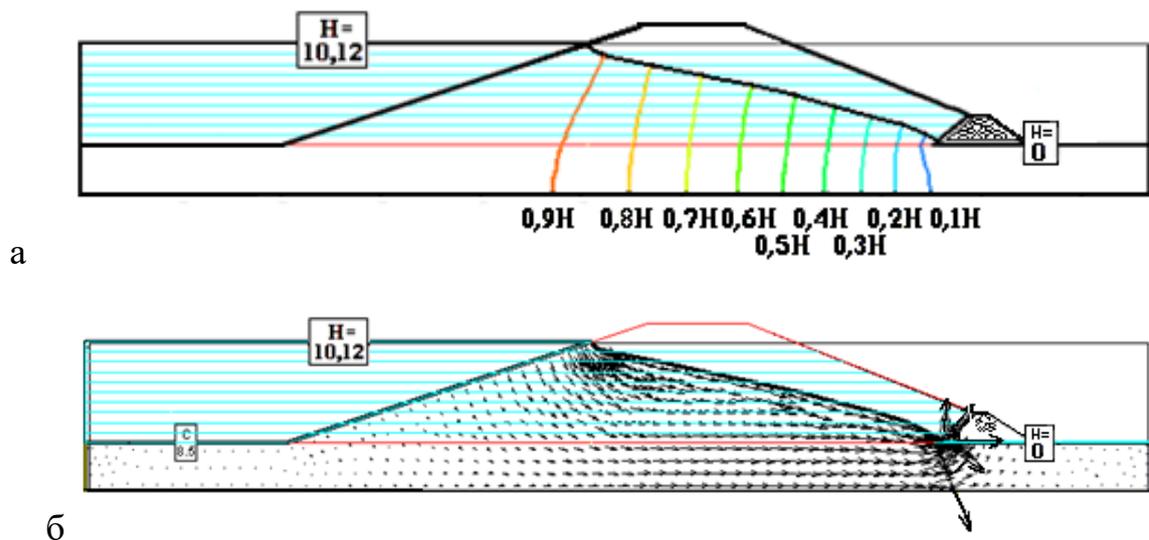


Рис. 5.10. - Положение кривой депрессии и линий равного напора (а) и распределение скоростей фильтрационного потока в области фильтрации (б)

Для проверки правильности численных расчетов в данной программе, было проведено сравнение полученных результатов с результатами, полученными методом ЭГДА (метод электро-гидродинамических аналогий [7, 33]) на физической модели и результаты сравнения показаны на рисунке 5.11. Как видно из этого рисунка, совпадение результатов достаточно полное.

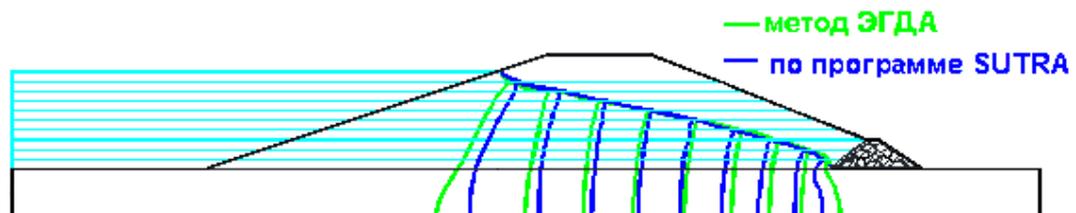


Рис. 5.11. Положение кривых депрессии и линий равного напора, полученных методами ЭГДА и с помощью программы SUTRA для грунтовой плотины на проницаемом основании

Одним из преимуществ цифровых расчетов является возможность решения задач фильтрации для различных не линейных граничных условий (рис. 5.12).

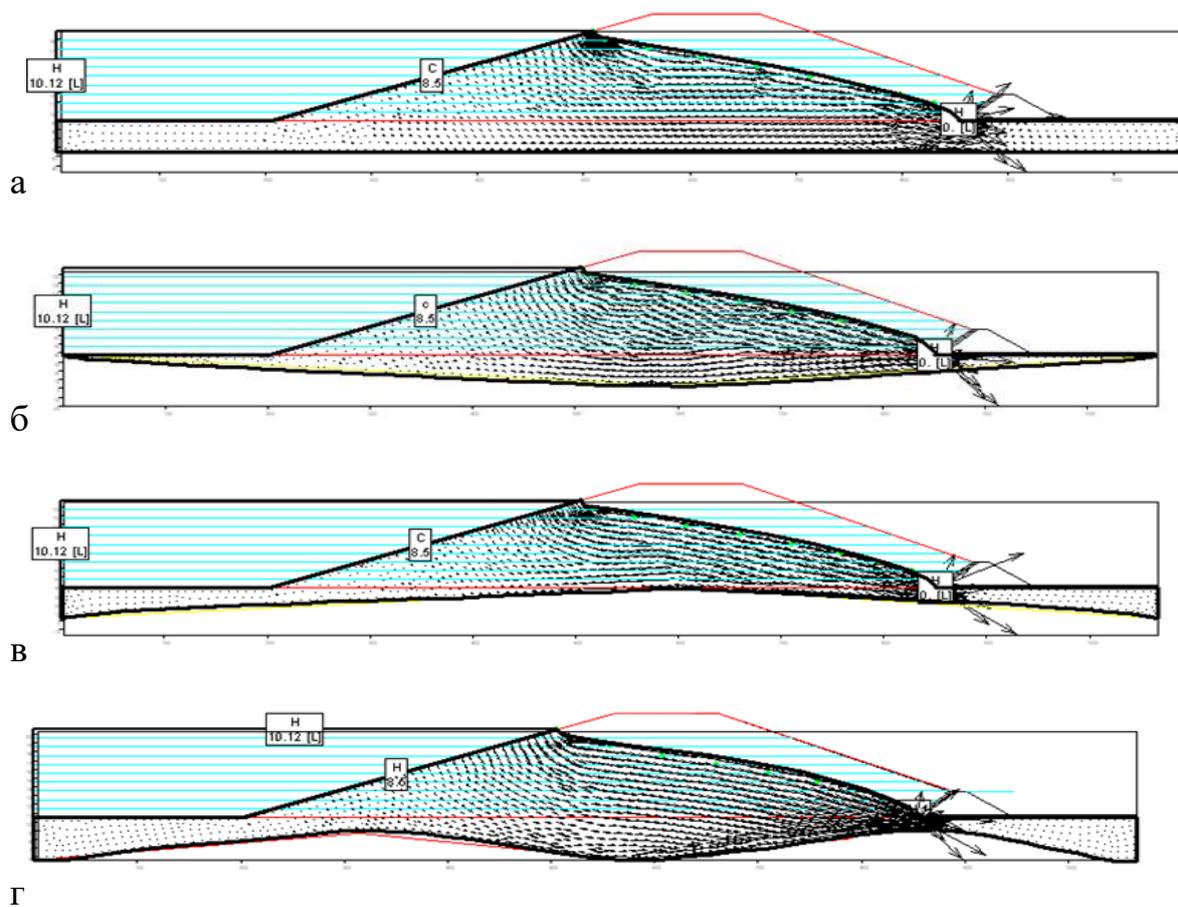


Рис. 5.12. Положение кривой депрессии и картины распределения скоростей фильтрационного потока, полученные с помощью программы SUTRA при различных очертаниях и одинаковом коэффициенте фильтрации в теле и основания плотины: а – при горизонтальном положении водоупора; б – при выпуклом очертании водоупора; в - при вогнутом очертании водоупора; г – при криволинейном очертании водоупора

С помощью этой программы можно решать и плановые задачи фильтрации (рис. 5.13).

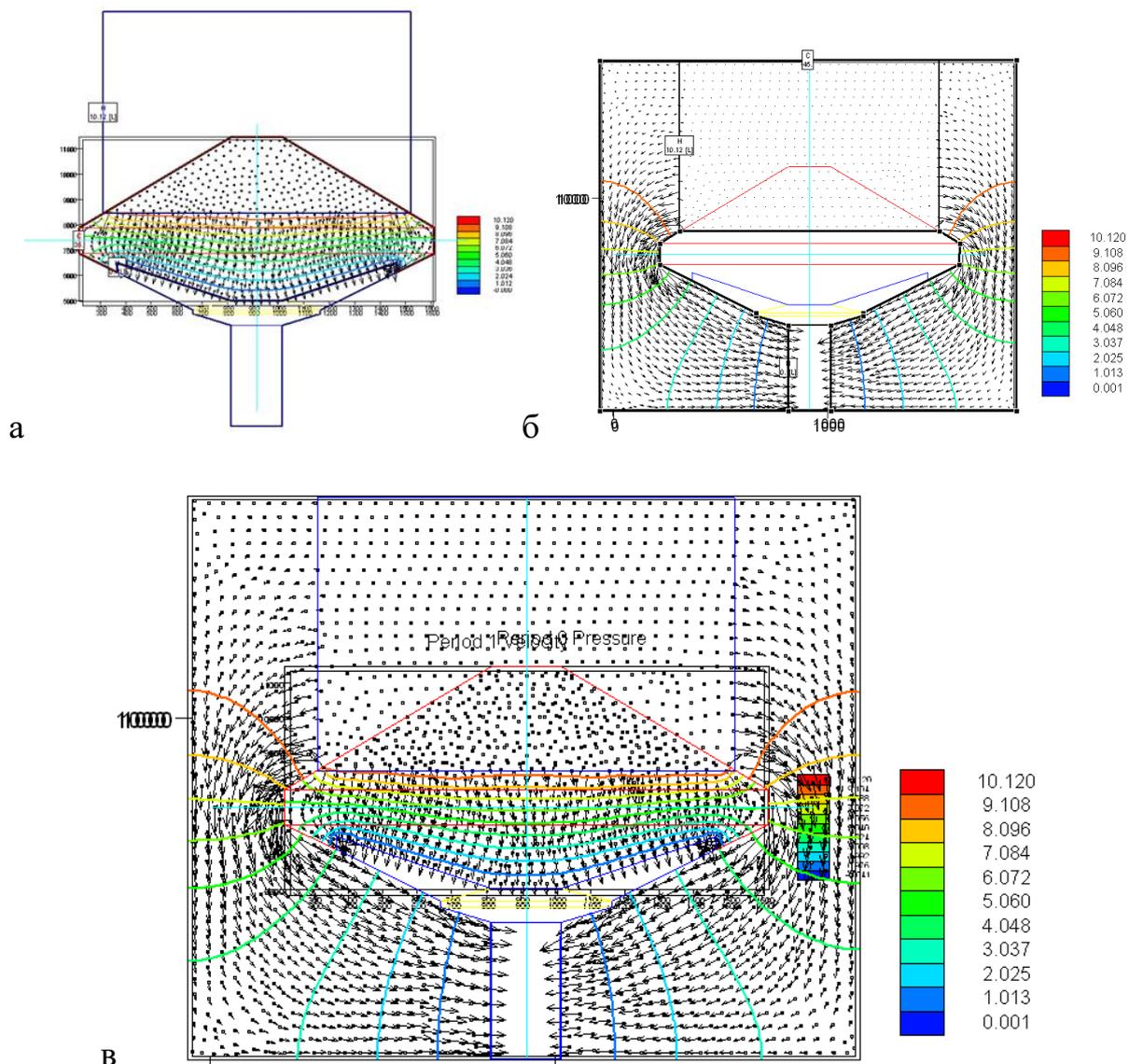


Рис. 5.13. Картины плановой фильтрации через грунтовую плотину с дренажем в виде дренажного банкета в русловой части и плоского дренажа в береговых частях: а - основание и берега сложены из водонепроницаемых грунтов; б – тело плотины водонепроницаемо, а основание и берега сложены из водопроницаемых грунтов; в - тело плотины, основание и берега сложены из водопроницаемых грунтов

3. Программный комплекс **GEO 5** служит для геотехнических расчетов (имеет 29 модулей расчета), а ее модуль «**МКЭ – Фильтрация**» используется для выполнения расчета фильтрации в стационарных или нестационарных условиях (для определения положения кривой депрессии (рис. 5.14), скорости фильтрации, фильтрационного расхода, величины осадки сооружения, величины порового давления) учитывая свойства материалов, начальные и

граничные условия. Полученные результаты передаются в модуль расчета напряженно-деформированного состояния.

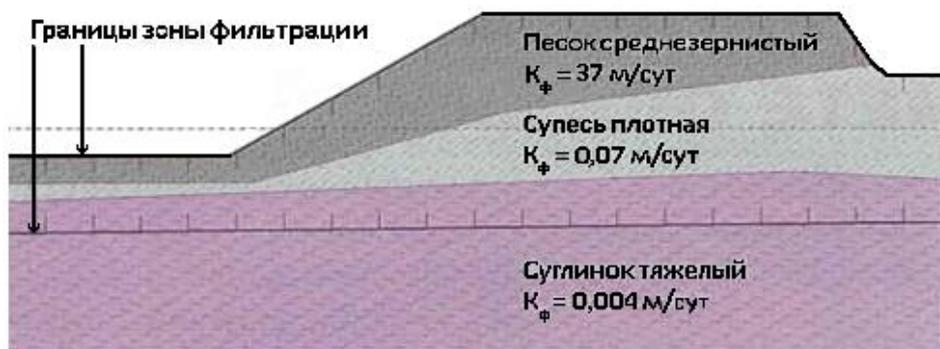


Рис. 5.14. Положение кривой депрессии в земляной плотине, полученное в программе GEO 5

4. Программный комплекс **Visual MODFLOW Flex**— это инструмент для моделирования движения подземных вод в пористой среде, теплопереноса и движения загрязнений, который основан на уравнении Дарси. Как частный случай его можно использовать для решения задач фильтрации в теле и основании грунтовых плотин. Для построения числовой модели в **Visual MODFLOW Flex** можно использовать различные виды сеток и выбрать среди них наиболее подходящую. Для областей повышенного интереса есть возможность сгущения сетки. Программный комплекс позволяет создавать трехмерную модель объекта проектирования, геологической структуры, введения характеристик грунтов, а также создания 3D анимации и видео для отчетов или публикации в интернете. Это один из самых известных и распространенных программных комплексов в мире.

Информационные системы, такие как геоинформационные системы (ГИС), помогают создавать пространственные базы данных, интегрировать различные источники информации и анализировать результаты моделирования. Visual MODFLOW может использовать данные ГИС для создания модели, включая топографию, структуру почвы, геологию и гидрологические данные. С помощью Visual MODFLOW можно проводить различные расчеты, такие как моделирование фильтрации и транспорта веществ (например, загрязняющих). Результаты моделирования можно использовать для принятия решений в

области гидротехники, охраны окружающей среды, гидрогеологических исследований и проектных работ. На рисунке 5.15 показана поверхность и расчетная сетка конечных элементов как часть расчета.

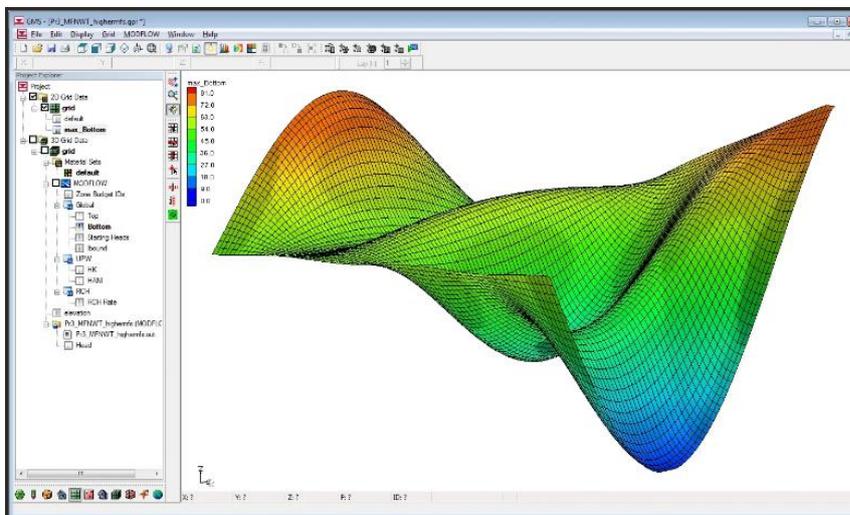


Рис. 5.15. Пример визуализации поверхности (например, положение поверхности земли, слоя грунта в основании плотины или поверхности водоупора) в программе Visual MODFLOW Flex с показом разбивки ее на конечные элементы (расчетная сетка)

5. Программный комплекс **FEFLOW** служит для моделирования движения грунтовых вод, используя уравнение Дарси, с учетом переноса веществ, тепла, плотности течения (разные жидкости), химические реакции. Как другие подобные программы, **FEFLOW** позволяет моделировать фильтрацию в грунтовых плотинах (рис 5.16).

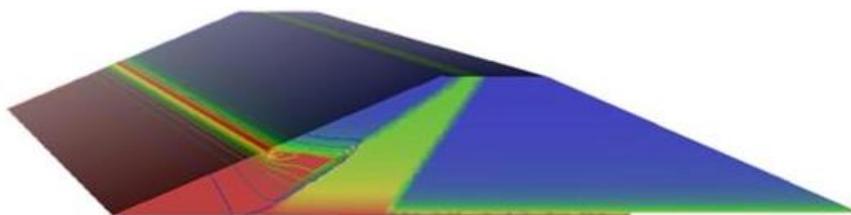


Рис. 5.16. Визуализация положения кривой депрессии в грунтовой плотине с наклонным ядром, полученная с помощью FEFLOW

Программа позволяет создавать двух- и трехмерные модели. Моделирование фильтрации в насыщенной зоне происходит по уравнению Дарси, в ненасыщенной зоне – по уравнению Ричардса. Моделируется перенос растворенных веществ, тепла, многокомпонентный транспорт (несколько

растворенных веществ), учитывается температура фильтрационного потока, его вязкость. Как и в других программах, возможен экспорт и импорт файлов CAD, GIS, и ASCII (текст).

6. Программный комплекс **PLAXIS** является геотехническим комплексом, позволяющим выполнять расчеты для различных типов сооружений и позволяет обеспечить высокие показатели эффективности, надежности и экономичности проектируемых гидротехнических сооружений и получил большое распространение (рис. 5.17) [42].

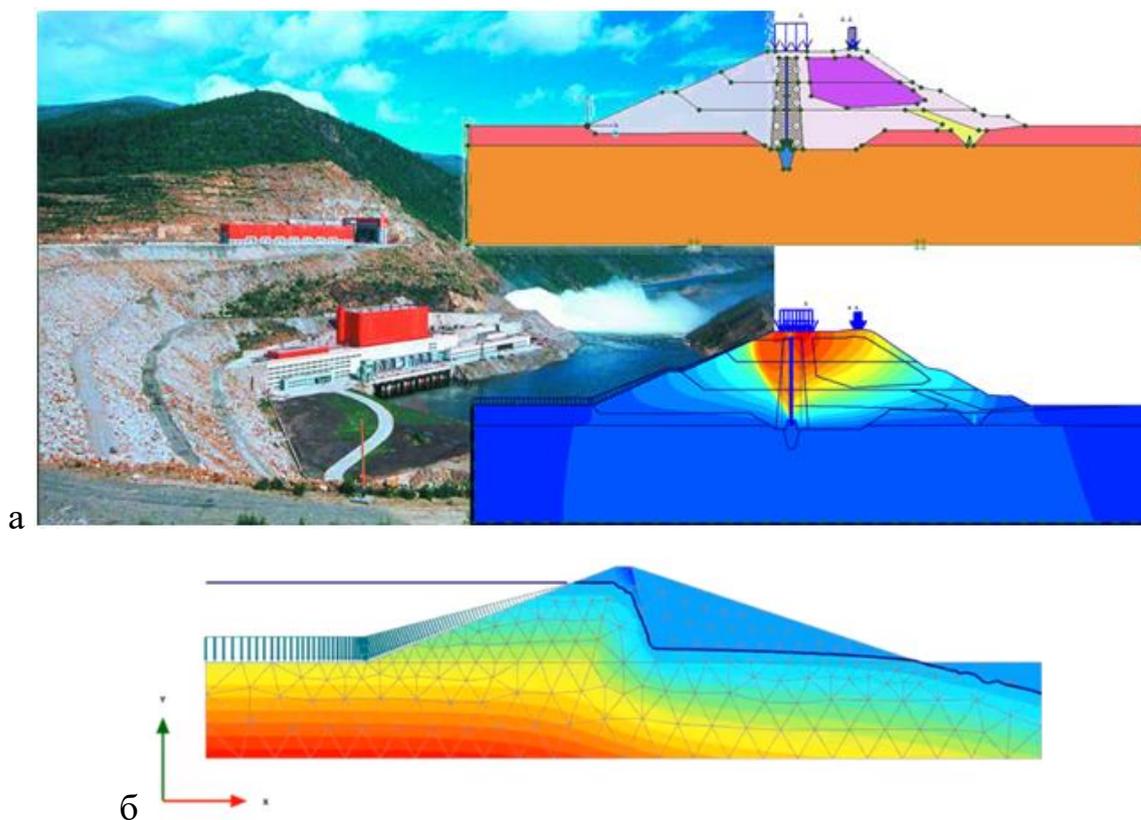


Рис. 5.17. Пример использования программного комплекса **PLAXIS** для проектирования грунтовой плотины: а – земляная плотина с ядром; б - кривая депрессии при высоком уровне воды в водохранилище в грунтовой плотине с ядром

В частности, **PLAXIS**: обеспечивает расчеты фильтрации с учетом влияния различных противофильтрационных и дренажных элементов ГТС, фильтрационной консолидации; оценивает устойчивость откосов; позволяет определять осадки сооружений; устанавливать в целом напряженно-деформированное состояние ГТС. Результаты моделирования в программном комплексе **PLAXIS** согласуются с российскими строительными нормативами.

Входящий в состав программного комплекса модуль **Flow Only** позволяет проводить фильтрационный расчет для стационарной и нестационарной задач (в этом случае необходимо задать временные шаги для расчета), в последнем случае можно увидеть картину изменения кривой депрессии во времени (рис. 5.18, 5.19), при этом программа создает анимацию. Как и в других программных комплексах, геометрию сооружений можно импортировать из **AutoCAD**. Модуль **PLAXIS LE** предназначен для расчета устойчивости методами предельного равновесия с возможностями получения поверхностей скольжения (рис. 6.9).

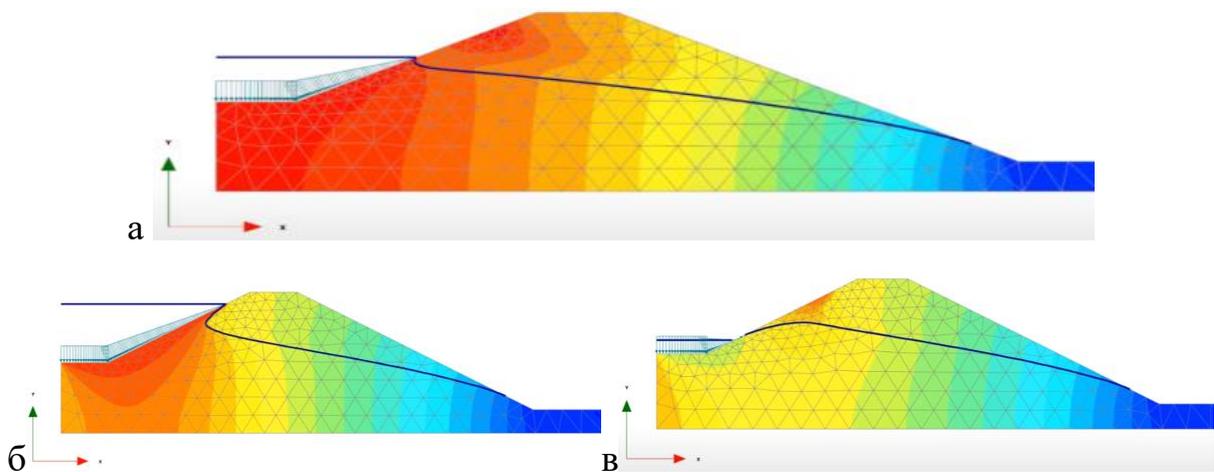


Рис. 5.18. Положение кривой депрессии в однородной грунтовой плотине без дренажа для стационарной (а) и нестационарной задачи (б, в), полученные с помощью программного комплекса PLAXIS

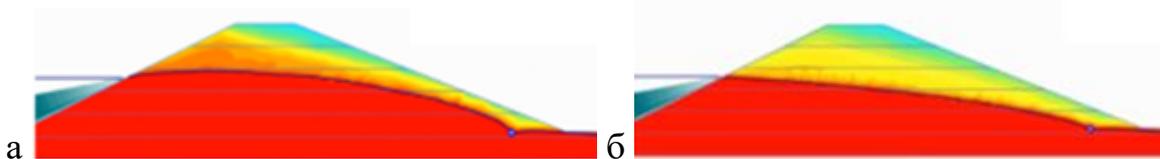


Рис. 5.19. Результаты фильтрационных расчетов (PLAXIS): а – при сработке уровня воды в водохранилище за 0,5 суток; б - при сработке уровня воды в водохранилище за 5 суток

7. Программный комплекс **MIDAS** для геотехнических расчетов ГТС предлагает модуль **MIDAS GTS NX** [42]. Помимо решения задач фильтрации он позволяет рассчитывать устойчивость откосов (склонов), поровое давление, ограждающие конструкции котлованов, туннели, динамические воздействия,

взаимодействие грунта и конструкции, теплотехнические расчеты и другие задачи. В области гидротехники **MIDAS GTS NX** предлагает проводить на трёхмерной модели фильтрационные расчеты грунтовой плотины и её основание (рис. 5.20).

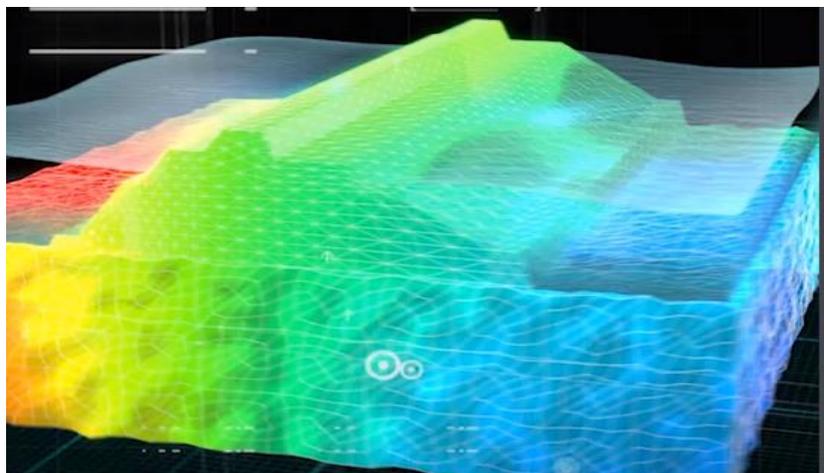


Рис. 5.20. Трёхмерная модель для расчета фильтрации в грунтовой плотине и ее основании в программе MIDAS GTS NX

На кафедре гидротехнических сооружений института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова РГАУ МСХА имени К.А.Тимирязева были проведены исследования магистрами о возможности применения программы **MIDAS GTS NX** для фильтрационных расчетов грунтовых плотин (рис. 5.22).

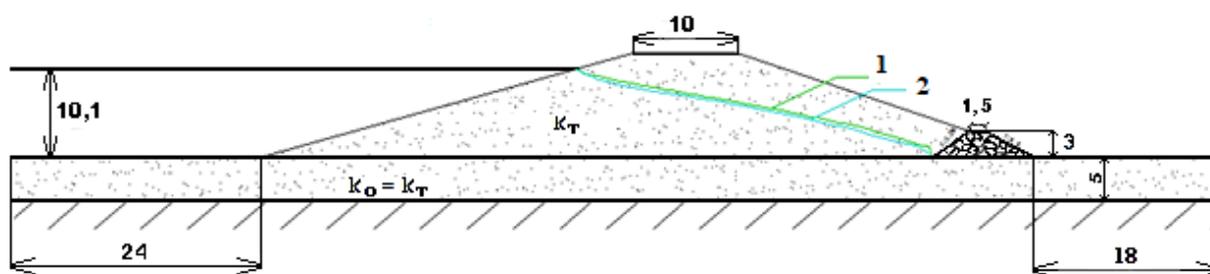


Рис. 5.22. Сравнение положения кривых депрессии, полученных разными методами 1 -с помощью программы MIDAS GTS NX; 2 - гидравлическим методом

Как видно из этого сравнения, кривые депрессии практически совпадают с точность примерно 1...5 % (в зависимости от участка). На рисунке 5.23

представлена картина распределения скоростей в теле и основании этой однородной грунтовой плотины.

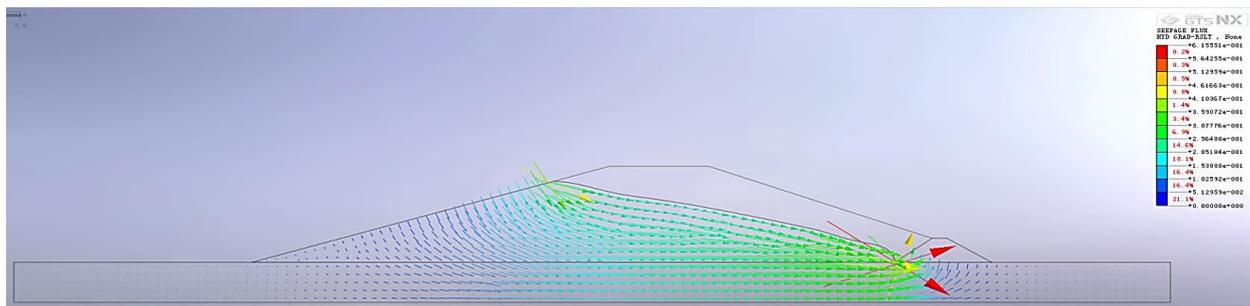


Рис. 5.23. Картина распределения скоростей фильтрационного потока в области фильтрации однородной земляной плотины, полученная с помощью программы MIDAS GTS NX

Программа также позволяет осуществлять выбор конструкции противофильтрационных элементов и дренажных устройств (рис. 5.24).

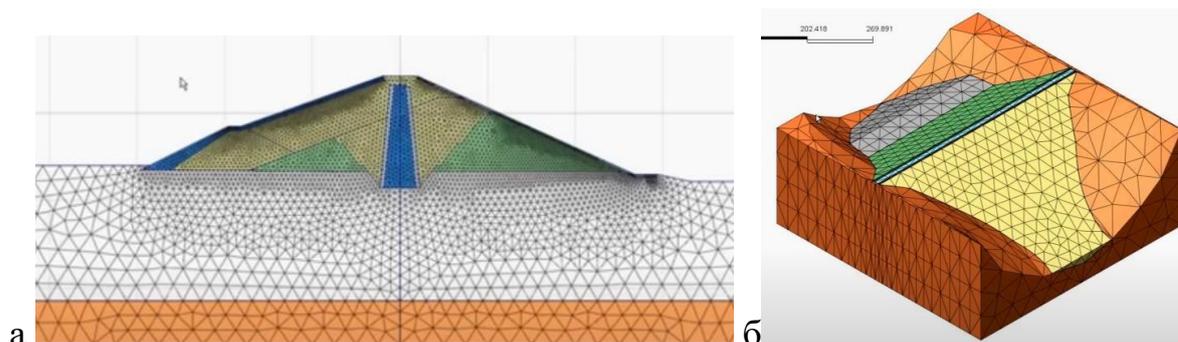


Рис. 5.24. Разбивка зоны фильтрации грунтовой плотины с ядром на конечные элементы в двухмерной (а) и трехмерной (б) постановке задачи

Кроме задач фильтрации через грунтовые плотины программа также дает возможность оценки параметров фильтрации через основание бетонных плотин на скальном основании при наличии противофильтрационных завес, проводить оценку влияния плотин на грунтовое основание, а также рассчитывать пропускную способность водосбросов таких плотин.

8. Программный комплекс **Geostudio** предлагает модуль **SEEP/W**, который позволяет моделировать движение подземных вод для решения геотехнических и экологических задач при различных граничных условиях. Он используется во всем мире для анализа и решения самых сложных проблем с фильтрацией: позволяет получить самые безопасные и экономически

эффективные решения для инженерных проектов с высоким риском, таких как системы осушения шахт, строительство объектов гражданской инфраструктуры, дамбы хвостохранилищ и многих других. А также позволяет анализировать экстремальные условия, такие как наводнения, быстрое понижение уровня грунтовых вод и влияние суровых климатических условий на состояние грунтовых вод и результаты расчета. С помощью этого модуля можно решать задачи фильтрации в грунтовых плотинах (безнапорная фильтрация) и основаниях водоподпорных сооружений (напорная фильтрация). В качестве примера использования указанного модуля в гидротехническом строительстве на рисунке 5.25 представлен результат фильтрационного расчета в однородной земляной плотине.

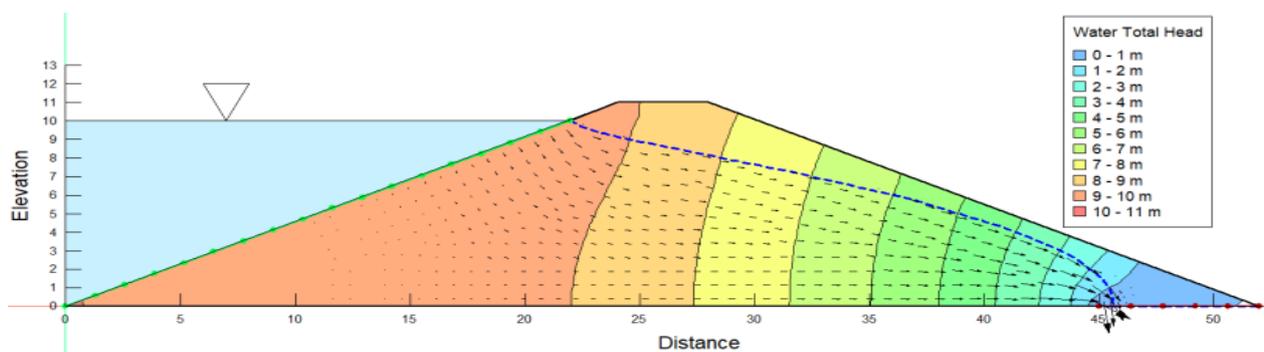


Рис. 5.25. Положение кривой депрессии и линий равного напора, полученные с помощью модуля SEEP/W для земляной плотины на непроницаемом основании при постоянном уровне воды в верхнем бьефе (стационарная задача)

Модуль SEEP/W позволяет также решать нестационарные задачи фильтрации, на рис. 5.26. приведены положения кривой депрессии в той же плотине через некоторые интервалы времени.

На рисунке 5.27. изображена картина фильтрации – гидродинамическая сетка в случае изотропного (коэффициенты фильтрации в вертикальном K_y и горизонтальном направлении K_x одинаковы) и анизотропного грунтов (коэффициенты фильтрации не одинаковы в разных направлениях).

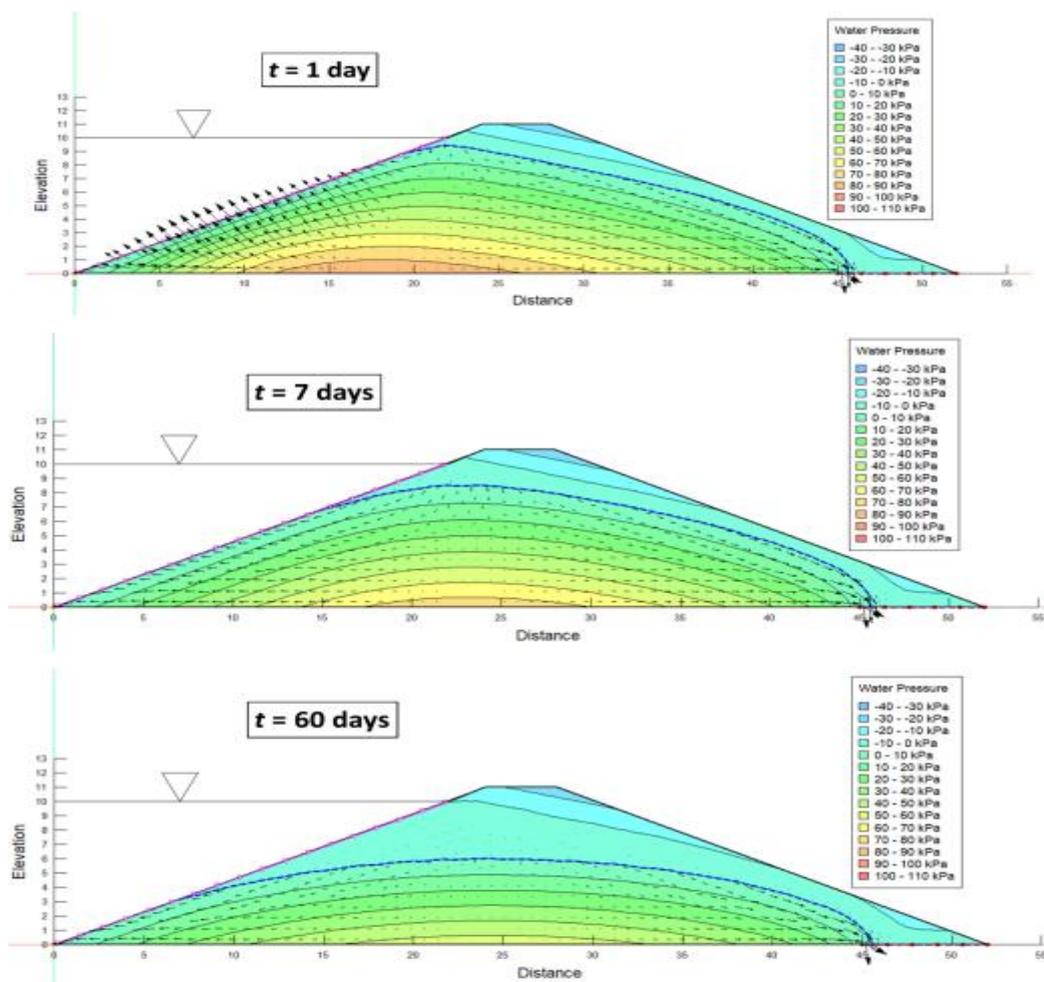


Рис. 5.26. Визуализация положения кривой депрессии при изменении уровня верхнего бьефа во времени

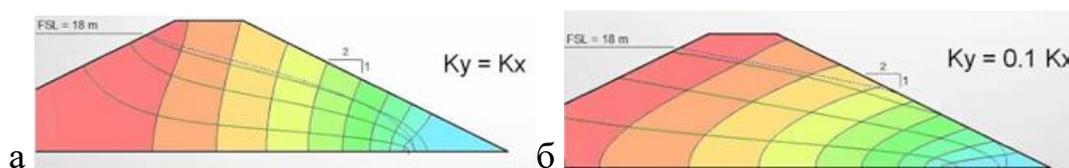


Рис. 5.27. Линии равного напора и линии тока для грунтов подпорного сооружения: а - изотропного ($K_y = K_x$); б - анизотропного (в данном случае $K_y = 0,1K_x$)

Анализ результатов расчетов с применением указанных программных комплексов показывает преимущества использования цифровых методов при решении задач фильтрации в ГТС:

- числовые расчёты обеспечивают более высокую точность результатов в сравнении с методами, которые используются в «ручных» расчётах;

- использование цифровых моделей позволяет существенно сократить время, необходимое для проведения расчётов, что особенно важно при выполнении проектов в кратчайшие сроки;

- использование цифровых методов позволяет проводить анализ различных сценариев, граничных и начальных условий, что позволяет выбрать оптимальный вариант решения задачи;

- расчёты на ПК позволяют проводить интерактивные расчёты, что упрощает гибкое взаимодействие с дополнительными данными и методами анализа;

- использование цифровых методов позволяет осуществлять различные модификации и корректировки расчётов в процессе работы, что обеспечивает более точные результаты.

Недостатки использования цифровых методов при решении задач фильтрации в конструкциях земляных плотин: для проведения расчётов необходимо иметь специальное программное обеспечение, которое может быть дорогим и требовать дополнительных затрат на обучение; для проведения расчётов на ПК необходим компьютер с высокой вычислительной мощностью, что может привести к дополнительным финансовым затратам; расчёты на ПК могут быть ограничены в связи с параметрами системы, такими как объём оперативной памяти, скорость процессора и т.д.; высокую точность результатов можно достичь только при правильном вводе исходных данных, что может потребовать дополнительного времени и усилий.

Внедрение новых информационных технологий для получения результатов и анализа данных могут значительно улучшить точность и эффективность принятия решений в области гидротехники. Важно выбрать в процессе проектирования наиболее подходящий метод для каждой конкретной задачи, учитывая возможности и ограничения каждого метода, понимая, что оптимальный выбор метода и программы для фильтрационных расчетов зависит от конкретной задачи и условий, в которых она решается, а также возможностей расчета по той или иной программе и её наличия.

6. ОСАДКА ПЛОТИН И ДАМБ, УСТОЙЧИВОСТЬ ИХ ОТКОСОВ

6.1. Стабилизированная осадка основания плотин и осадка во времени

Осадку основания земляных плотин рассчитывают в условиях плоского напряженного состояния грунта, считая, что нагрузка может следовать за деформацией основания. Такая схема отвечает условиям работы гибких фундаментов и позволяет воспользоваться зависимостями по осадкам, данными для них [9]. Суммарные осадки в земляных плотинах и дамбах состоят из *двух частей: осадки тела и основания*. Расчётные зависимости по определению осадок для обеих частей одинаковы. Сжимаемое основание под воздействием внешней нагрузки – тела плотины/дамбы – всегда будет давать осадку. Величина её зависит от мощности сжимаемого основания. С глубиной уплотняющее напряжение уменьшается, и на некоторой глубине оно практически не влияет на осадку. Такую глубину называют *активной* (активная зона), принимая её на расстоянии, где уплотняющее давление равно половине природного.

Учёт осадок в земляных плотинах/дамбах необходим по двум основным условиям. В результате осадок происходит понижение гребня плотины и увеличивается объём её тела (рис. 6.1).

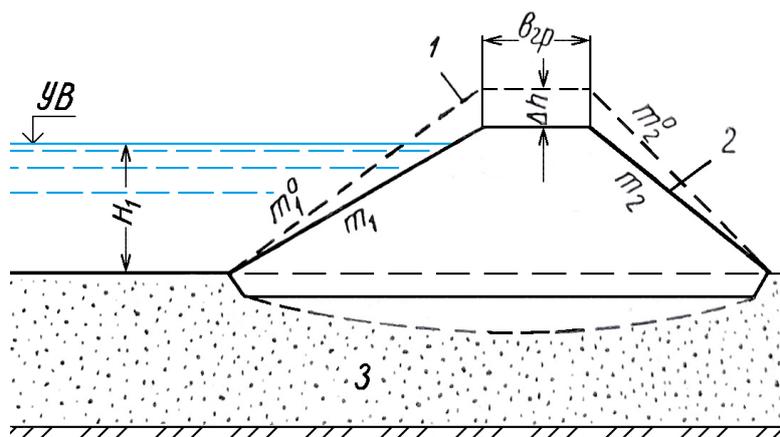


Рис. 6.1. **Контуры плотины:** 1 – строительный; 2 – эксплуатационный; 3 – сжимаемая толща грунта; в соответствии с действующим СП заложения откосов обозначаются – верхового $m_1 = m_h$ и низового $m_2 = m_t$ [4]

Эксплуатационное проектное положение внешнего контура плотины/дамбы достигается в результате изменения его в период возведения. Задают строительный контур, в котором все отметки повышают на величину осадок, определяемых по ряду вертикальных сечений. В результате осадок подошва ГТС опускается вниз. По заштрихованной площади в основании подсчитывают дополнительный объём грунта, укладываемый в тело плотины.

С момента приложения внешней нагрузки на сжимаемое основание осадки могут длиться продолжительное время, в некоторых случаях годы. Конечные осадки в земляных плотинах называют *стабилизированными*. Запаздывание осадок во времени после приложения нагрузок будет в водонасыщенных грунтах, имеющих незначительные коэффициенты фильтрации. Осадки в грунтах – следствие сближения частиц между собой, или, что то же самое, результат уменьшения пористости. Но сближение грунтовых частиц начинается после того, как произойдёт отток воды, заполняющей поры, значит, чем меньше коэффициент фильтрации, тем более продолжительное время длится осадка. Отсюда следует, что конечные осадки в глинистых грунтах будут протекать долго, а в песчаных и гравелистых грунтах быстро и оканчиваться в период возведения ГТС.

Расчёт стабилизированных осадок ведут по вертикалям, количество которых в поперечном профиле плотины принимают не менее трёх. Расчётной формулой будет:

$$\Delta h_c = h_1(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)/(1 + \varepsilon_1) \quad (6.1)$$

Где h_1 - глубина сжимаемого слоя (активная зона) до приложения внешней нагрузки; ε_1 - коэффициент пористости грунта до приложения нагрузки; ε_2 - коэффициент пористости грунта после приложения нагрузки; Δh_c - стабилизированная (конечная) осадка.

Значения коэффициентов ε_1 и ε_2 определяют по компрессионным кривым. Расчёт по формуле (6.1) выполняют послойно, при этом толщина слоёв должна

соответствовать характеру и мощности напластований грунтов основания и принимается не более одной десятой толщины активной зоны. Коэффициенты пористости относят к середине каждого слоя. Формула (6.1) справедлива для условий плоской задачи, то есть при сплошной равномерно распределённой нагрузке, расположенной на неограниченной площади. Считают, что этому условию отвечает трапецеидальная нагрузка тела земляной плотины/дамбы. Для определения осадки по формуле (6.1) необходимо знать уплотняющее напряжение в рассматриваемом слое. Для его определения служат довольно сложные формулы или таблицы, полученные на основе этих формул [9].

Если осадку земляной плотины определяют к концу заданного промежутка времени, когда она полностью ещё не завершена, то её называют *нестабилизированной*. Приблизённо её определяют по эмпирической формуле:

$$\Delta h_t = \Delta h_c (1 - 2,7^{-0,5t}), \quad (6.2)$$

где Δh_t - осадка за время t в годах от начала приложения нагрузки; Δh_c - стабилизированная осадка, подсчитанная по формуле (6.1).

Формула справедлива при отношении толщины сжимаемого слоя к ширине плотины по основанию больше единицы. При меньших значениях этого отношения показатель степени будет больше. Для высоких плотин приближённо принимают $h_{zp} = 0,001 \cdot H_{пл}^{3/2}$, для низких плотин и средненапорных плотин

$$\Delta h = (0,005 \dots 0,015) H_{пл}, \quad (6.3)$$

где $H_{пл}$ – высота плотины.

Для низких плотин, относящихся в основном к IV классу суммарная осадка тела и основания плотины может быть принята по упрощённому выражению

$$h_{zp} \leq 0,01 \cdot H_{пл}. \quad (6.4)$$

С учётом осадки должен быть возведён строительный профиль плотины, отметка гребня ($\nabla_{Гр, стр}$) которого в русловой части (месте наибольшей осадки плотины) определяется по зависимости

$$\nabla_{Гр, стр} = \nabla_{Гр} + \Delta h. \quad (6.5)$$

Осадка гребня плотины в местах ее боковых примыканий равна 0.

Горизонтальные перемещения гребня плотины можно принять $U_{гр} \leq (0,003 \dots 0,005) \cdot H_{пл}$ [13].

6.2. Устойчивость откосов земляных плотин и дамб

Для расчета устойчивости откосов (рис. 6.2 и 6.3) существует ряд методов, которые можно подразделить на аналитические, графические и графоаналитические [11, 13, 35].

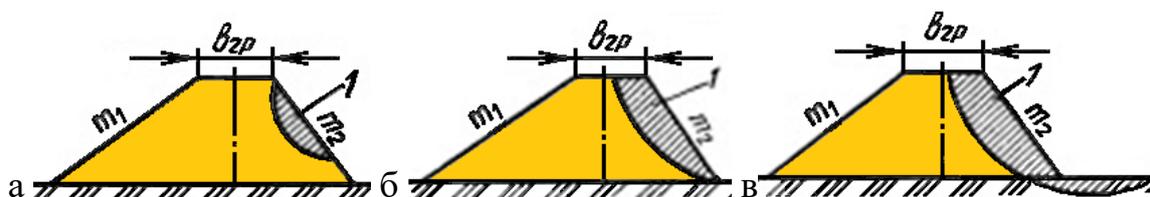


Рис. 6.2. Виды оползания откосов: а - на части откоса; б-по высоте плотины; в - с захватом основания; 1 – сползающий массив

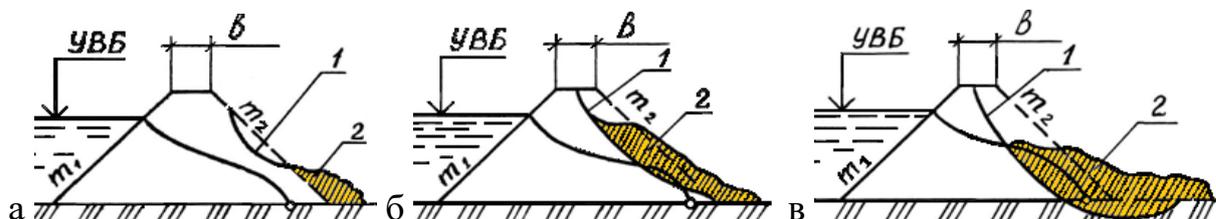


Рис. 6.3. Виды обрушения низового откоса плотины: а-на части откоса; б-по всей высоте плотины; в-с захватом основания; 1 – поверхность скольжения; 2 – массив обрушения

Аналитические методы построены на строгой математической оценке явления взаимодействия сил и с этой стороны являются наиболее совершенными. Вместе с тем сопоставление результатов расчета, полученных аналитическим методом, с другими приближенными методами дает расхождение весьма незначительное [13]. Сложность формул и трудоемкость вычислительных операций ограничивают применение аналитических методов.

Графический метод расчета устойчивости откосов требует особо тщательного исполнения расчетных построений, при этом возникают трудности, связанные с графическим определением направления и приложения сил. Точность этого метода небольшая, в силу чего им мало пользуются в проектной практике. Для расчета устойчивости откосов земляных плотин наиболее распространен приближенный графоаналитический способ по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения. Расчет по рассматриваемому способу производится, предполагая, что массив грунта откосного сооружения может сползти по цилиндрической поверхности с радиусом R , проведенным из центра вращения O (рис. 6.4).

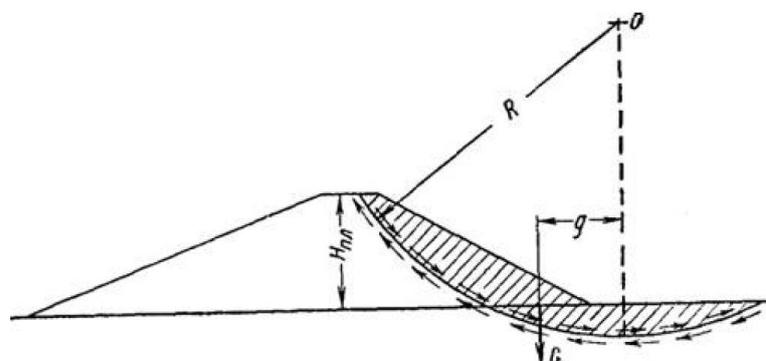


Рис. 6.4. Схема сползания откоса

Расчеты устойчивости откосов относятся к расчетам по I группе предельных состояний (непригодность сооружения к эксплуатации), условие недопущения которых согласно СП 58.13330.2012 [3] записывается в виде

$$\gamma_{lc} F \leq \frac{R}{\gamma_n}, \quad (6.6)$$

где: γ_{lc} – коэффициент сочетания нагрузок, принимаемый при расчетах по первой группе предельных состояний: для основного сочетания нагрузок и воздействий в период нормальной эксплуатации – 1,00; для периода строительства и ремонта – 0,95; для особого сочетания нагрузок и воздействий: при особой нагрузке, в том числе сейсмической на уровне проектного землетрясения, годовой вероятностью 0,01 и менее – 0,95; при особой нагрузке, кроме сейсмической, годовой вероятностью 0,001 и менее – 0,90; при

сейсмической нагрузке уровня максимального расчетного землетрясения – 0,85; F – расчетное значение обобщенного силового воздействия, определенное с учетом коэффициента надежности по нагрузке γ_f ; значения γ_f при расчетах по предельным состояниям первой группы должны приниматься в соответствии с [3] (в курсовом проекте допускается принимать $\gamma_f = 1$); R – расчетное значение обобщенной несущей способности, определенное с учетом коэффициентов надежности по грунту γ_g и условий работы γ_c (коэффициенты γ_g и γ_c применяются в качестве сомножителя в расчетном значении R ; коэффициент надежности по грунту учтен в исходных данных курсового проекта; коэффициент условий работы γ_c учитывает приближенность расчетных схем и в курсовом проекте принимается равным 0,95); γ_n – коэффициент надежности по ответственности сооружения, принимаемый при расчетах по первой группе предельных состояний по таблице 6.1.

Таблица 6.1.

Коэффициенты надёжности по классам плотин

Сочетание нагрузок и воздействий	Коэффициент запаса устойчивости при классе плотин			
	I	II	III	IV
Основные	1,25	1,2	1,15	1,1
Особые	1,1	1,1	1,05	1,05

Устойчивость откоса оценивается коэффициентом, представляющим отношение моментов всех удерживающих сил к моменту всех сдвигающих. Таким образом, расчетная формула метода круглоцилиндрических поверхностей скольжения в обобщенном виде [14]

$$k_{уст} = \frac{\sum M_{удер}}{\sum M_{сдв}} \geq k_{дон}, \quad (6.7)$$

где: $k_{уст}$ – расчетное значение коэффициента устойчивости откоса; $\sum M_{удер}$ и $\sum M_{сдв}$ – сумма моментов, соответственно, удерживающих и сдвигающих сил относительно центра поверхности (кривой) скольжения; $k_{дон}$ – допустимый (нормативный) коэффициент устойчивости откосов.

Полученное значение коэффициента устойчивости должно удовлетворять условию [11]

$$k_{уст} \geq k_{дон} = \frac{\gamma_n \gamma_{lc}}{\gamma_c}, \quad (6.8)$$

При выполнении условия (6.7) делается вывод о том, что обрушения откоса вдоль рассмотренной поверхности скольжения не произойдет. Минимальный коэффициент запаса на устойчивость при основном сочетании нагрузок не должен превышать значение допускаемого, соответствующего принятому классу опасности плотины (1,16 для плотин IV класса; 1,21 для III класса; 1,26 для II класса; 1,32 для I класса) более чем на 10...15% [3, 4, 34]. Положение центра кривой скольжения, отвечающего минимальному значению коэффициента устойчивости откоса, определяют путем последовательных приближений. Для нахождения минимального значения $k_{уст}$, приходится выполнить ряд подсчетов, принимая во внимание следующее: наиболее опасная кривая сползания песчаного откоса на песчаном основании проходит через подошву откоса; наиболее опасная кривая скольжения песчаного откоса на глинистом основании может проходить не только через подошву откоса, но и всего основания. Если условие не выполняется, может произойти обрушение откоса и разрушение сооружения.

Расчет по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения ведут при заданном поперечном профиле плотины и известных физико-механических характеристиках грунта. Последние получают на основании лабораторных или полевых исследований. При предварительной оценке устойчивости откоса характеристика грунта может быть взята из таблиц, содержащих осредненные величины [10, 14, 15, 21]. При расчете низового откоса необходимо иметь кривую депрессии, положение которой в теле плотины определяется на основе фильтрационных расчетов (рис. 6.2). Расчеты устойчивости откосов грунтовых плотин обычно проводятся для нескольких наиболее неблагоприятных случаев работы плотины. В курсовом проекте проверяется возможность обрушения только низового откоса плотины в ее русловой части по одной из возможных

поверхностей скольжения, например, при эксплуатации плотины при отметке НПУ в ВБ и при уровне воды в НБ на отметке, соответствующей расходу полезных попусков. Расчет устойчивости выполняется в следующей последовательности.

1. Определение наиболее опасных центров поверхностей скольжения может быть выполнено различными способами, например, методом "прямого луча" [10, 14]. При использовании этого метода от подошвы низового откоса плотины (точка А) откладывается высота плотины, от полученной точки В - по горизонтали размер равный $5 H_{пл}$, а затем из полученной точки С проводится луч СF, проходящий через низовую бровку гребня плотины (точку D). На луче СF выбирается центр (точка O_1) поверхности скольжения таким образом, чтобы вертикаль, опущенная из центра O_1 проходила в районе нижней части низового откоса плотины. Затем радиусом R (радиус лучше принять кратным 10 м) проводится кривая скольжения.

2. При выборе величины радиуса следует руководствоваться следующими соображениями:

- если угол внутреннего трения и удельное сцепление грунта тела плотины превышают угол внутреннего трения и удельное сцепление грунта основания плотины, то поверхность скольжения надлежит проводить так (т.е. выбирать такой радиус R), чтобы она частично проходила в основании плотины;

- если угол внутреннего трения и удельное сцепление грунта тела плотины меньше угла внутреннего трения и удельного сцепления грунта основания плотины, то поверхность скольжения не должна пересекать основание плотины;

- при соотношениях характеристик грунтов, не отвечающих вышеприведенным случаям, рекомендуется проводить поверхность скольжения с захватом части основания. При этом точка пересечения поверхности скольжения с дном нижнего бьефа не должна удаляться от низового откоса плотины на расстояние более чем $2H_{пл}$.

При расчёте значения угла внутреннего трения (φ) и удельного сцепления (c) берутся при влажности, соответствующей естественной, т.е. для грунтов, уложенным выше кривой депрессии.

3. Массив потенциального обрушения разбивается на элементарные отсеки шириной $b = 0,1R$. Для этого после проведения поверхности скольжения из центра O_1 проводится вертикаль до пересечения с последней. При ручном счёте для разбивки частей тела плотины и основания, находящихся выше поверхности скольжения, вертикальными линиями на отдельные отсеки от проведенной вертикали откладывается в обе стороны размер, равный половине ширины отсека b . Этому отсеку присваивается порядковый номер 0. Затем вправо и влево от "нулевого" отсека откладывается ширина отсеков b , проводятся вертикальные линии в пределах массива обрушения и нумеруются отсеки: положительными номерами – слева от "нулевого" отсека, отрицательными числами – справа.

4. Расчёт удобно выполнять в табличной форме [14]. Для облегчения расчетов в курсовом проекте допускается принимать характеристики дренажа, равными соответствующим характеристикам грунта тела плотины.

При выполнении расчётов в табличной форме условно все грунты в каждом отсеке приводятся к одному грунту, например, к грунту №1. Приведенная высота отсека $h_{прив}$ рассчитывается по формуле

$$h_{пр} = h_1 \frac{\rho_1}{\rho_1} + \frac{\rho_2}{\rho_1} h_2 + \frac{\rho_3}{\rho_1} h_3 + \frac{\rho_i}{\rho_1} h_i + \frac{\rho_w}{\rho_1} H_2, \quad (6.9)$$

где: ρ_1 – плотность влажного грунта №1, определяемая по формуле

$$\rho_1 = \rho_d (1+W); \quad (6.10)$$

ρ_d – плотность сухого грунта №1, принимаемая из таблицы исходных данных задания на проектирование в t/m^3 ; W – влажность грунта №1 в долях единицы (для песков $W = 0,06...0,09$, для супесей $W = 0,1...0,14$, для суглинков $W = 0,15...0,2$); ρ_2 и ρ_3 – плотность грунтов №2 и №3, взвешенных в воде, определяется соответственно по формулам

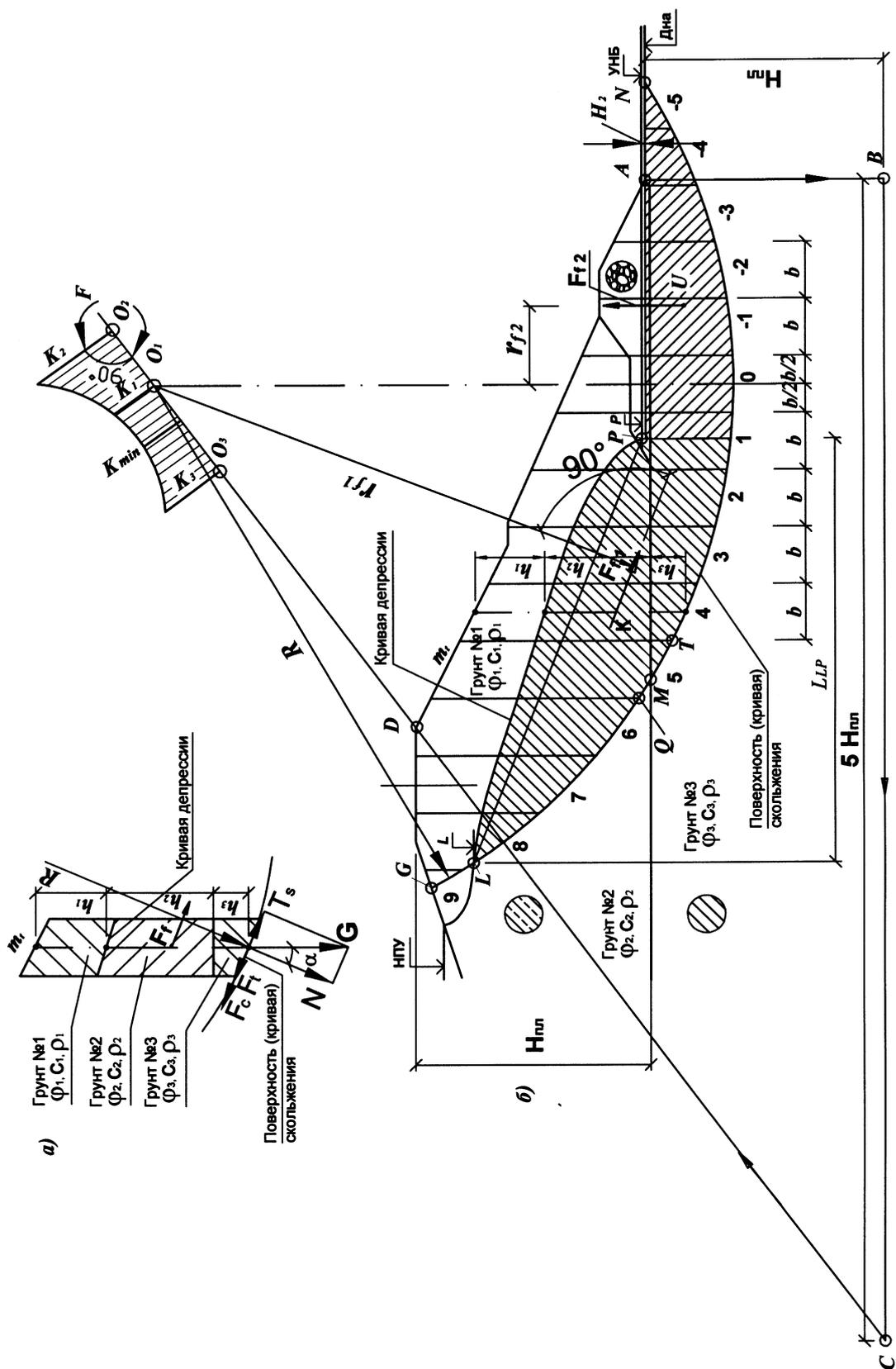


Рис. 6.5. Расчётная схема устойчивости откоса по круглоцилиндрической поверхности скольжения: а – силы, действующие на один из выделенных отсеков; б – общая расчётная схема

$$\rho_2 = (\rho_{s,2} - \rho_\omega)(1 - n_2), \quad (6.11)$$

$$\rho_3 = (\rho_{s,3} - \rho_\omega)(1 - n_3); \quad (6.12)$$

$\rho_{s,2}$ и $\rho_{s,3}$ – соответственно плотность частиц грунтов №2 и №3, принимаемая из таблицы исходных данных на проектирование; $\rho_\omega = 1 \text{ т/м}^3$; n_2 и n_3 – пористость грунтов №2 и №3, принимаемая в долях единицы из задания на проектирование.

Последний член в формуле (6.9) учитывается только для отсеков массива возможного обрушения, расположенных за подошвой низового откоса плотины (например, на рис. 6.5 это отсеки -4 и -5). Значение угла внутреннего трения устанавливается для грунтов, в которых проходит поверхность скольжения в пределах каждого отсека; при нахождении этих грунтов ниже кривой депрессии значения снижаются на 10...30%. Там, где поверхность скольжения в пределах одного отсека проходит в различных грунтах (отсеки № 8 и № 5) угол внутреннего трения следует принимать как средневзвешенный φ_{cp}

$$\varphi_{cp} = (\varphi_{лев} l_{лев} + \varphi_{прав} l_{прав}) / (l_{лев} + l_{прав}), \quad (6.13)$$

где: $\varphi_{лев}$ и $l_{лев}$ – соответственно угол внутреннего трения грунта и длина участка поверхности скольжения, измеренная от точки изменения типа грунта на поверхности скольжения до левой границе отсека; $\varphi_{прав}$ и $l_{прав}$ – то же самое, но до правой границы отсека. Так, например, для отсека №5 формула (6.13) будет иметь вид

$$\varphi_5 = (\varphi_2 l_{MQ} + \varphi_3 l_{MT}) / (l_{MQ} + l_{MT}). \quad (6.14)$$

5. Вычисление коэффициента устойчивости $K_{уст}$ выполняется по формуле, полученной из зависимости (6.10)

$$K_{уст} = \frac{\rho_1 \cdot g \cdot b \cdot \sum h_{нпуг} \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi + S}{\rho_1 \cdot g \cdot b \cdot \sum h_{нпуг} \sin \alpha + F_{f1} \cdot \frac{r_{f1}}{R} \pm F_{f2} \cdot \frac{r_{f2}}{R}} \quad (6.15)$$

$$\text{или } K_{\text{уст}} = \frac{\rho_1 \cdot g \cdot b \cdot \sum 2 + S}{\rho_1 \cdot g \cdot b \cdot \sum 1 + F_{f1} \cdot \frac{r_{f1}}{R} \pm F_{f2} \cdot \frac{r_{f2}}{R}},$$

где величина сил сцепления S рассчитывается по формуле

$$S = \sum c_i \cdot l_i = c_1 \cdot l_1 + c_2 \cdot l_2 + c_3 \cdot l_3, \quad (6.16)$$

c_1, c_2 и c_3 – удельное сцепление грунтов №1, №2 и №3 в кН/м², принимаемое по заданию на проектирование с учетом возможного снижения величины сцепления на 10...30% для грунтов в насыщенном состоянии; l_1, l_2 и l_3 – длины поверхности скольжения в пределах участка скольжения соответственно для грунтов №1, №2 и №3. На рисунке 6.5 это длины дуг l_{GL}, l_{LM} и l_{MN} поверхности скольжения. Длина дуг может быть определена непосредственно путем измерения на расчетной схеме с учетом масштаба или вычислена по формуле: $L = 2\pi R \alpha_L / 360^\circ$, где α_L – угол в градусах, соответствующий участку поверхности скольжения длиной L ; F_f – фильтрационная сила, которую можно считать как поверхностную, приложенную к кривой скольжения. Площадь её действия обычно разбивается на две: первая сила F_{f1} приложена в центре тяжести площади ω_1 и направлена под углом к горизонту, вторая сила F_{f2} определяется по площади ω_2 : она приложена в центре её тяжести и направлена вверх; F_{f1} – сила гидродинамического давления фильтрационного потока, определяемая по формуле:

$$F_{f1} = \rho_\omega \omega_1 I_1, \quad (6.17)$$

ω_1 – площадь заштрихованной зоны фильтрационного потока между кривой депрессии и поверхностью скольжения. Площадь этой зоны может быть определена любым способом: с помощью планиметра, путем разбиения на элементарные фигуры, в том числе путем подсчета количества квадратиков по схеме на миллиметровке с переводом в квадратные метры с учетом квадрата масштаба рисунка; I_1 – средний градиент фильтрационного потока, определяемый по выражению

$$I_1 = (\nabla_L - \nabla_P) / l_{LP}, \quad (6.18)$$

∇_L, ∇_P и l_{LP} устанавливаются путем измерения с учетом масштаба; l_{LP} – горизонтальная проекция участка LP кривой депрессии; r_{f1} – плечо силы F_{f1} . Для определения величины плеча r_{f1} необходимо определить место приложения силы F_{f1} , т.е. центр тяжести K заштрихованной фигуры любыми известными способами (рис. 6.5) [9]. После определения центра тяжести устанавливают направление действия фильтрационной силы F_{f1} , которое совпадает с направлением осредненного для этой области градиента фильтрационного потока (направление этого градиента – параллельно прямой линии LP). Затем из центра O_1 опускается перпендикуляр на вектор силы F_{f1} или на линию ее действия и измеряется с учетом масштаба величина плеча r_{f1} .

Момент силы F_{f2} может быть, как сдвигающим одного знака с моментом силы F_{f1} , так и удерживающим, если сила расположена слева от вертикали, опущенной из центра O_1 . Моментом силы F_{f2} на выходе фильтрационного потока в НБ в курсовом проекте можно пренебречь из-за незначительной величины градиента фильтрационного потока и небольшого значения плеча r_{f2} этой силы по сравнению с радиусом поверхности скольжения. Расчёт устойчивости откоса с учётом сейсмических воздействий может быть выполнен методом сдвигового клина, при этом член с сейсмической силой прибавляют в знаменатель формулы (6.18) [14]. Найденное минимальное значение коэффициента устойчивости не должно превышать допускаемое более чем на 10%, если это не обусловлено особенностями сооружения. Однако в расчётах это значение может быть много бóльшим, что свидетельствует не столько о большом запасе, сколько о том, что данная поверхность сдвига не является наиболее опасной. При $k_{уст} < k_{дон}$ необходимо предложить конструктивные меры по повышению устойчивости откоса, например, увеличить заложение откоса и пр.

Полученная оценка устойчивости является случайной, так как принята практически случайная кривая скольжения. Поэтому в выпускных работах не-

справедлива и для случая, когда основание сложено из грунтов с большим углом внутреннего трения, чем угол внутреннего трения тела плотины.

Расчёт устойчивости назначенных ранее откосов земляных плотин и дамб при выполнении РГР, КР и ВКР проводится любым способом, указанным в литературе [1, 2, 8, 10, 11, 12, 14] для основного сочетания нагрузок (рис. 6.7). Расчёты по нахождению коэффициента запаса откосов целесообразнее проводить графоаналитическим методом кругло–цилиндрических поверхностей скольжений по компьютерной программе, имеющейся на кафедре ГТС [8] либо по другой цифровой программе (рис. 6.8), используя зависимость (6.7).

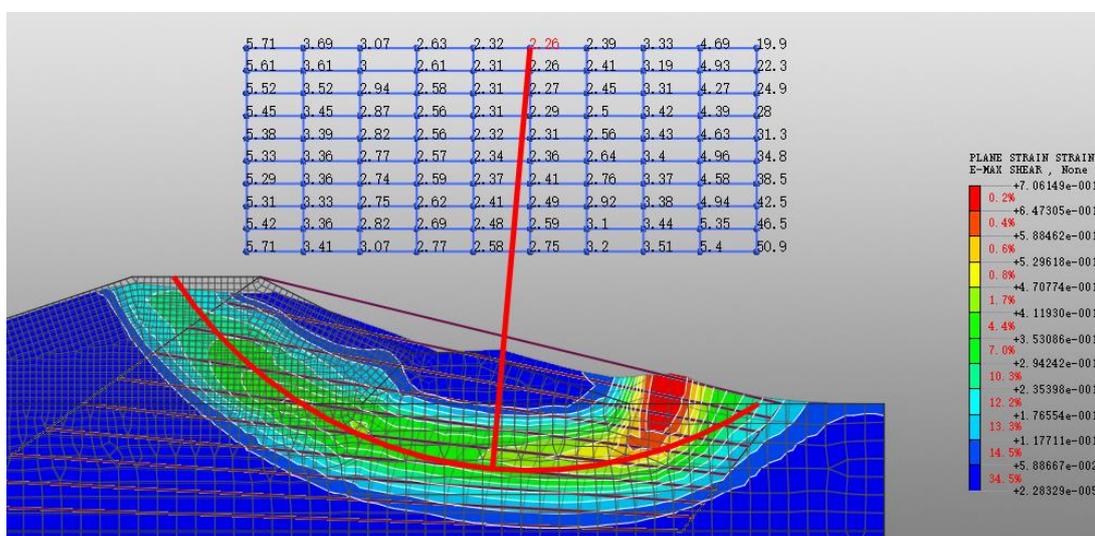


Рис. 6.8. Проверка устойчивости низового откоса, проведённая по программе Midas

Модуль PLAXIS LE предназначен для расчета устойчивости методами предельного равновесия с возможностями получения поверхностей скольжения (рис. 6.9).

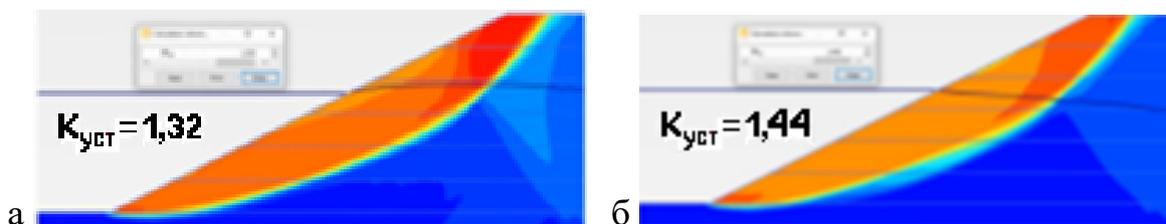


Рис. 6.9. Результаты расчетов устойчивости верхового откоса плотины с помощью программного комплекса PLAXIS LE: а – при сработке уровня воды в водохранилище за 0,5 суток; б - при сработке уровня воды в водохранилище за 5 суток

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите и охарактеризуйте состав сооружений мелиоративного гидроузла с земляной плотиной.
2. Как выбирается створ грунтовой плотины?
3. Какие типы грунтовых плотин наиболее распространены?
4. Как производится выбор типа земляной плотины?
5. С какой целью устраиваются дренажи в земляных плотинах? Приведите их конструкции.
6. Что влияет на выбор заложения откосов земляной плотины и дамбы?
7. Основные принципы расчёта устойчивости откосов земляных плотин и дамб.
8. Основные задачи фильтрационного расчёта земляных плотин и методы их решения.
9. Как производится фильтрационный расчёт однородной земляной плотины?
10. Дайте характеристику мировой статистики катастроф на низконапорных гидроузлах с земляными плотинами и дамбами.
11. Основные термины и нормативно-правовые документы, регламентирующие обеспечение безопасности мелиоративных гидроузлов с земляными плотинами.
12. Природные и техногенные нагрузки и воздействия, приводящие к повреждениям и авариям земляных плотин и дамб мелиоративных гидроузлов.
13. Схемы наиболее распространённых типов водопропускных сооружений при грунтовых плотинах мелиоративных гидроузлов.
14. Какие противофильтрационные элементы применяют в грунтовых плотинах. Приведите их схемы.

15. Изобразите наиболее характерные компоновки низконапорных гидроузлов с земляной плотиной мелиоративного назначения.
16. Перечислите противofильтрационные устройства в основании земляных плотин и дамб. Приведите их схемы.
17. Повреждения различных типов грунтовых гидротехнических сооружений мелиоративной системы и их элементов. Примеры.
19. Перечислите основные способы возведения грунтовых плотин. Приведите основные схемы.
20. Какие есть схемы пропуска расходов водотока в строительный период при возведении земляных плотин?
21. Основные конструктивные схемы, особенности расчётов, проектирования и строительства ГТС прудовых сооружений рыбхозов: дамбы, плотины, водосбросы, водовыпуски, водоспуски, трубы, лотки и т.д.
22. Укажите пути повышения эксплуатационной надёжности земляных плотин.
23. Какие противofильтрационные элементы применяют в грунтовых плотинах. Приведите известные Вам их конструктивные схемы.
23. В каких случаях не устраивается дренаж в земляных насыпных плотинах?
24. В чём отличие земляных плотин от каменно-земляных, каменно-набросных, бетонных и железобетонных?
25. Основные требования устройства понуров, экранов и ядер земляных плотин и дамб.
26. Поясните принципы назначения класса ГТС гидроузла с земляной плотиной.
27. Назначение и конструктивные особенности поперечного профиля грунтовых подпорных сооружений.

28. Охарактеризуйте условия применения основных типов земляных плотин.

29. Расчётная схема к определению отметки гребня грунтовой плотины и расчётные зависимости.

30. Поясните назначение парапета на гребне подпорного сооружения, приведите известные Вам его схемы.

31. Типы дренажей грунтовых плотин. Охарактеризуйте область применения основных типов руслового и берегового дренажа земляных плотин и дамб.

32. Типы крепления верхового откоса грунтовых плотин и области их применения.

33. Конструктивные схемы берм и крепления низового откоса грунтовых подпорных ГТС.

34. Приведите некоторые инженерные мероприятия, направленные на повышение устойчивости низового откоса грунтовых плотин.

35. Какие задачи решаются при выполнении фильтрационных расчётов? Назовите предпосылки, допущения, достоинства и недостатки основных методов фильтрационных расчётов грунтовых плотин и их оснований?

36. Виды фильтрационных деформаций грунтов и меры борьбы с ними.

37. Назначение понура, шпунтовых стенок, инъекционных завес и дренажей в подземном контуре земляных ГТС? Их основные конструктивные элементы.

38. Проанализируйте возможные рациональные схемы ПФУ в теле и основании грунтовых плотин при различном геологическом строении основания и расстояния до водоупора.

39. Предложите инженерные методы понижения кривой депрессии в теле грунтовых плотин.

40. Поясните какими методами может быть осуществлён пропуск строительных расходов транзитом при возведении земляной плотины на разных основаниях. Приведите схемы наиболее удобных методов и строительных перемычек.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Постановление Правительства РФ от 2 ноября 2013 г. № 986 «О классификации гидротехнических сооружений».
2. О безопасности гидротехнических сооружений: Федеральный закон от 21.07.1997 г. № 117-ФЗ (ред. от 28.12.2013) [Электронный ресурс]. – URL: <http://focdoc.ru/article/a-43.html> (дата обращения 16.05.2015).
3. СП 58.13330.2012. «Гидротехнические сооружения. Основные положения» (актуализированная редакция СНиП 33-01-2003). 2012.
4. СП 39.13330.2012. «Плотины из грунтовых материалов» (актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84*). 2012.
5. СП 23.13330. «Основания гидротехнических сооружений» (актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85*). 2012.
6. СП 38.13330.2012. «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)» (актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82*). 2012.
7. Журавлёв Г. И. Гидротехнические сооружения. М.: Изд-во Колос, 1979. – 423 с.
8. Журавлёв Г.И. Земляные плотины и водосбросные сооружения. М.: Госиздат-во сельхоз. лит-ры, 1957. – 188 с.
9. Журавлёв Г.И. Земляные плотины. М.: Изд-во Колос, 1966. – 279 с.
10. Волков В.И., Журавлёва А.Г., Черных О.Н. Проектирование сооружений гидроузла с грунтовой плотинной: Учебное пособие. М.: Изд-во МГУП, 2007. – 246 с.
11. Каганов Г.М., Румянцев И.С. Гидротехнические сооружения: Учебник для техникумов. В 2-х кн. - М.: Энергоатомиздат, 1994.
12. Черных О.Н., Волков В.И. Проведение обследований при оценке безопасности гидротехнических сооружений: Учебное пособие. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2017. – 160 с.

13. Гидротехнические сооружения. Учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению «Стр-во» специальности «Гидротехн. стр-во». в 2 ч. /Л.Н. Рассказов и др.; под ред. Л.Н. Рассказова. М.: Изд-во АСВ, 2011.

14. Черных О.Н., Алтунин В.И., Волков В.И. Расчеты сооружений гидроузла с плотиной из грунтовых материалов: Учебное пособие. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2015. – 203 с.

15. Черных О.Н. Гидроузел с грунтовой плотиной: Методические указания. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2016. – 72 с.

16. Волков В.И., Черных О.Н., Алтунин В.И. Оценка безопасности грунтовых подпорных сооружений: Учебное пособие. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2016. – 75 с.

17. Кавешников Н.Т. Эксплуатация и ремонт гидротехнических сооружений. Учебное пособие. М.: Агропромиздат, 1989. – 272 с.

18. Щедрин В.Н., Косиченко Ю.М., Бакланова Д.В., Баев О.А., Михайлов Е.Д. Обеспечение безопасности и надёжности низконапорных гидротехнических сооружений. Новочеркасск: РосНИИПМ, 2016. – 283 с.

19. Плотины и развитие: новая методическая основа для принятия решений. Отчёт всемирной комиссии по плотинам. – М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2009.– 200с.

20. Черных О.Н., Сабитов М.А., Бурлаченко А.В. Специфика реконструкции бесхозяйных плотин// Природообустройство, 2017, №2, с. 12–20.

21. Розанов Н.П., Румянцев И.С., Корюкин С.Н. и др. Особенности проектирования и строительства гидротехнических сооружений в условиях жаркого климата. Учебник для вузов - М.: Колос, 1993. – 303 с.

22. Черных О.Н. Берегоукрепительные конструкции водных объектов. часть 1. Черных О.Н., Ханов Н.В. Бурлаченко А.В., 2019 размещено в ЭБС РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева в электронном виде (режим доступа <http://elib.timacad.ru/dl/local/06122021.pdf>).

23. Черных О.Н. Берегоукрепительные конструкции водных объектов. часть 2 Черных О.Н., Ханов Н.В. Бурлаченко А.В., 2020 размещено в ЭБС РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева в электронном виде (режим доступа: <http://elib.timacad.ru/dl/local/umo441.pdf>).
24. Нань Ф. «Основы современного гидротехнического строительства» / Ф. Нань, А.Г. Журавлёва, И. С. Румянцев // Монография: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. Saarbrucken, Germany, 2014. – 124 с.
25. СП 34.13330.2021. Свод правил. «Автомобильные дороги» (актуализированная редакция СНиП 2.05.20-85*). 2022.
26. Проектирование гидротехнических сооружений водохозяйственного назначения. – М.: Союзводпроект, 1989. – 282 с.
27. Мелиорация прудов / под ред. Шкуры В.Н. // Белов В.А., Иванова Н.А., Мордвинцев М.М., Полуэктов Е.В., Шкура Вл.Н. и др. – Новочеркасск: НГМА, 2013. – 371 с.
28. Справочник по гидравлическим расчётам / П.Г. Киселёв, А.Д. Альтшуль, Н.В. Данильченко [и др.] – М.: ЭКОЛИТ, 2011. – 312 с.
29. Учеваткин А.А. Итоги работы за 2020 г. Центрального управления Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору, М.: 2021 г.
30. СП 100.13330.2016. «Мелиоративные системы и сооружения» (актуализированная редакция СНиП 2.06.03-85*). 2012.
31. Васильева Е.В. Технология работ по наращиванию плотин сверх проектных отметок // Актуальные вопросы мелиораций земель: сборник статей аспирантов, магистрантов, студентов (3-й выпуск / Новочерк. гос. мелиор. академия) – Новочеркасск, – 2013. С. 80-82.
32. Черных О.Н., Бурлаченко А.В. Обеспечение безопасности гидротехнических сооружений мелиоративного гидроузла с грунтовой плотиной: Учебное пособие. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2022. – 172 с. Режим доступа : <http://elib.timacad.ru/dl/full/s13102022/Chernykh.pdf>.

33. Волков В.И. Фильтрационные расчёты гидротехнических сооружений: Учебное пособие. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2014. – 103 с.
34. Черных О.Н., Бурлаченко А.В. Проектирование мелиоративного гидроузла с земляной плотиной: методические указания. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2023. – 77 с. Режим доступа: <http://elib.timacad.ru/dl/full/s10022023Chernih.pdf>.
35. Мелиоративная энциклопедия. – М.: ФГНУ Росинформагротех, 2003. Т.1. – 672 с.
36. Мамонтова Р.П. Рыбохозяйственная гидротехника. М.: МОРКНИГА, 2012. – 377 с.
37. Пушистов П.Ю., Викторов Е.В. Наводнения: от защиты к управлению. Научные редакторы В.Н. Лыкосов, В.А. Земцов, Ridero. 2018. – 310 с.
38. Маркин В.Н., Беглярова Э.С., Бакштанин А.М. и др. Основы рационального водопользования и управления водохозяйственными системами: Учебное пособие под ред. Ратковича Л.Д. М.: МГУП, 2012. – 445с.
39. СП 45.13330.2017. «Земляные сооружения, основания и фундаменты» (актуализированная редакция СНиП 3.02.011-87). 2012.
40. Анискин Н.А. Фильтрационно-температурный режим системы «плотина-основание». Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. М., 2009.
41. Белкин П. В., Степенко Н. В., Чубатов И. В. Опыт применения технологии ВМ при проектировании ГЭС. / Гидротехника - 2019. - № 1 (54), стр. 21 – 23.
42. Интернет ресурсы сайтов:
<https://www.midasgeotech.com/solution/gtsnx>;
<https://www.usgs.gov/software/sutra-a-model-2d-or-3d-saturated-unsaturated-variable-density-ground-water-flow-solute-or>; <https://geo5.ru>;
<https://www.waterloohydrogeologic.com/products/visual-modflow-flex>;
<https://www.syssoft.ru/dhi-technologies/mike-feflow>; <https://www.plaxis.ru>

Грунты для плотин и дамб



Супесь



Суглинок



Глина



Гравий мелкий



Галька
граниты, диориты



Скальные породы: диабазы,



Песок



Щебень



Валуны



Гранит глыбовый
Фракции 100...120 см,



Булыжник
60...80 см,



30...60 см;

Гравий окатанный
30...130 см

Рис. П1.1. Общий вид грунтов

Таблица П1.1.

Геотехнические характеристики грунтов и их зерновой состав

№ Кривых	Наименование грунтов	Плотность частиц грунта, ρ_s , кг/м ³	Плотность сухого грунта, ρ_d , кг/м ³	Пористость n	Угол внутреннего трения, ϕ , град.	Физико-механические свойства грунтов	Коэффициент фильтрации, м/сутки
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Глина	2740	1750	0,36	17	42,0	$5 \cdot 10^{-5}$
2	Глина пылеватая	2720	1710	0,37	16	36,0	$8 \cdot 10^{-5}$
3	Суглинок	2710	1740	0,36	20	24,0	$1 \cdot 10^{-3}$
4	Суглинок моренный	2700	1700	0,37	21	21,0	$2 \cdot 10^{-2}$
5	Супесь	2680	1710	0,36	23	11,0	0,3
6	Супесь с галькой	2700	1740	0,36	25	8,5	0,9
7	Песок мелкий	2650	1870	0,37	30	2,0	3,5
8	Песок средней крупности	2660	1730	0,35	34	1,1	12,0
9	Песок крупный	2660	1730	0,35	37	-	23,0
10	Песок гравелистый	2670	1760	0,34	33	-	48,0
11	Гравийный	2680	1760	0,34	38	-	98,0
12	Дресвяной	2650	1670	0,37	39	-	356,0
13	Галечниковый	2660	1650	0,38	36	-	970,0
14	Галечниковый	2660	1700	0,38	38	-	2915,0
15	Щебенистый	2670	1660	0,38	39	-	-
16	Валунный	2670	1680	0,37	38	-	-
17	Глыбовый	2650	1620	0,39	39	-	-

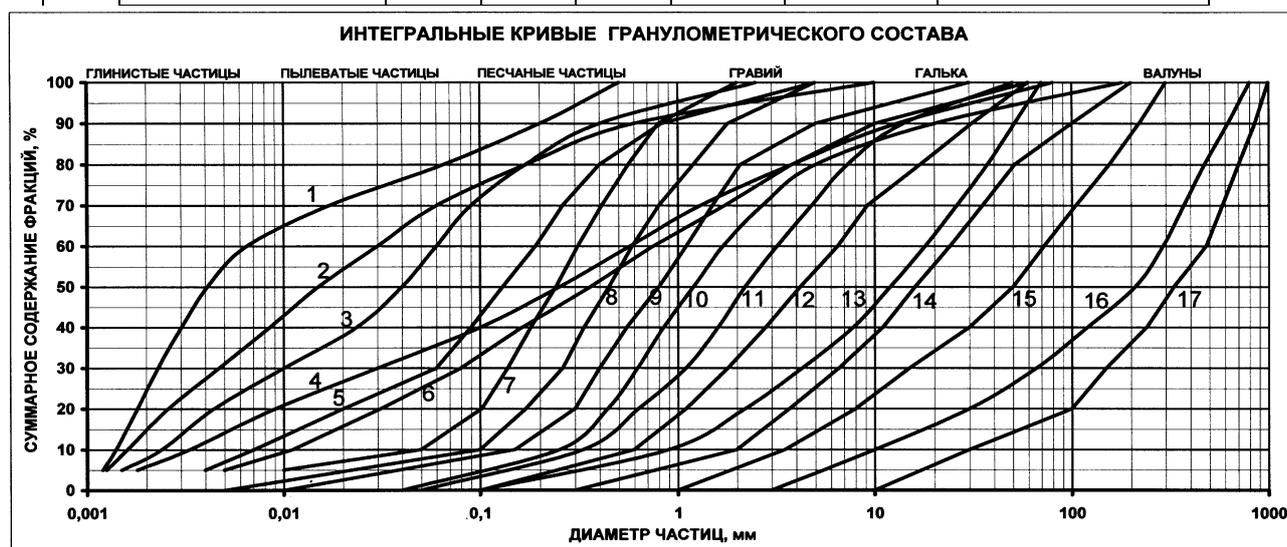


Рис. П1.2. Зерновой состав грунтов

Примеры поперечных сечений плотин

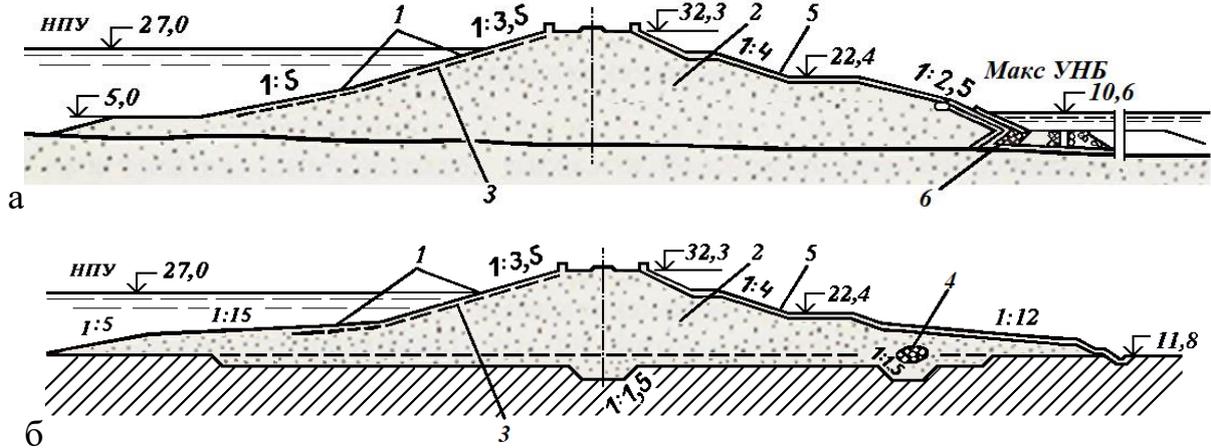


Рис. П2.1. Земляная пойменная (а) и русловая (б) намывная однородная плотина Цимлянского гидроузла на р. Дон. Длина плотины 12,75 м, высота 32 м, построена в 1949-1952 гг.: 1 – бетонные армированные плиты; 2 – песок тела плотины; 3 - трёхслойный ленточный фильтр; 4 – закрытый дренаж; 5 – щебёночное покрытие; 6 – дренажная призма и наклонный дренаж

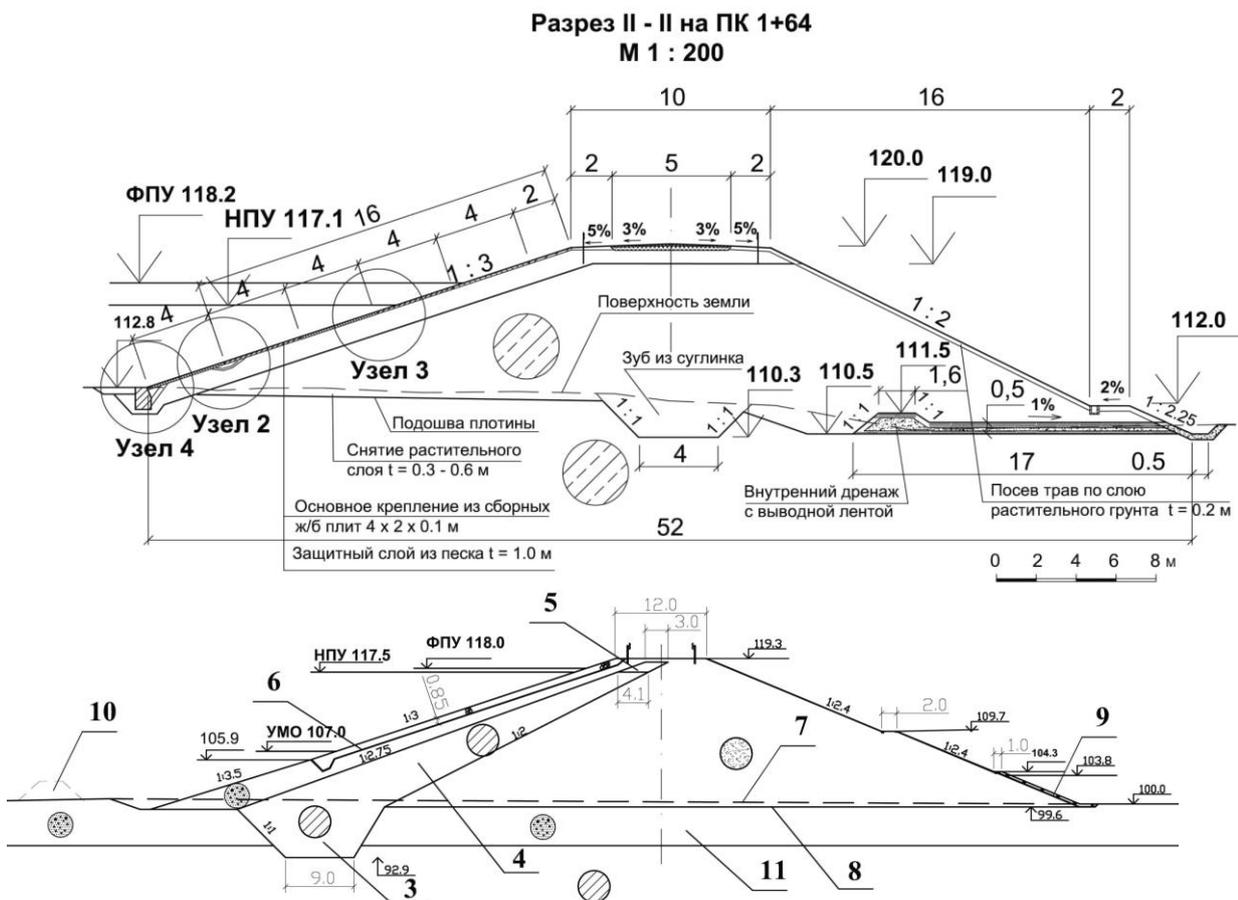


Рис. П2.2. Поперечные сечения современных земляных плотин: а, б – однородных в русловой и береговых частях створа; в – неоднородных с понуром

Основные типы дренажей земляных плотин

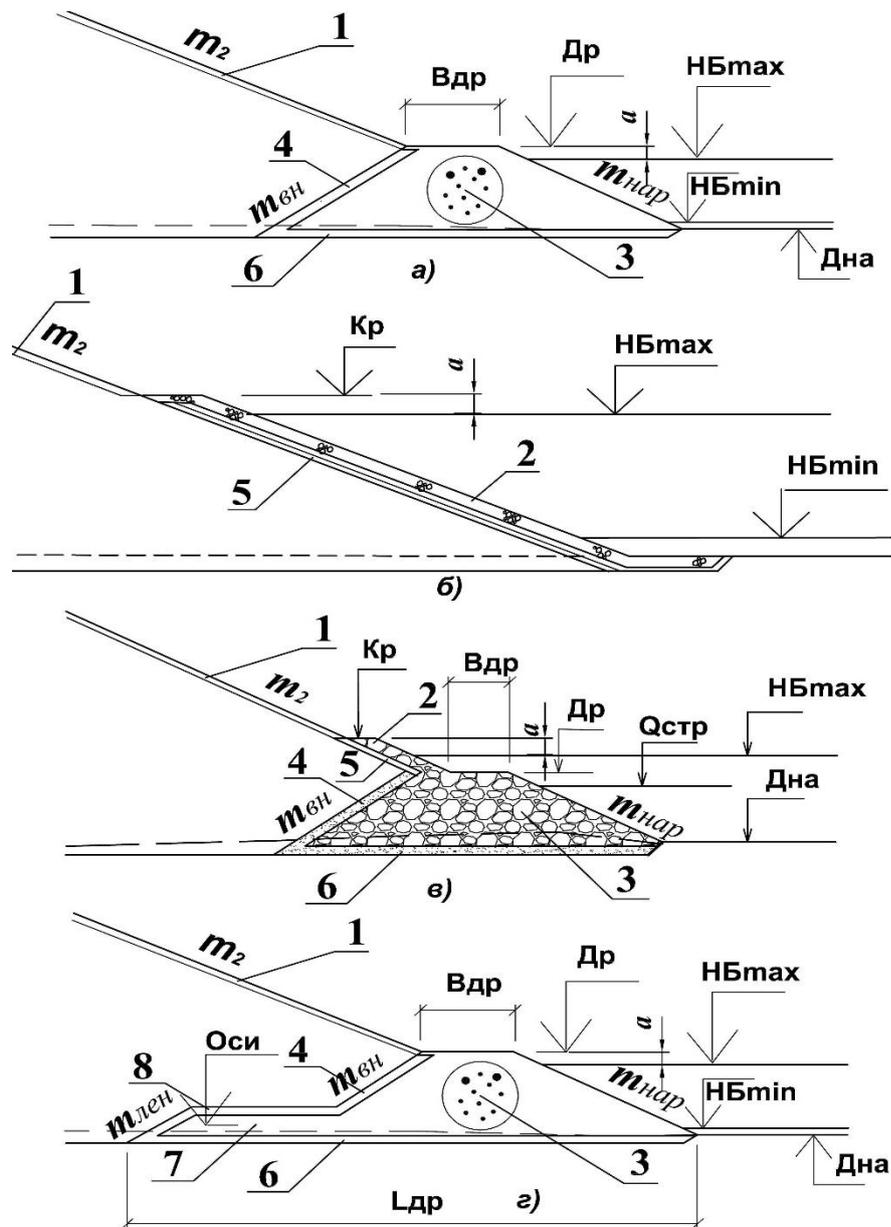


Рис. ПЗ.1. Типы дренажей русловых и пойменных участков плотин: а – дренажная призма; б – наклонный дренаж; в – комбинированный дренаж: дренажная призма + наклонный дренаж; г – комбинированный дренаж: дренажная призма + плоский горизонтальный дренаж; 1 – посев многолетних трав по слою растительного грунта; 2 – наклонный дренаж; 3 – дренажная призма; 4 – фильтр со стороны тела плотины; 5 – фильтр наклонного дренажа; 6 – фильтр со стороны основания; 7 – плоский горизонтальный дренаж; 8 – фильтр плоского горизонтального дренажа основания; 7 – плоский горизонтальный дренаж; 8 – фильтр плоского горизонтального дренажа

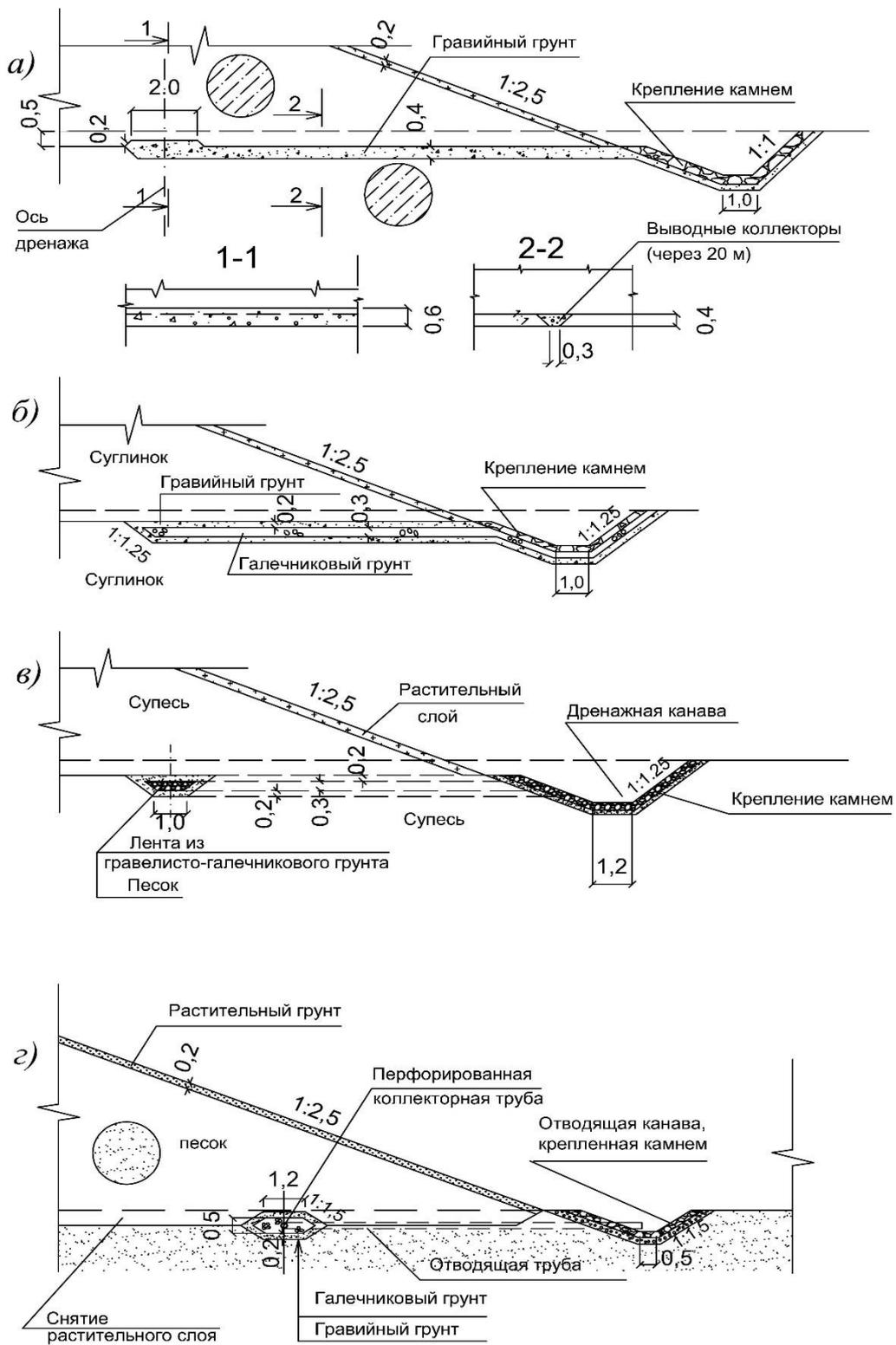
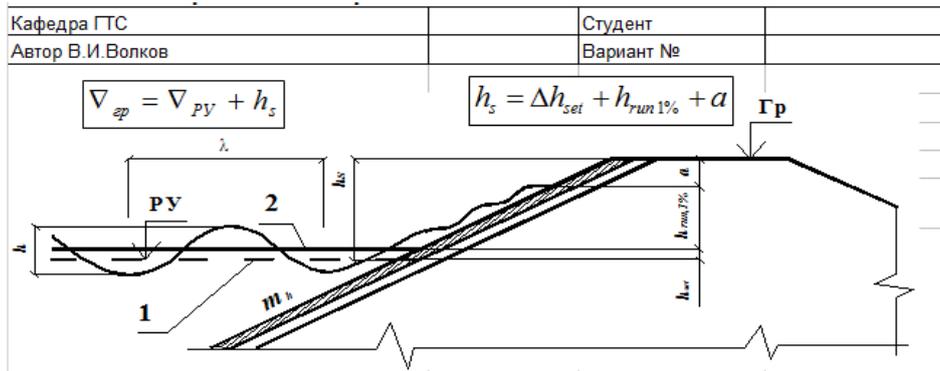


Рис. ПЗ.2. Примеры дренажей незатопляемых береговых участков

ПЛОТИН: а и б – плоский горизонтальный дренаж; в – ленточный дренаж; г – трубчатый дренаж

Таблица П4.1. Определение отметки гребня земляной плотины на ПК по программе В.И. Волкова в редакторе Excel [14]



Исходные данные			
	НПУ	ФПУ	
Отметка расчетного уровня, м	184.2	184.9	
Отметка дна, м	170	170	
Длина разгона ветровой волны L, м	1200	1250	
Угол между осью водохранилища и направлением ветра ав, град	0	6	
Скорость ветра Vw, м/с	28.0	16.0	
Заложение верхового откоса	3	3	
Обеспеченность по накату (в %), P =	1	1	
Формулы	Результаты		Источник
Высота ветрового нагона, м $\Delta h_{\text{вн}} = K_{\text{в}} \frac{W^2 D}{g(H + \Delta h)} \cos \alpha_{\text{в}}$	0.014	0.005	Источник - СП 38.13330.2012 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения
gL / V_w^2	15.0	47.9	
gt / V_w	7567.7	13243.5	
$g\bar{h} / V_w^2$	0.00734	0.01281	
$g\bar{T} / V_w$	0.90	1.28	С графика рис. 1 Приложение 1
$\bar{T} = (g\bar{T} / V_w) \cdot (V_w / g)$	2.57	2.08	
$\bar{\lambda}_d = \frac{g\bar{T}^2}{2\pi}$	10.34	6.78	
Проверка глубоководности водоема $0.5\bar{\lambda}_d / H_1 \leq 1$ ($0.5\bar{\lambda}_d \leq H_1$)	0.36	0.23	
	Выполняется	Выполняется	
$\bar{h} = (g\bar{h} / V_w^2) \times V_w^2 / g$	0.59	0.33	
$K_{1\%}$	2.08	2.08	С графика рис. 2 Приложения 1
$h_{1\%}$	1.22	0.70	
$\bar{\lambda}_d / h_{1\%}$	8.48	9.74	
K_r	0.9	0.9	Из таблицы № 6
K_p	1	1	Из таблицы № 6
$K_{сп}$	1.5	1.34	Из таблицы № 7
K_a	1	0.988	Из таблицы № 9
K_j	1	1	Из таблицы № 8
$K_{греб}$	1.12	1.20	С графика № 10
$h_{греб 1\%} = k_r k_p k_{сп} k_{греб} k_j k_a h_{1\%}$	1.84	1.00	
Конструктивный запас a, м	0.5	0.5	
Требуемый запас гребня над расчетным уровнем $h_c = \Delta h_{set} + h_{греб 1\%} + a$	2.36	1.50	
Отметка гребня плотины, м	186.56	186.40	
Принимаем	186.56	м	

Учебное издание

Черных Ольга Николаевна

Журавлёва Анна Геннадиевна

Бурлаченко Алёна Владимировна

Жукова Татьяна Юрьевна

ЗЕМЛЯНЫЕ ПЛОТИНЫ И ДАМБЫ

Учебное пособие

Под общей редакцией

О.Н. Черных

Подписано в печать . . .2023 г. Формат 60x84 1/16

Печ. л. 12,8. Тираж 100. экз. Заказ
